

- Wastewater Treatment, Scientific and Technical Report No 1, IAWPRC, London.
- METCALF-EDDY; (1985); "Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales"; Editorial Labor; Barcelona; ISBN 84-335-6421-8.
- REICHERT, P.; (1994); "AQUASIM: Computer Program for the Identification and Simulation of Aquatic Systems"; Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG). Dübendorf; Switzerland.
- SUÁREZ, J., JÁCOME, A., GARCÍA, M<sup>a</sup> C., LLANDERROZAS, J.; (1998); "5º Informe: Asesoramiento Técnico y Científico para la Redacción de Proyectos", Convenio: Estudio de depuración de bajo coste de aguas residuales para pequeños núcleos de la provincia de A Coruña.; Diputación de A Coruña / Universidad de A Coruña / Universidad de Santiago de Compostela; pg 142.
- SUZUKI, Y., TAKAHASHI, M., HAESSLEIN, M., SEYFRIED, C.F.; (1999); "Development of Simulation Model for a Combined Activated-Sludge and Biofilm Process to Remove Nitrogen and Phosphorus"; Water Environment Research; Vol. 71, Num. 4, pag. 388-397.

## ESTUDIO EN MODELO REDUCIDO DE LOS TANQUES DE FLOCULACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES LÍQUIDOS DEL COMPLEJO MINERO-ELÉCTRICO DE "AS PONTES-ENDESA"

Suárez, J.; Jácome, A.; R. Justo, E.; Bonillo, J.J.; Vázquez, F.; Puertas, J.

### INTRODUCCIÓN

El trabajo que se presenta a continuación tenía por objeto estudiar la problemática de acumulación de sedimentos y de existencia de flujos preferenciales en los tanques de floculación de la Planta de Tratamiento de Efluentes Líquidos (TEL) que la empresa ENDESA posee en la localidad de As Pontes, Galicia. Además de su tamaño, una de las mayores de Europa con tratamiento físico-químico, la principal característica de la planta es la variación de caudal que debe tratar, comprendido entre 0.5 y 30 m<sup>3</sup>/s, que además lleva asociada variaciones importantes de cargas de contaminación, lo cual condiciona la explotación de la planta tanto en su funcionamiento hidráulico como en los rendimientos de depuración.

En el presente trabajo se van a mostrar los estudios realizados en la etapa de floculación con el fin de mejorar su funcionamiento. Esta etapa está compuesta por cuatro tanques o cubas con cuatro agitadores de velocidad variable cada uno. Cada tanque está compuesto por dos cámaras rectangulares separadas por un muro; la comunicación entre ambas se realiza por la parte inferior ya que el muro es calado a lo largo de todo lo ancho del tanque, sólo hay algunas columnas de soporte interceptando el paso de una cámara a otra. Cada cámara tiene dos agitadores, cada uno con una zona de influencia cuadrada.

La problemática detectada en los tanques de floculación se puede concretar en dos aspectos: acumulación excesiva de sedimentos en las cámaras y existencia de flujos preferenciales consecuencia de una mala entrada de los caudales a tratar a las primeras cámaras.

La problemática de acumulación de sedimentos en la cámara de floculación va asociada a tres fenómenos: características de los sólidos en suspensión, variaciones del caudal de tratamiento y mala distribución de flujos en las cámaras. Un valor medio representativo de sólidos en suspensión del agua que entra en la planta es 1000 mg/L. Si comparamos este valor con los habituales de aguas residuales urbanas se ve que es un valor medio relativamente alto. El tipo de sólidos, casi en su totalidad inorgánicos, determina que sea relativamente fácil su sedimentación. Si a esta propiedad se le añade la completa línea de tratamiento físico-químico, al final se produce una suspensión con velocidades de sedimentación muy elevadas. La acumulación de sedimentos en los diferentes canales y tanques de la planta de tratamiento sólo

se evita, o se elimina, cuando se produce un régimen hidráulico que no permite dicha sedimentación o resuspende las posibles deposiciones, o arrastra los sólidos más pesados por el fondo.

En el tanque de floculación la agitación intenta conseguir que exista contacto entre los coloides desestabilizados y los flóculos formados para aumentar el tamaño de los mismos y mejorar sus características de sedimentabilidad. La energía que se introduce en el sistema mediante palas o hélices debe ser la suficiente para evitar la sedimentación en el tanque pero no debe ser tan grande que rompa el flóculo formado. La forma de ortoedro del tanque de floculación determina que en las esquinas siempre se produzca acumulación de sedimentos, al ser zonas hidráulicamente muertas.

Cuando, después de un periodo de caudales bajos, se produce una punta importante y por los floculadores empieza a pasar el caudal máximo, los sólidos acumulados son resuspendidos produciéndose un lavado importante del tanque. Pueden ser varias decenas de toneladas de sólidos las que salen de los floculadores durante la primera parte del hidrograma de entrada. Esta carga, que genera suspensiones con elevadísimas concentraciones, pasa a los decantadores, que trabajando ya a caudal máximo, no pueden retener todos los sólidos y se acaba produciendo un efluente de mala calidad.

