

BUENAS PRÁCTICAS EN EL MODELADO DE SEPARADORES MULTIFÁSICOS

Tomás Copes^a y Karolline Ropelato^b

^aESSS, Engineering Simulation Scientific Software, Baltimore 645, Villa Allende, Córdoba, Argentina,
tomas@esss.com.br, <http://www.esss.com.ar/>

^bESSS, Engineering Simulation Scientific Software, Av. Presidente Vargas 3131, Rio de Janeiro, Brasil,
ropelato@esss.com.br, <http://www.esss.com.ar/>

Palabras claves: Separadores, CFD, Oil&Gas.

Resumen. En el presente estudio, diferentes casos de simulación de separadores multifásicos son analizados mediante el uso de fluido dinámica computacional. Se considera las interacciones entre las partículas (fase dispersa) y el fluido (fase continua), y la segregación de las fases por diferencias de masa específica debido a efectos gravitacionales. Mediante simulación CFD se estudian diferentes equipamientos de la industria Oil&Gas, como son los hidrociclones, centrífugas, flotadores y tratadores electrostáticos. Dentro de estos dispositivos se analizan las entradas, ciclones de separación centrífuga, demisters, tranquilizadores de flojo (anti sloshing), dispositivos de atenuación de vórtices de salida, entre otros. Los principales problemas que se presentan son el arrastre del petróleo por gas o agua y arrastre del gas por el petróleo. Se analizan como los diferentes modelos matemáticos interpretan los fenómenos físicos y como es el abordaje de la simulación dentro del software Ansys.

1. INTRODUCCIÓN

Respecto de los procesos físicos que ocurren dentro de los equipos de separación, es importante entender que los procesos de separación de fases involucran flujos multifásicos, estos consisten en partículas rodeadas de uno o más medios continuos, o una matriz porosa identificable a través de la cual los medios continuos están dispersos. Los flujos multifásicos son inherentemente complejos desde el punto de vista computacional involucrando fenómenos tales como: corrientes de densidad, coalescencia y rotura de gotas, modificación del nivel de turbulencia por presencia de la fase dispersa, y sensibilidad a surfactantes, entre otros. Muchos equipos utilizados en la industria del petróleo se siguen diseñando a partir de modelos muy simplificados, o con la experiencia ganada en gran parte con procesos de prueba y error, y en muchos casos por la mera replicación de otros equipos anteriores. Adicionalmente, dado lo costoso y técnicamente dificultoso de instrumentar internamente estos equipos, pocas veces se tiene idea de qué está ocurriendo dentro de ellos, y en muchas ocasiones no es fácil entender por qué no se comportan como se había pensado originalmente, con las consecuentes pérdidas de eficiencia y/o eficacia, discontinuidades en la línea de producción, y otros problemas.

El presente trabajo describe diferentes técnicas de desarrollo de modelos de simulación para analizar procesos de separación de fases, basados en modelos para flujos multifásicos, capaces de ser utilizados en forma eficaz para el análisis, optimización, y diseño de componentes para la industria del petróleo.

Existen diferentes tipos de separadores, cada uno de estos tienen finalidades específicas para cada aplicación, ver (Ropelato 2015a). A continuación se describen diferentes técnicas utilizadas, y como son abordadas desde la simulación fluido dinámica.

2. SEPARADORES GRAVITACIONALES

Los separadores gravitacionales llevan en consideración las interacciones entre las partículas con el fluido que lo rodea y los fenómenos interfaciales involucrados. El principio general de separación mecánica de fases es el gravitacional, basado en la segregación de fases por diferencia de masa específica, de modo general, tanto la decantación de las gotas de agua en el petróleo como las gotas de líquido en el gas pueden ser aproximadas por la decantación de una partícula sólida en un fluido sobre el efecto de la fuerza gravitacional. La Figura 1 presenta el esquema de fases y fuerzas actuantes en un sistema típico donde existe la presencia de un sistema multifásico. En estas condiciones la partícula será acelerada por la fuerza gravitacional (Ec. (1)), la cual se le opone una fuerza de arrastre debida al fluido (Ec. (2)). Esta fuerza de arrastre es dependiente de la velocidad relativa entre la partícula y el fluido, de esta manera, la partícula será acelerada hasta que la fuerza de arrastre iguale la fuerza gravitacional, ver (Ropelato 2015b).

