

Título: Comparación de los modelos cinéticos para Flotación con aire disuelto.

Autores: MC Arturo Tapia Alcaraz, Dr. Enrique Cázares Rivera

1 Resumen de resultados

Este artículo discute el tipo de floculación requerida previo a un tratamiento con Flotación con Aire Disuelto (FAD).

Los resultados de los experimentos realizados demostraron que mientras menor sea la cantidad de flóculos en el agua a tratar menor será la cantidad de aire requerido para una flotación adecuada. Se encontró experimentalmente que el desempeño de FAD es mejor con flóculo grande. Se presenta una teoría de la cinética para FAD basada en el modelo ortocinético presentado por TAMBO.

2 Introducción.

La flotación con aire disuelto consiste en inyectar al agua a tratar, previa floculación, agua sobresaturada de aire. El agua sobresaturada de aire es la que ha sido sometida a una presión alta y puesta en contacto con aire en esas condiciones para posteriormente pasarla a baja presión, lo que provoca que contenga más aire del que puede disolver, pues según la ley de Henry mientras mayor sea la presión de la mezcla mayor será la capacidad del agua de disolver gases.

El proceso en la práctica se utiliza de la siguiente manera: Una parte del agua tratada se recircula mediante una bomba de alta presión hacia un saturador donde se pone en contacto con aire y lo disuelve, posteriormente el agua saturada de aire es liberada a la presión atmosférica en la celda de flotación, donde se mezcla con el agua floculada. El agua de recirculación sujeta a una presión menor libera el aire y forma muchas burbujas pequeñas que al impactarse con el flóculo quedan adheridas a éste y lo hacen flotar, haciendo posible su recolección en la superficie.

Una de las principales ventajas que se mencionan de este proceso es que funciona con tiempos de retención para la floculación previa menores a los requeridos por el proceso tradicional de sedimentación. Esto debido a que el proceso de FAD es eficiente con flóculos pequeños. Edzwald, 1994 llega a la conclusión de que no se requieren flóculos grandes para FAD. Sin embargo Tambo, 1994 presenta otra teoría cinética para FAD que sostiene que se requieren flóculos grandes para una mejor separación.

En este artículo se presentan los resultados de una serie de experimentos cuyos resultados indican que es mejor preparar flóculos grandes para la separación de sólidos mediante FAD. Se desarrolla además una teoría cinética de FAD basada en el modelo ortocinético de floculación.

3 Antecedentes

3.1 Antecedentes históricos.

Uno de los más interesantes avances en la potabilización de aguas superficiales ha sido el desarrollo de la flotación con aire disuelto (FAD) (Dissolved Air Flotation DAF), que hasta hace poco ha comenzado a ganar popularidad en Estados Unidos. El proceso inicialmente fue desarrollado en la industria minera para la separación de sólidos y en 1924 se patentó el método de FAD para usarse en la remoción de celulosa de los desechos de la industria del papel en Escandinavia. Desde ese tiempo el proceso se ha venido refinando en usos diferentes al de la potabilización (remoción de grasas, aceites, fibras, etc.) hasta que al inicio de los sesentas se usó por vez primera, de nuevo en Escandinavia, en la clarificación de agua para potabilización. El proceso es ampliamente aceptado en Europa, en 1973 había 71 plantas en Finlandia, Noruega y Suiza (Hyde 1977), en 1985 había 20 en Inglaterra (Zabel 1985). También es ampliamente aceptado en Asia, Australia y recientemente en Estados Unidos de América donde se espera que tome mayor importancia debido a las nuevas imposiciones de ley para el tratamiento de aguas superficiales que requiere la filtración y eliminación de *Cryptosporidium* y *Giardia*. En este país actualmente hay ocho plantas operando y hay otras bajo estudio y diseño (Edzwald 1994) (Adkins 1994) (Zabel 1990).

3.2 Comparación de modelos cinéticos de flotación (FAD)

Existen dos opiniones diferentes en la literatura acerca de cómo flocular el agua previo a un tratamiento con FAD. Edzwald, 1994 propone en su modelo cinético que el principal mecanismo de contacto flóculo-burbuja es la intercepción, mecanismo que se considera en filtración y que se produce cuando la burbuja y los flóculos que se mueven según las líneas de corriente laminar (en la proximidad del flóculo o burbuja) llegan a ponerse en contacto. Siguiendo esta idea Edzwald llega a la conclusión de que no se requieren flóculos grandes para FAD.

Tambo, 1994 considera como causa principal de contacto flóculo - burbuja el gradiente de velocidad, como se considera en la floculación ortocinética y concluye que se requieren flóculos grandes para FAD. Hyde, 1977 menciona que flóculos bien desarrollados son flotados más efectivamente que flóculos pequeños.

Un tiempo de residencia corto en floculación es una de las principales ventajas que se menciona de FAD, así que es importante saber si realmente FAD es eficiente para flóculos pequeños, de los que son obtenidos con tiempos de floculación cortos.

4 Metodología

Para determinar cuál de las dos teorías cinéticas es la que más se apega a la realidad se realizaron pruebas con una planta piloto usando agua preparada sintéticamente y agua de un Río.

La Figura 4.1 muestra el diagrama de instalación de la planta piloto de flotación con aire disuelto empleada en el transcurso de la experimentación. El tratamiento del agua es como sigue: Primeramente se tiene el proceso de coagulación, que consiste en la dosificación de sulfato de aluminio como coagulante y la mezcla rápida, el agua así coagulada pasa al floculador mecánico de agitador múltiple donde se lleva a cabo el proceso de floculación. Posteriormente el agua fluye a la celda de flotación, donde se lleva a cabo el proceso de separación líquido-sólido, que sustituye a la sedimentación en el tratamiento de potabilización convencional. En la celda de flotación se está recirculando una parte del flujo del agua ya tratada que viene sobresaturada de aire, siendo éste el suministro de burbujas que hará que el flóculo flote y forme una espesa nata en la superficie, permitiendo su recolección con un mecanismo de rastras. El agua clarificada por flotación pasa finalmente por un filtro de arena. Una bomba de alta presión (40-80 psi) recircula una parte (5%-15%) de este flujo de agua ya filtrada, bombeándola hacia un saturador de aire. El saturador de aire es un recipiente empacado que permite exponer una gran área de contacto entre el agua presurizada y el aire. El saturador requiere una fuente de aire a presión para compensar al que sale disuelto en el agua de recirculación. A la presión que se tenga en el saturador se le llama presión de saturación, y es una de las variables que mayor influencia tienen en el desempeño por FAD. Del saturador sale el agua a presión saturada de aire y se inyecta al agua floculada en la entrada a la celda de flotación, proporcionando el aire necesario para formar las burbujas que realizan el proceso de flotación.

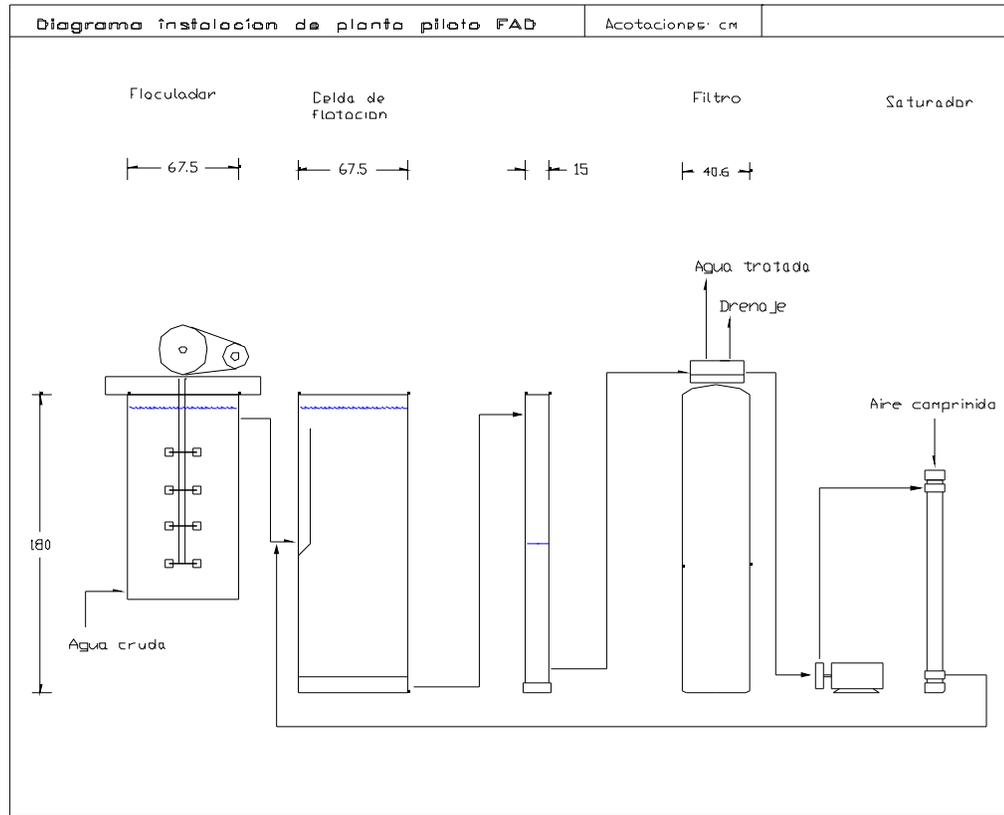


Figura 4.1 Diagrama de planta piloto de flotación con aire disuelto de 20 l/min de capacidad.

La cantidad de aire que se suministra al proceso es proporcional al porcentaje de recirculación y a la presión de saturación del agua.

4.1 Diseño de planta piloto

El diseño de la planta piloto se hizo con base en parámetros de la literatura y los resultados obtenidos de pruebas tipo batch. La capacidad de la planta es de 20 l/min.

4.1.1 Floculador

Se utilizó un floculador mecánico de sección cuadrada estándar con cuatro impulsores y un tiempo de residencia de 20 min. El gradiente de velocidad se varió de 40 a 110 s⁻¹.

El agua floculada se condujo a la celda de flotación por medio de tres mangueras de 1" de diámetro (25 mm de diámetro interno) con la finalidad de no tener un gradiente de velocidad alto que pueda romper el flóculo formado. Cada manguera tiene un válvula y al cerrar alguna se pueden usar sólo dos de estas o sólo una para conducir el agua, esto permite tener gradientes de velocidad en la conducción del agua del floculador a la celda de flotación de 60 s⁻¹, 173 s⁻¹ y 244 s⁻¹ para tres, dos y una manguera de conducción (variable G_m) respectivamente.