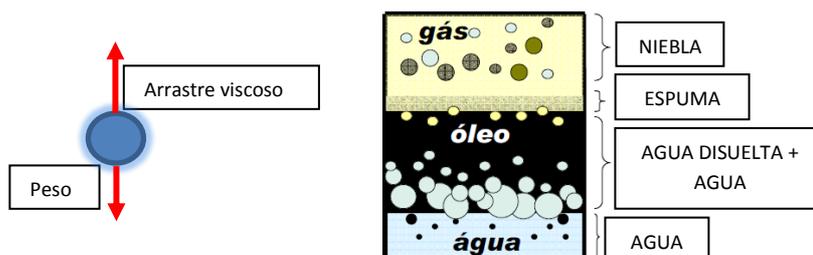


Figura 1: Esquema de fases (derecha) y fuerzas actuantes (izquierda).

$$W = \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_f) \quad (1)$$

Donde W es la fuerza gravitacional, r es el radio de la partícula ρ_p es la masa específica de la partícula y ρ_f es la masa específica del fluido.

$$F = \frac{C_D \cdot A_p \cdot \rho_f \cdot V_t^2}{2} \quad (2)$$

Donde F es la fuerza de arrastre, C_D es el coeficiente de arrastre, A_p es el área de la proyección de la partícula en la dirección del desplazamiento, V_t es la velocidad terminal relativa entre la partícula y el fluido.

Cuando $W=F$ y la aceleración es igual a cero, la velocidad terminal de la partícula es constante, ver (Ec. (3)):

$$V_t = \left(\frac{4 \cdot g \cdot d_p}{3 \cdot C_D} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right)^{0,5} \quad (3)$$

Donde d_p es el diámetro de la partícula.

Los principios básicos de la separación gravitacional son regidos por la ecuación de Stokes (Ec. (4)), entre tanto esta ecuación asume que no hay interferencia entre las partículas, lo que normalmente no ocurre en la práctica. La ecuación de Stokes solo provee resultados válidos para sistemas en que la fase particulada está diluida (menos de 5% en el volumen en relación a la fase continua).

$$V_t = \frac{(\rho_w - \rho_o) \cdot g \cdot d_G^2}{18 \cdot \mu} \quad (4)$$

Donde ρ_w es la densidad del agua, ρ_o es la densidad del medio continuo, d_G es el diámetro de las partículas y μ es la viscosidad del fluido continuo.

2.1 Separador de agua libre.

Estos separadores tienen la función de remover exclusivamente el agua no emulsionada. A través del principio de decantación gravitacional, se promueve la separación de las fases líquidas y de vapor (separador bifásico) o de las fases de agua, petróleo y vapor (separador trifásico), ver [Figura 2](#).

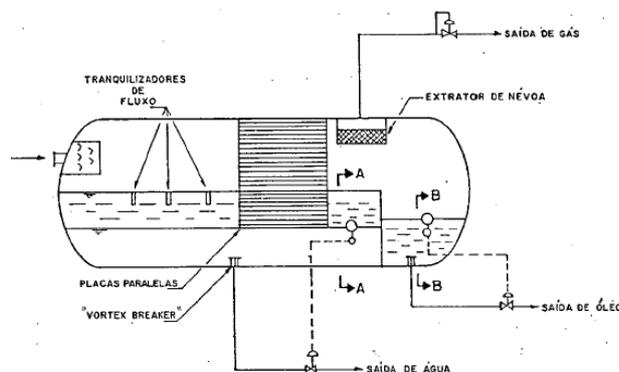


Figura 2: Esquema de componentes de un tanque separador.

Existen diferentes dispositivos y accesorios en estos separadores, estos son listados a continuación conjuntamente con algunos ejemplos de cada aplicación.