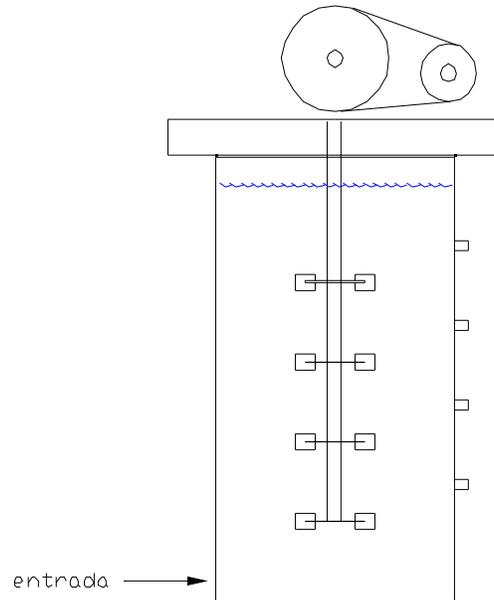


Figura 4.1 Floculador mecánico

4.1.2 Celda de flotación

La celda de flotación se diseñó con parámetros recopilados en Sudáfrica por Haarhoff, 1994.

Las Tabla 4.1 y Tabla 4.2 muestran las recomendaciones mínimas y máximas para los principales parámetros de diseño en FAD de Haarhoff y los valores usados en el diseño de la celda de flotación.

La celda está construida en acrílico transparente para permitir la visibilidad al interior.

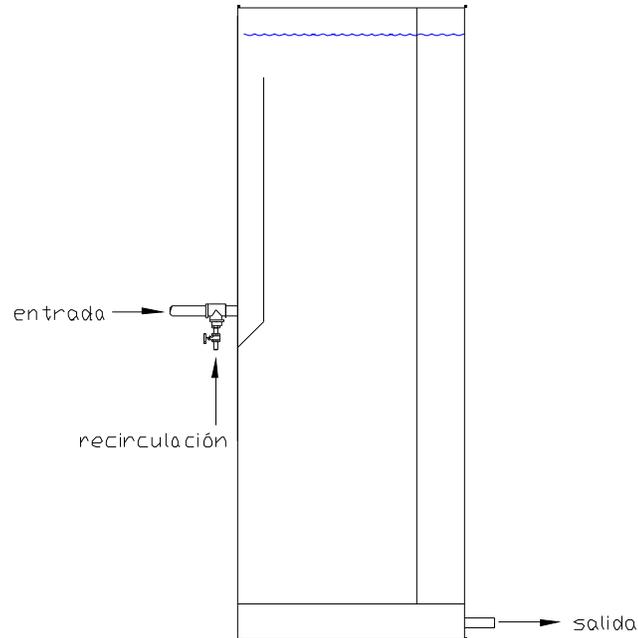


Figura 4.2 Celda de flotación

Tabla 4.1 Parámetros de diseño celda de flotación zona de reacción

	Tiempo de retención (s)	Carga hidráulica (m/h)
mín	60	40
máx	240	100
usado	67	40

Tabla 4.2 Parámetros de diseño celda de flotación zona de flotación

	Velocidad del flujo entrada (m/h)	Carga hidráulica (m/h)	Profundidad (m)
mín	20	5	1.5
máx	100	11	3
usado	40	10.3	1.5

4.2 Experimentación con agua preparada

Se preparó agua turbia adicionando a agua limpia (potable) una cantidad controlable de arcilla, específicamente bentonita.

La Figura 4.3 es el resultado de unas pruebas usando agua preparada con 40 y 100 mg/l de bentonita. Se aprecia que el proceso FAD tiene mejor desempeño cuando se preparan flóculos grandes. Para $G_m=1$ el gradiente en la manguera de conducción del agua floculada es de 244 s^{-1} , y

para $G_m=III$ el gradiente es de 60 s^{-1} . El floculo que había sido preparado a un gradiente de 40 s^{-1} en el floculador, se rompió al someterse a un gradiente de 244 s^{-1} al pasar por una sola manguera de la celda de flotación al floculador, quedando finalmente de un tamaño menor.

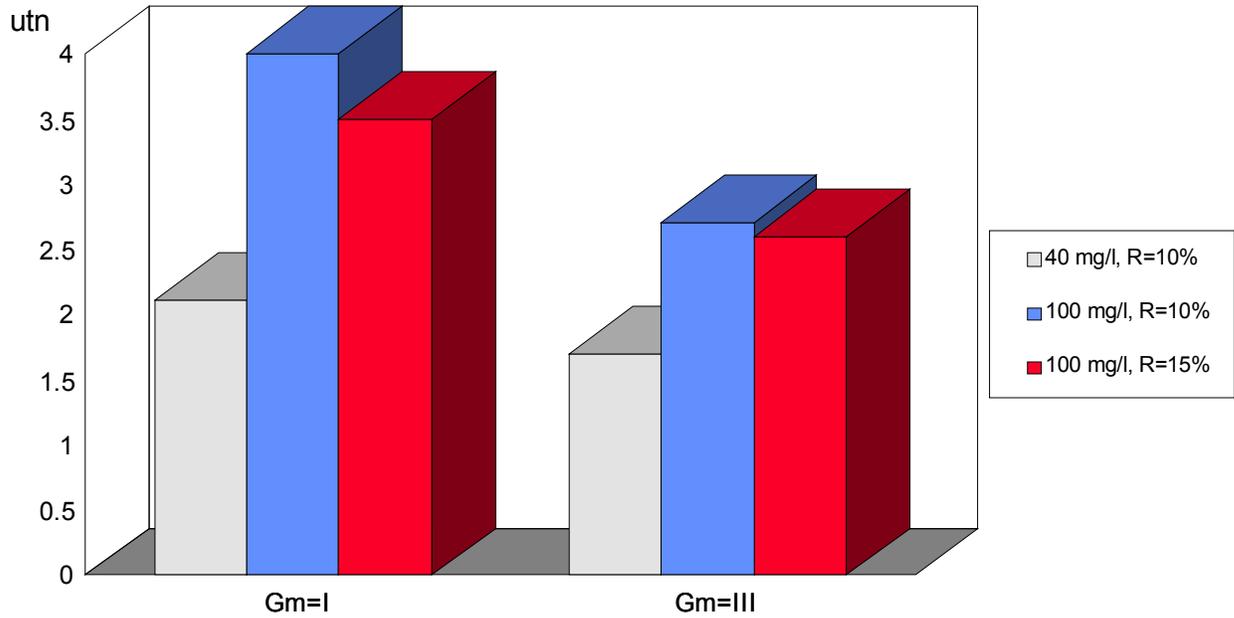


Figura 4.3 Comparación $G_m=I$ ($G=244\text{ s}^{-1}$), $G_m=III$ ($G=60\text{ s}^{-1}$). Presión de saturación=40 psi, la turbidez se refiere al agua flotada. Las dosis de sulfato de aluminio fueron las encontradas óptimas en pruebas de jarras. El gradiente de floculación fue de 40 s^{-1} .

4.3 Experimentación con agua del Río Humaya.

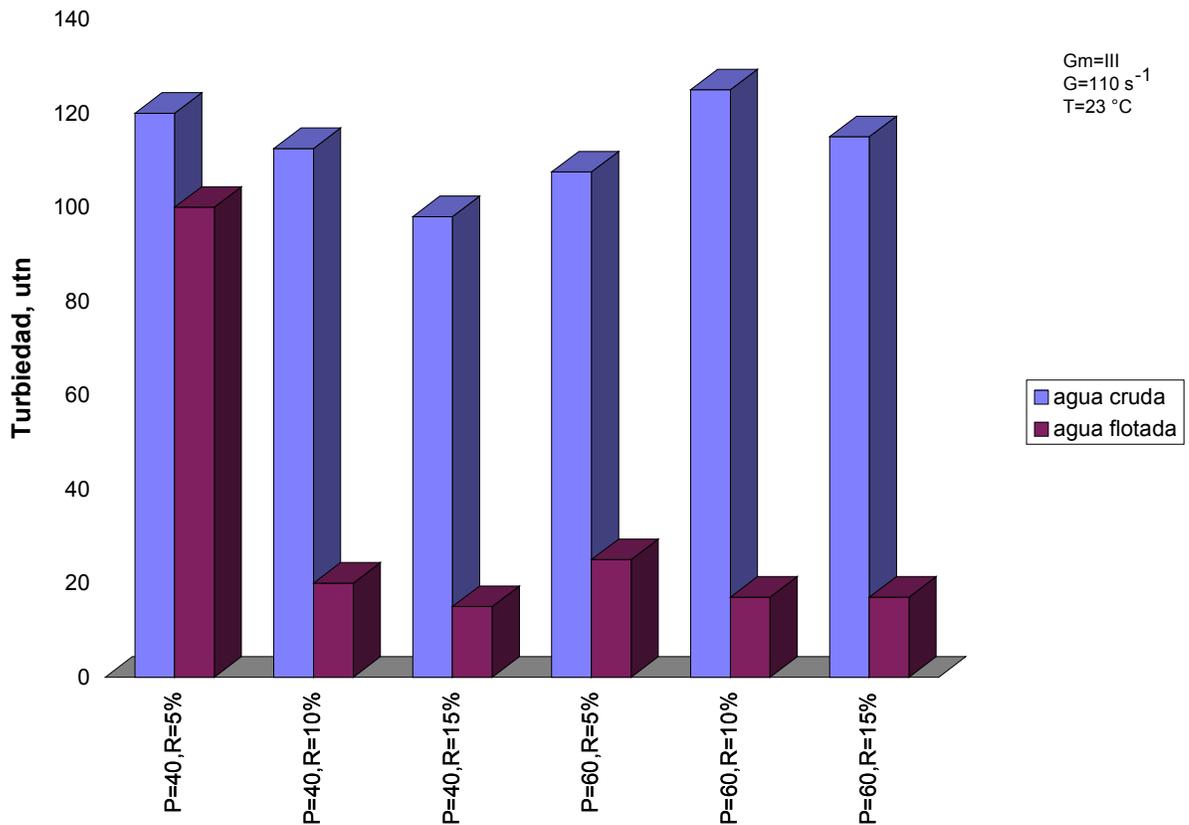


Figura 4.4 Turbidez contra combinaciones de recirculación y presión de saturación utilizando agua del Río Humaya.

La Figura 4.4 muestra que una recirculación del 5% con una presión de saturación de 40 psi no es suficiente para remover todo el flóculo formado por el agua de 120 utn que se estaba tratando. Recirculando el 5% a una presión de saturación de 60 psi se obtiene una mejora en la clarificación del agua, pero se observa aún falta de aire para remover flóculo. La combinación de 10% de recirculación y 40 psi parece estar al límite de la cantidad de aire requerida para una buena remoción.

Para el resto de las combinaciones la cantidad de burbujas formadas fueron más de las requeridas, no se veía flóculo en el fondo de la celda de flotación. La turbidez aún alta que se tiene en estas pruebas es debido a que la floculación mecánica de un solo paso no era eficiente.