2.1.1 Dispositivos de entrada.

Su objetivo es limitar la región perturbada por la carga que está llegando a través de la disipación de la energía de la mezcla de forma que no afecte la tranquilidad de la región de decantación del líquido. También tienen la función de inducir el inicio del proceso de separación de las fases a través de la imposición de fuertes variaciones en la cantidad de movimiento de flujo de entrada, variaciones bruscas en la dirección y velocidades del flujo. Un problema que este dispositivo genera es el impacto frontal muy intenso puede llevar a la formación excesiva de espuma y emulsiónamiento del agua en el petróleo. La [Figura 3](#) presenta un hidrociclón donde la fracción volumétrica de líquido y los vectores de velocidad son ilustrados. En estas imágenes se observa la condición de operación en que los equipamientos trabajan con un nivel de líquido interno en función de las condiciones intrínsecas de operación.

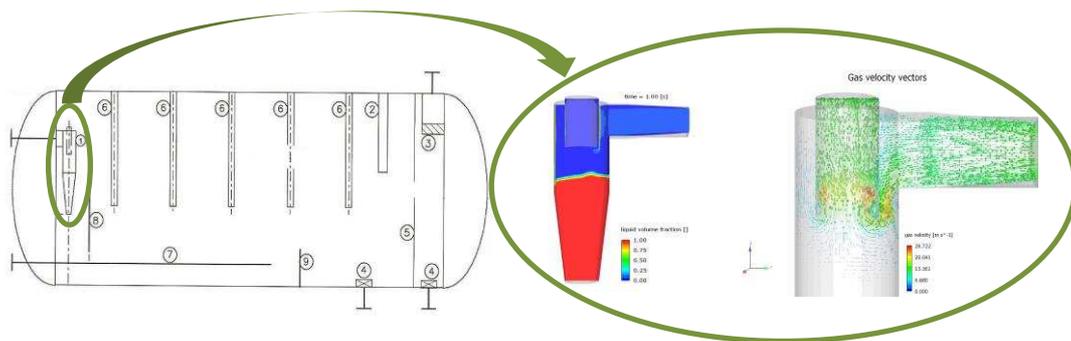


Figura 3 : Desarrollo de un ciclón para usar como dispositivo de entrada.

2.1.2 Dispositivos eliminadores de niebla.

Instalados en la sección de colección de gas, tiene la función de retener gotas líquidas cargadas por el gas. La remoción del líquido ocurre por colisión, retención y goteo dentro del tanque. Se analiza la eficiencia de diferentes configuraciones de demisters y tanques, siendo estos tanto verticales como horizontales. En el ejemplo de los demisters presentado en la [Figura 4](#), los gradientes de velocidad en el demister vertical se mostraron no uniformes, mientras que en los demister horizontales esta distribución de velocidad fue relativamente uniforme. Sin embargo, la eficiencia global de los equipamientos fue baja debido a que la distribución de masa en el equipamiento fue irregular haciendo que en algunas regiones del demister saturan rápidamente, aumentando la pérdida de carga y consecuentemente la pérdida de eficiencia.

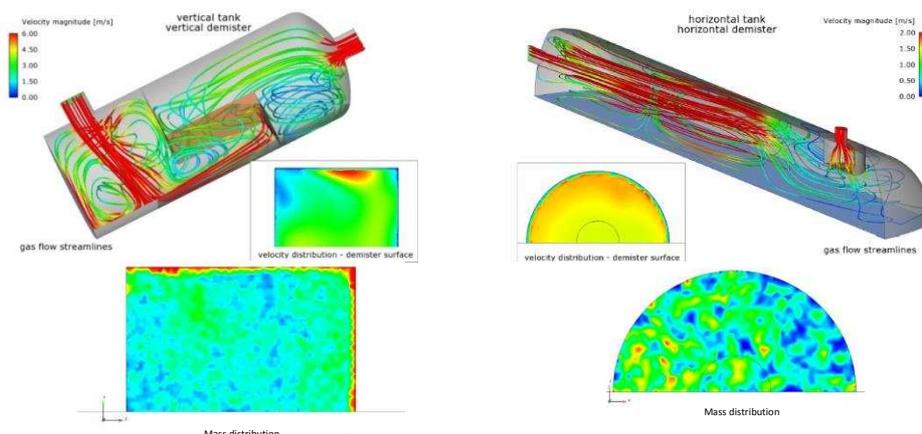


Figura 4 : Desarrollo de un demister vertical y horizontal para la separación de gotas de petróleo en el gas.