Debido a que la combinación de recircular 10% a 40 psi parece estar al límite de lo necesario se selecciona ésta para realizar una serie de pruebas variando el gradiente de conducción del agua floculada a la celda de flotación. El objetivo de esta serie de experimentos es evaluar si el desempeño de FAD es mejor con flóculo pequeño o con flóculo grande. Si el desempeño de FAD es mejor con flóculo grande, entonces al disminuir el tamaño del flóculo una parte de este no será

removido (si se está trabajando con la mínima cantidad de aire requerida), y se tendrá que manifestar como un aumento en la turbiedad del agua flotada. De la Figura 4.5 a la Figura 4.6 se presentan resultados complementarios de estos experimentos, en la Figura 4.7 se presenta el resumen. Debido a que no se tiene un mismo valor para la turbiedad en el agua cruda de la Figura 4.7, se repitió la prueba y sólo se muestra el resumen en la Figura 4.8 .

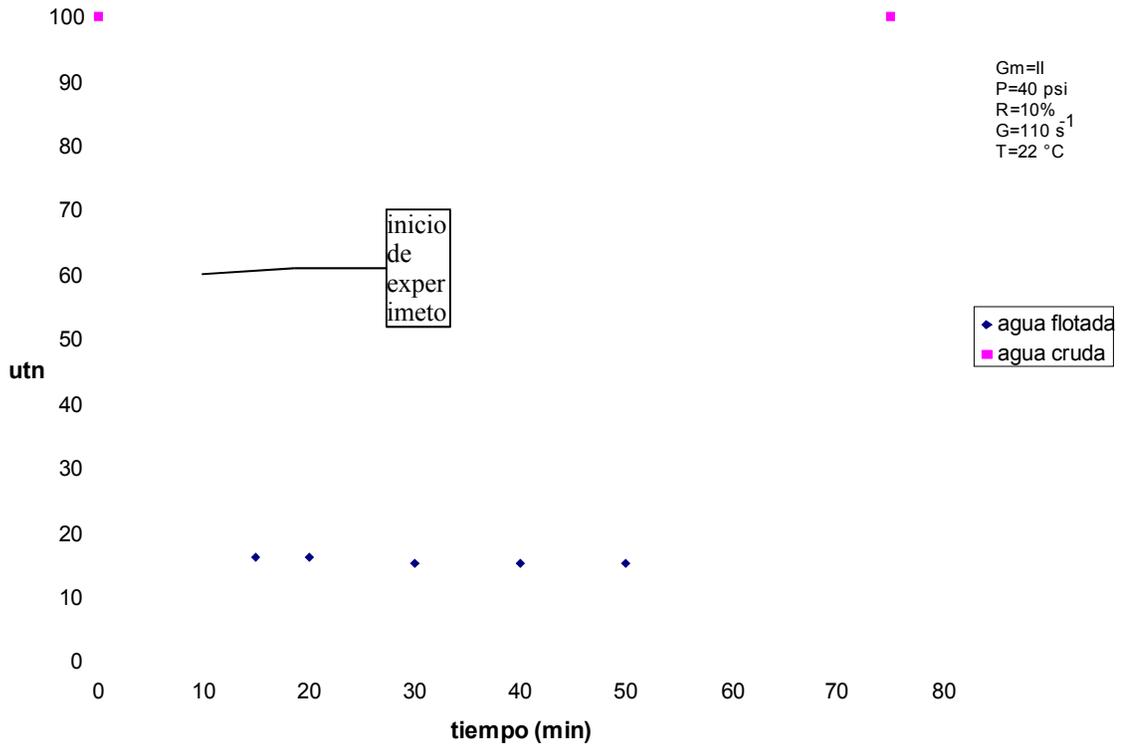


Figura 4.5 Turbidez contra tiempo para un gradiente de conducción de 170 s^{-1} ($G_m=11$)