2.1.3 Dispositivos tranquilizadores de flujo.

Son placas perforadas que evitan que el balanceo de embarcaciones creen olas de resonancia (sloshing) en el interior del recipiente, evitando recirculación de fluidos, zonas de estagnación, y formación de espuma. El estudio de estos dispositivos posee el mismo abordaje que el analizado próximamente en el apartado 2.3.

2.2 Separador de dos fases.

Estos separadores de dos fases (agua-petróleo) actúan por la diferencias de densidad de las fases. La evaluación de la eficiencia conlleva el análisis del caudal de alimentación, tamaños de las gotas y la densidad de las gotas, y la evaluación de la dinámica interna depende del tiempo de residencia del agua y de las gotas de petróleo. Para optimizar la eficiencia se simularon dos condiciones de tanque, tanque simple y tanques concéntricos. Se consideró la fase continua como agua y la fase dispersa como petróleo, y el modelo de turbulencia utilizado fue RANS SST. El objetivo del estudio de los tanques concéntricos fue aumentar el tiempo de residencia de las gotas de petróleo para mejorar la eficiencia de separación. En la simulación se observó que a medida que aumenta el caudal del fluido el sistema de tanques concéntricos mejora su eficiencia respecto al tanque simple (ver Gráfico 1), la Figura 5 presenta dos modelos distintos de tanques separadores, uno de ellos sin deflectores internos y otro con.

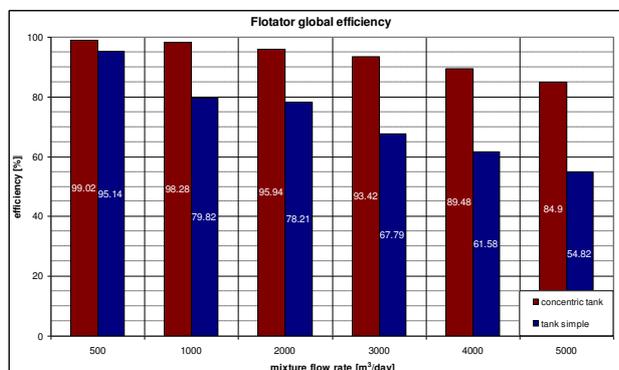


Gráfico 1: Comparación de eficiencia de separación.

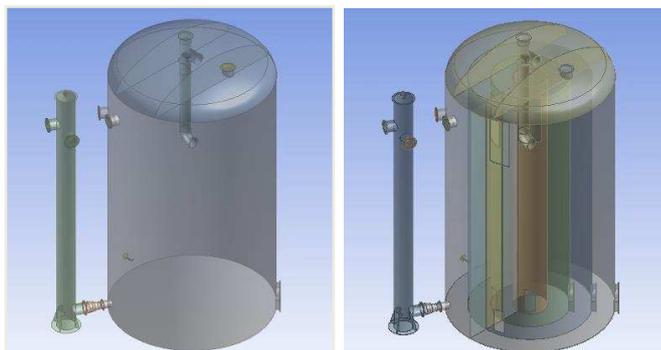


Figura 5 : Modelos de tanques separadores de dos fases (simple y concéntrico).

2.3 Separador de tres fases.

Se utilizan para separar dos fases dispersas (agua y petróleo) y una fase continua (gas), ver [Figura 6](#). En estos procesos el gas ejerce poca influencia en el flujo de las fases líquidas, las placas perforadas utilizadas para tranquilizar el flujo tienen más eficiencia cuando sus orificios no son pequeños ($\sim 45\text{mm}$). En este tipo de separadores es una buena opción el uso de modelados transitorios para captar la eficiencia de separación y acumulación de las partículas en el tiempo, así como también modelos de turbulencia $k-\epsilon$ debido a que la buena relación de compromiso entre costo computacional y resultados obtenidos.