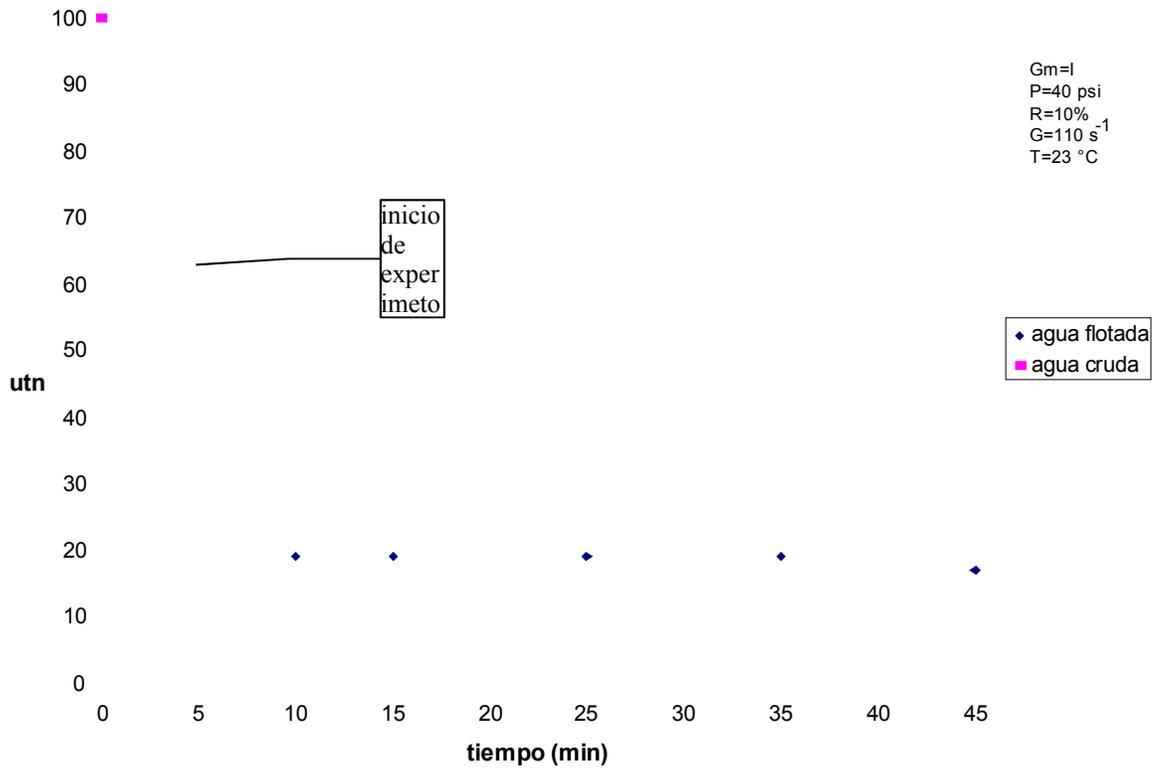


Figura 4.6 Turbidez contra tiempo para un gradiente de conducción 240 s^{-1} ($G_m=I$)

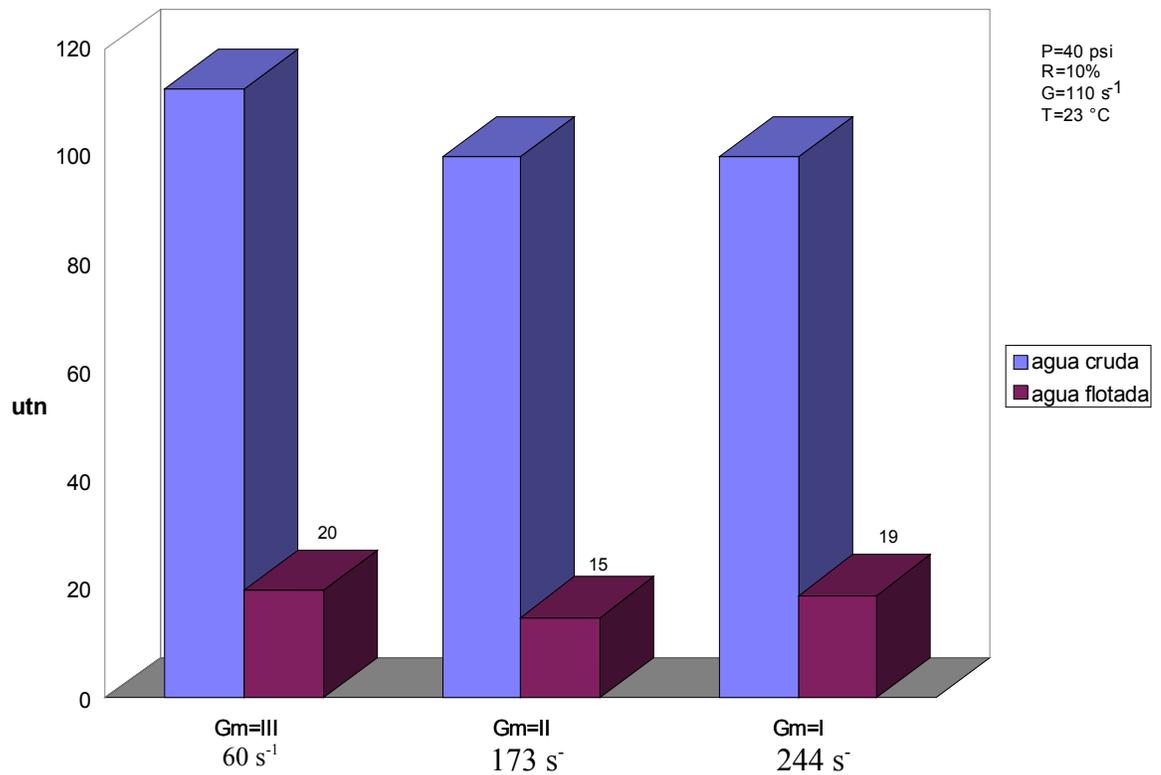


Figura 4.7 Turbidez contra gradiente de velocidad en conducción del agua floculada.

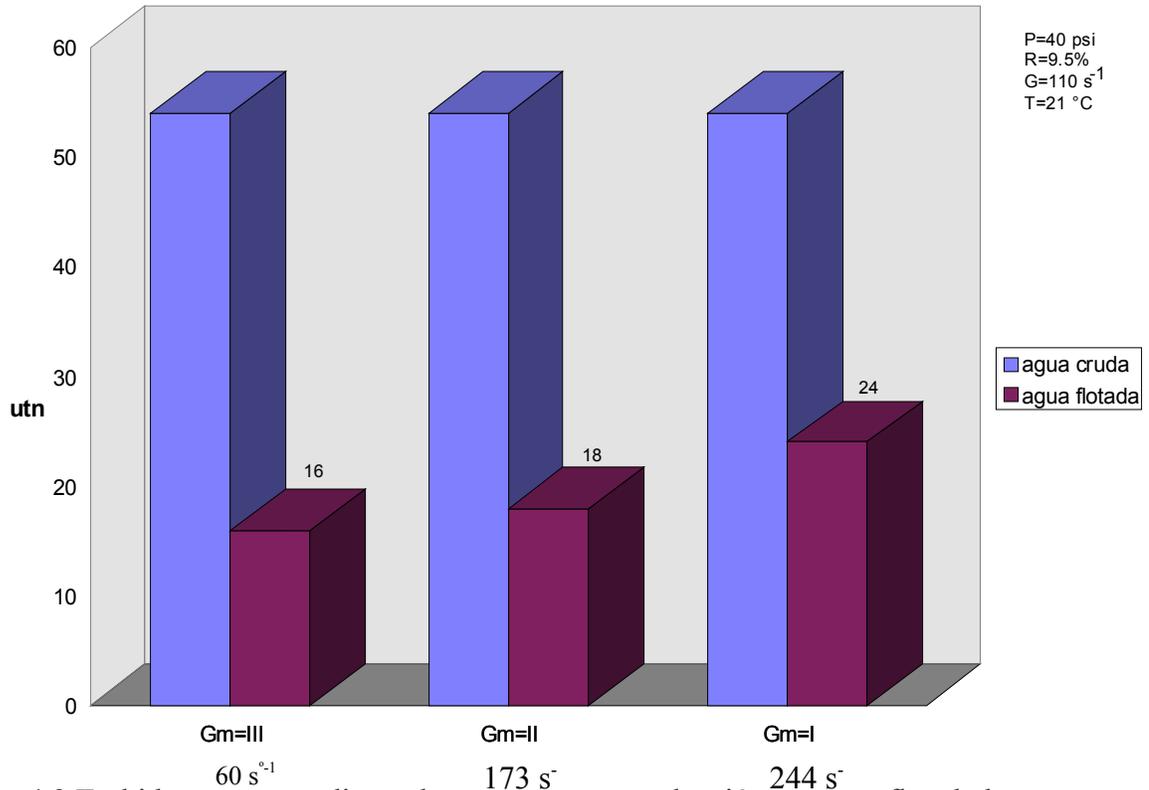


Figura 4.8 Turbidez contra gradiente de velocidad en conducción del agua flocculada.

5 Resultados y Discusión.

5.1 Resultados.

Para la clarificación del agua por flotación se detectan dos variables principales que pueden ser las limitantes de la eficiencia del proceso: floculación (agregación de las partículas coloidales en flóculos) y la remoción de flóculos.

En las aguas con poca turbiedad es más fácil que el factor limitante sea la floculación, ya que al no tener muchas partículas el agua, es más difícil flocularla. Para la remoción de los flóculos el problema no será mayor ya que no se formarán muchos (relativamente). En cambio para un agua con mucha turbiedad el factor que más fácilmente limitará la eficiencia del proceso es la remoción del flóculo, ya que se tendrán muchos más que en el agua con baja turbiedad.

El desempeño de FAD es mejor con flóculo grande, según lo muestra la experimentación realizada. Pero esta mejora sólo se aprecia cuando la cantidad de aire usado para FAD es limitante, esto es, cuando faltan burbujas de aire para atrapar flóculos. Cuando se tiene exceso de aire no se verá diferencia alguna para flotación de mucho flóculo pequeño contra poco flóculo grande, sin embargo mucho flóculo pequeño requiere una mayor cantidad de burbujas de aire para “flotarse”.

Con aguas turbias puede darse el caso de que con el aumento del tamaño del floculo (y consecuentemente su disminución en cantidad) se requiera una menor recirculación o presión de saturación para la flotación efectiva. La mejora que se pueda obtener en el desempeño de FAD se reflejará en ahorro de energía de recirculación de agua, pero va a ser a costa de “crecer” el floculo, lo que se logra con tiempos de retención en floculación mayores. Debe entonces evaluarse si preparar floculo grande para FAD es redituable.

5.2 Discusión.

Hay dos opiniones diferentes en la literatura acerca de cómo flocular el agua previo a un tratamiento con FAD. Edzwald, 1994 propone en su modelo que el principal mecanismo de contacto floculo - burbuja es la intercepción, mecanismo que se considera en filtración y que se produce cuando la burbuja y los floculos que se mueven según las líneas de corriente laminar (en la proximidad del floculo o burbuja) llegan a ponerse en contacto. Siguiendo esta idea Edzwald llega a la conclusión de que no se requieren floculos grandes para FAD.

Tambo, 1994 considera como causa principal de contacto floculo-burbuja el gradiente de velocidad, como se considera en la floculación ortocinética. Llega a la conclusión de que se requieren floculos grandes para FAD.

La investigación y experimentación realizadas hacen pensar que la discrepancia entre estas dos teorías se debe a la falta de una interpretación global del problema.

Edzwald menciona que basta con preparar floculos de “punta de aguja” (10-30 μm de diámetro) (Edzwald 1992). En la experimentación que lo llevó a este resultado Edzwald utilizó agua con turbidez de 2.9 utn. Para evaluar el efecto del tamaño del floculo, Edzwald “rompió” el floculo aplicando un gradiente de velocidad de 380 s^{-1} , con lo que produjo floculo de “punta de aguja” y al hacer la separación con flotación obtuvo buenos resultados. También Malley, 1991 llega a la misma conclusión usando agua con poca turbiedad. Comparando estas investigaciones con la realizada por el autor se puede afirmar que la cantidad de burbujas no era el factor limitante en la clarificación de esas aguas.