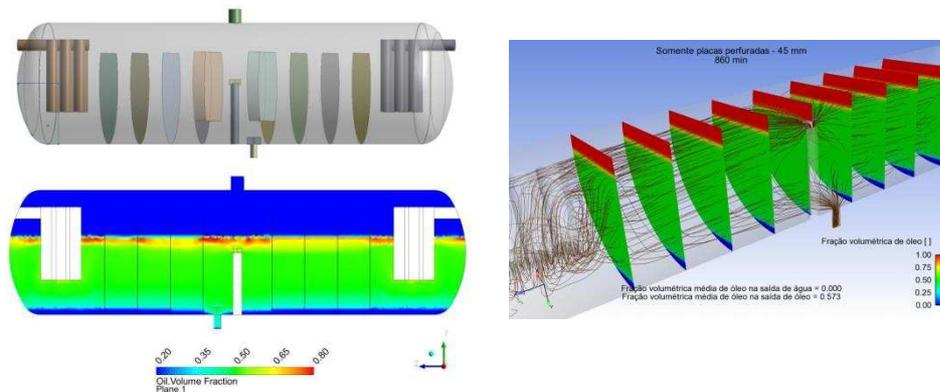


Figura 6 : modelado y simulación de tanque separador de tres fases.

2.4 Hidrociclones

Estos separadores utilizan el principio de fuerzas centrípetas para la separación de las fases líquidas de la fase gaseosa. El equipo consiste básicamente de una porción cilíndrica y una cónica con una o más entradas tangenciales en la parte superior, ver ([Alberto 2014](#)). Estos hidrociclones tienen como características, altos gradientes de velocidad en el centro y alta turbulencia anisotrópica.

Las simulaciones de hidrociclones tienen que representar fenómenos intrínsecamente transitorios, para esto es necesario definir algunos parámetros, ver ([Ropelato 2008](#)), como los indicados en los párrafos siguientes.

2.4.1 Paso de tiempo limitado por el número de Courant

El paso de tiempo debe limitarse por el número de Courant (Ec. (5)), tanto por el promedio como por los valores máximos, los valores promedios deben encontrarse entre 1 y 10 y los valores máximos entre 50 y 100, estas aproximaciones ayudan a la estabilidad de la convergencia, valores más altos de Courant ayudan a tener una convergencia más rápida pero puede tener problemas de estabilidad.

$$\begin{aligned} CFL &= \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta x}, \\ 1 &< \text{Courant RMS} < 10, \\ 50 &< \text{Courant MAX} < 100. \end{aligned} \quad (5)$$

2.4.2 Tiempo característico

Es utilizado para determinar el tiempo de residencia de la fase continua, ver (Ec. (6)). El tiempo total de una fase simple es 3 veces el tiempo característico.

$$\Delta t_{\text{característico}} = \frac{V_{\text{ciclón}}}{\dot{V}_{\text{inlet}}} \quad (6)$$

2.4.3 Modelo de turbulencia

Debido a las características intrínsecas del flujo, los modelos comunes de turbulencia no aplican para estos casos: Los resultados obtenidos con los modelos usuales k-ε y k-ω son poco realistas. El modelo de turbulencia más simple que entrega resultados coherentes es el modelo RSM con correlación pressure- strain de segundo orden (SSG en CFX). Algunos modelos más detallados como SAS (Scale Adaptive Simulation), LES o DES pueden ser utilizados, pero incrementan notablemente el costo computacional.

2.4.4 Condiciones de contorno

Una combinación común es caudal másico en la entrada y en una salida y presión en la otra salida. Adoptar todas las condiciones de contorno con una presión prescrita es muy inestable. Si solo se cuenta con información de presión entonces se pueden usar user functions (UDF's en Fluent o rutinas FORTRAN en CFX) para controlar el caudal y conseguir la correspondiente pérdida de carga. No especificar dirección de la velocidad (o componentes de velocidad) en las condiciones de salida a menos que se tenga certeza que el flujo está desarrollado en esta posición. La [Figura 7](#) presenta el perfil de velocidad en la salida del equipamiento, se observa la región central con bajas velocidades y altas próximas a las paredes. Este comportamiento es justificado por el patrón de altas velocidades existentes dentro del equipamiento.

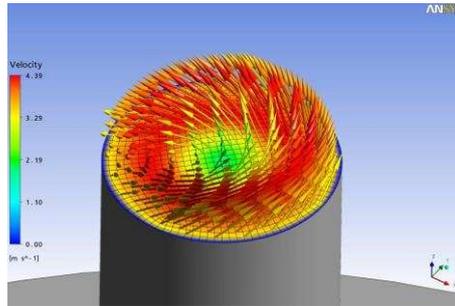


Figura 7 : Vectores de velocidad en la salida del ciclón.

2.4.5 Inicialización

Una buena condición inicial puede reducir notablemente los tiempos de simulación (reduciendo el tiempo necesario para desarrollar los campos de velocidad y presión). Es posible usar como condición inicial el resultado de simulaciones realizadas usando mallas más gruesas y/o modelos de turbulencia más simples, la interpolación de resultados de estudios previos, el uso de soluciones analíticas de los campos de velocidad y presión o la solución “Burgers vortex” que es una solución analítica de las ecuaciones de Navier-Stokes que entrega campos de velocidad próximos a los existentes en un ciclón o hidrociclón (componente tangencial) basado en 2 parámetros, ver [Figura 8](#).

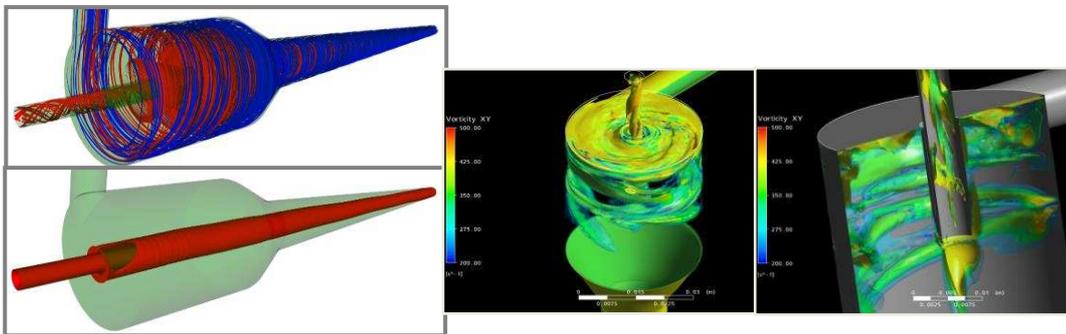


Figura 8 : Líneas de corriente y vorticidad en un ciclón.

2.5 Flotación.

La técnica se fundamenta en la propiedad de la fase dispersa (partículas sólidas o gotículas en suspensión) puede ser capturadas selectivamente por la burbujas de aire o gas en la fase líquida (continua), ver [Figura 9](#). La eficiencia de la colisión/adhesión entre las burbujas y las gotas de petróleo aumentan con la disminución del tamaño de las burbujas y el aumento del tamaño de las gotículas. Por lo tanto, burbujas de gas muy grandes tienen baja eficiencia de captura, mientras que burbujas de gas muy pequeñas tienen baja velocidad de ascenso.

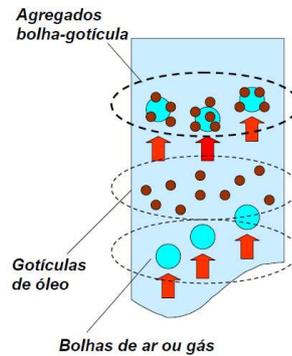


Figura 9 : Esquema de inyección de gases en el sistema de separación por flotación.