Cuando la turbiedad es baja y la inyección del agua de recirculación es eficiente, la cantidad de burbujas no es el factor limitante: hay más burbujas de las requeridas para “flotar” todo el floculo. Así, en algunas experimentaciones que se han realizado con aguas de baja turbiedad quizá no ha sido posible apreciar que un floculo grande hace más eficiente en el proceso de FAD debido a que se ha trabajado con exceso de aire. En los experimentos aquí presentados sí se trabajó con falta de aire y se aprecia que con floculo grande el proceso es más eficiente.

5.3 Teoría cinética de FAD

Tambo propone la siguiente ecuación en su modelo cinético:

$$\frac{dn_{f,i}}{dt} = \frac{3}{2} p\beta \left(\frac{e_o}{m} \right)^{1/2} n_a (d_a + d_f)^3 (\alpha_{f,i-1} \cdot n_{f,i-1} - \alpha_{f,i} \cdot n_{f,i}) \quad (5.0)$$

que es una forma de la ecuación para floculación ortocinética

$$(N_{ij}) = \frac{1}{6} (d_i + d_j)^3 \bar{G} n_i n_j \quad (5.0)$$

usando

$$f = \frac{pd_a^3}{6} n_a \quad (5.0)$$

$$\frac{dn_{f,i}}{dt} = K' n_a (d_a + d_f)^3 (\alpha_{f,i-1} \cdot n_{f,i-1} - \alpha_{f,i} \cdot n_{f,i}) \quad (5.0)$$

Interesa encontrar el diámetro de burbuja óptimo, por lo que se tiene que maximizar $\frac{dn}{dt}$

Evaluando en cierto tiempo t , o sea cierto valor para $(\alpha_{f,i-1} n_{f,i-1} - \alpha_{f,i} n_{f,i})$

$$\left. \frac{dn_{f,i}}{dt} \right|_t = K'' n_a (d_a + d_f)^3 \quad (5.0)$$

$$n_a = \frac{6f}{pd_a^3} \quad (5.0)$$

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_t = K''' \frac{(d_a + d_f)^3}{d_a^3} \quad (5.0)$$

si $d_a = fd_f$

$$\frac{dn}{dt} = K''' \left(1 + \frac{1}{f} \right)^3 \quad (5.0)$$

$$\frac{dn}{dt} \rightarrow \text{¥} \quad \text{cuando } f \rightarrow 0$$

$$\frac{dn}{dt} \rightarrow \text{¥} \quad \text{cuando } d_f \rightarrow \text{¥}$$

6 Nomenclatura

d_a	diámetro de burbujas
d_f	diámetro de flóculo
G	gradiente de velocidad en el floculador

Gm	número de mangueras empleadas para conducir el agua floculada hacia la celda de flotación.	
\bar{G}	gradiente medio de velocidad	
N_{ij}	frecuencia de colisiones entre partículas de diámetro d_i y d_j	
n_a	número de burbujas	
$n_{f,i}$	número de flóculos que tienen i burbujas adheridas en el tiempo t de tamaño d_f	cm^{-3}
n_i	número de partículas con diámetro d_i	
P	Presión de saturación	
R	% de recirculación	
T	Temperatura	
α	factor de eficiencia de colisión	
β	constante	
ε_o	razón media de disipación efectiva de energía	W/cm^3
μ	viscosidad	

7 Bibliografía

- (Adkins 1994) Mike F. Adkins, David I.Harris. "Dissolved air flotation pilot trials at Castor and Lac La Biche water treatment plants Alberta, Canada". Investigación llevada a cabo por Reid Crowther and Partners. #300 Atrium VII, 340 Midpark Way S.E. Calgary, Alberta, T2X 1P1 Canada. Fax:(403) 254 3333. Abril de 1994.
- (Edzwald 1994) James K. Edzwald. "Principles and applications of dissolved air flotation", Department of Civil and Engineering, University of Massachusetts, Marston Hall, Amherst, Massachusetts 01003-5205, USA. preimpresos de la conferencia "Flotation processes in water and sludge treatment", 26-28 Abril 1994, Orlando, Florida, USA.
- (Haarhoff 1994b) Johannes Haarhoff & Lucas R.J. van Vuuren. "Design parameters for dissolved air flotation in South Africa", dept. Of Civil Engineering, Rand Afrikaans University, P.O. Box 524, Auckland Park, 2006 SOUTH AFRICA. preimpresos de la conferencia "Flotation processes in water and sludge treatment", 26-28 Abril 1994, Orlando, Florida, USA.
- (Hyde 1977) R.A. Hyde, D.G. Miller, R.F. Packham, and W.N. Richards. "Water Clarification by Flotation", *Journal AWWA*, vol. 79, no. 7, 1977, p.369.
- (TAMBO 1994) Ken-ichi FUKUSHI, Norihito TAMBO y Yoshihiko MATSUI. "A kinetic model for dissolved-air flotation in water and wastewater treatment". Department of Civil Engineering, Hachinole Institute of Technology, 88-1 Ohbiraki, Myo, Hachinole 031, JAPAN. preimpresos de la conferencia "Flotation processes in water and sludge treatment", 26-28 Abril 1994, Orlando, Florida, USA.
- (Zabel 1985) Thomas Zabel. "The Advantages of Dissolved-air Flotation for Water Treatment", *Journal AWWA*, vol. 77, no.5, Mayo 1985, p. 42.
- (Zabel 1990) Thomas F. Zabel. "Flotation" en *Water Quality and Treatment*, 4a ed., McGraw-Hill, New York, 1990. (TD430.W365 1990)