Se realizó una simulación para desarrollar un tanque de flotación para tratamiento de agua, ver Figura 10.

- Modelo multifásico: Euler–Euler (gas–agua) y Euler –Lagrangiano (gas–agua/petróleo).
- Evaluación de la pérdida de eficiencia por ensuciamiento del tanque y los aspersores de gas.
- Evaluación de la eficiencia de Vane Pack. Modelado mediante sub dominios y especificación de pérdida de carga.

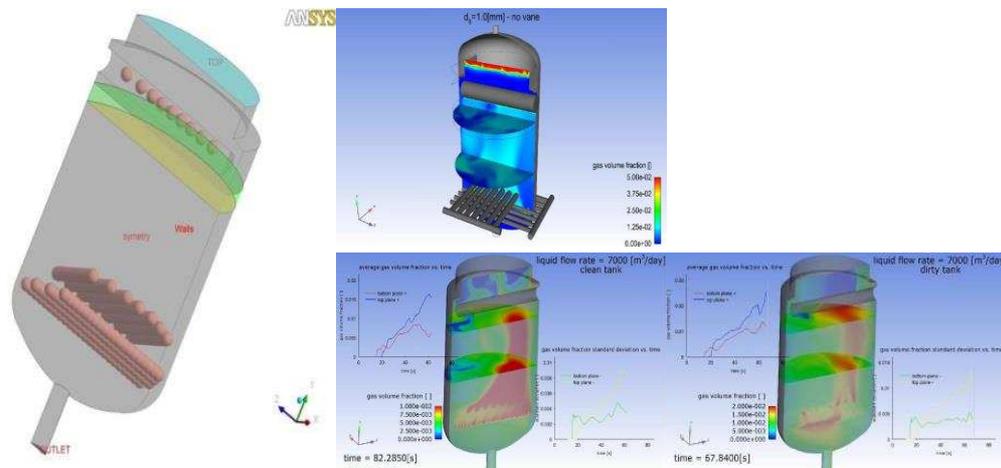


Figura 10 : Simulación de inyección de gases en el sistema de separación por flotación para tratamiento de agua.

Se observó que la disposición de los aspersores de gases son importantes para distribuir homogéneamente el gas en el flujo de agua, así como también, grandes caudales de fluido generan zonas de recirculación dentro del tanque.

3. CONCLUSIONES

El uso de la fluido dinámica computacional (en inglés CFD) se ha tornado cada vez más presente como herramienta de apoyo a la ingeniería. En algunos casos inclusive siendo parte fundamental para tomar decisiones.

Fue presentado un conjunto de informaciones relacionadas al uso del CFD y se demostró la

manera de obtener modelos capaces de predecir los comportamientos fluido dinámico en los equipamientos de separación. A pesar de tratarse de sistemas multifásicos, cada uno tiene su particularidad y esto impacta en el conocimiento de las características físicas del fenómeno para tomar la decisión de que modelo es el más adecuado para cada caso.

Un claro por ejemplo es el caso de hidrociclones donde un modelo RANS no es el más indicado para capturar las características de alta vorticidad, sin embargo, es posible utilizar este modelo de turbulencia en separadores de tres fases debido a que los gradientes de velocidad son menores.

Otro ejemplo son los modelos multifásicos empleados para cada caso, debido a que la distribución de las partículas, ya sea diluida o concentrada, y la propia cinética de movimiento de ellas define el modelo a emplear.

REFERENCIAS

Karolline Ropelato, *Aula 15 Escoamento Multifásico: Fundamentos e Modelagem Computacional. Instituto ESSS de Pesquisa e Desenvolvimento*, 2015a.

Karolline Ropelato, *Apostila Escoamento Multifásico: Fundamentos e Modelagem Computacional. Instituto ESSS de Pesquisa e Desenvolvimento*, 2015b.

Karolline Ropelato, *Guidelines on numerical modelling of cyclones and hydrocyclones*, 2008.

Patricio Alberto, *Simulación Computacional Aplicada a Separadores Ciclónico*, 2014.