El caudal máximo que puede ser llevado hacia los tanques de floculación es de 15 m<sup>3</sup>/s. Este caudal se puede distribuir hacia cuatro tanques de idénticos (3.75 m<sup>3</sup>/s por unidad). La distribución del agua se realiza mediante dos canales simétricos. Las compuertas de acceso hacia los tanques de floculación desde cada canal se encuentran en los laterales de dichos canales, por lo que el agua debe sufrir un giro de 90° para entrar en las primeras cámaras de floculación. Este giro genera en el agua una tendencia a fluir hacia un lateral en la primera cámara, de forma que la distribución del agua en el tanque de floculación no es simétrica, lo que determina que haya un flujo preferencial oblicuo en el tanque. La mala distribución sobrecarga determinadas zonas produciendo velocidades relativamente elevadas que no permiten la sedimentación, mientras que otras quedan muertas permitiendo la acumulación de sedimentos. Que parte del tanque no trabaje determina una disminución de los tiempos de retención hidráulica incumpliendo las condiciones de diseño y, por lo tanto, no produciendo un flóculo adecuado en condiciones extremas.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### 1.- Características del tanque de floculación en el modelo reducido

El modelo reducido del tanque de floculación se ha construido a escala 10 según la ley de semejanza de Froude. El floculador se integra dentro de un modelo reducido construido en el Laboratorio de Ingeniería Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de La Coruña, con el apoyo del Laboratorio de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, y se le establecen las condiciones de contorno

adecuadas para que en función de los caudales reales de tratamiento se obtengan los caudales de experimentación adecuados. El modelo reducido del tanque de floculación se ha construido a escala 10 según la ley de semejanza de Froude.

La velocidad de giro de las palas también se ha adecuado a la ley de Froude: el flujo preferencial es gravitatorio y no hay absorción de aire ni efectos importantes de viscosidad ni tensión superficial (Horvath, Nestmann, 1984). En estas condiciones la escala de caudal es 10<sup>2.5</sup>, lo que supone un caudal máximo experimental de 11.86 L/s, y la de la velocidad de giro de 10<sup>-0.5</sup>, lo que supone 25.32 rpm.

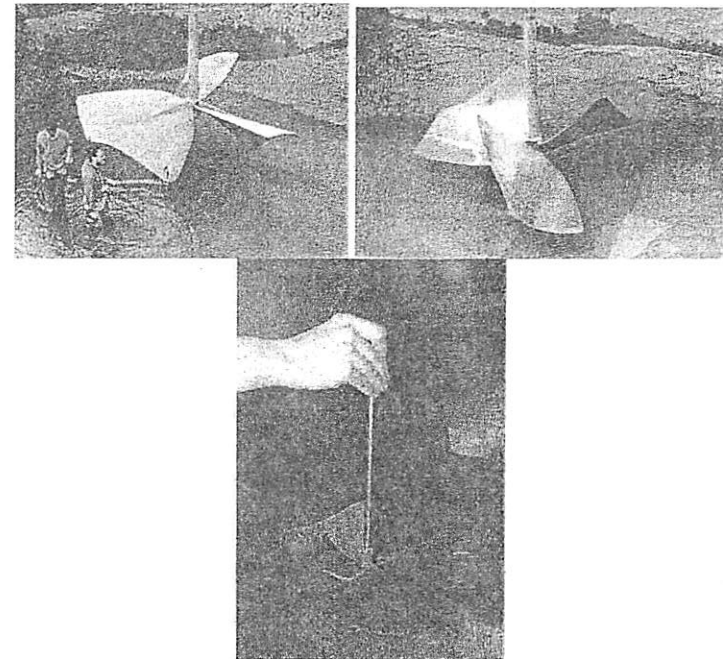


Fig. 1.- Palas de los agitadores y reproducción a escala en el modelo reducido

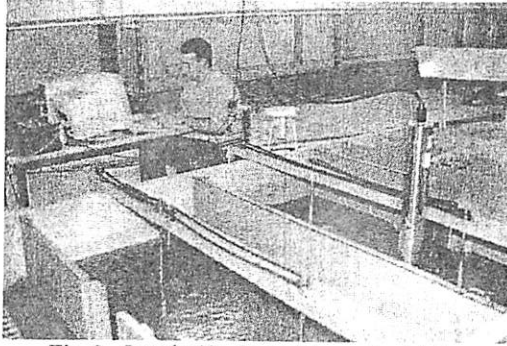


Fig. 2.- Instalación de medida y adquisición

Una vez construido el modelo reducido y hecho circular el caudal de trabajo se apreció que, desde una primera aproximación cualitativa, el modelo reproducía los principales fenómenos que se producen en la instalación real. Mediante el vertido de trazadores con color se comprobó visualmente la existencia de un flujo preferencial oblicuo. Se apreció en estos primeros ensayos que en la primera cámara la corriente superficial tenía un sentido de giro contrario al de las palas agitadoras. Este fenómeno indicó que había un comportamiento bi-capa que debía ser tenido en cuenta en el momento de caracterizar las diferentes situaciones.

### 2.- Instrumentación

La instrumentación utilizada en el estudio del comportamiento hidráulico del tanque de floculación ha sido un correntímetro de ultrasonidos que permite medir el campo de velocidades en tres dimensiones, una bomba peristáltica de velocidad variable y un conductivímetro.

### 3.- Medición de velocidades en el modelo reducido

En este caso, en el que estamos estudiando el comportamiento de un líquido que está fluyendo y que a la vez está siendo agitado, no existe un campo de velocidad con un módulo más o menos constante o con una dirección preferencial, también más o menos constante. Cada vez que una pala de un agitador impulsa una masa de agua se produce un ascenso y luego un descenso del campo de velocidades en un punto. La proximidad o alejamiento de ese punto del eje del agitador determinará que los módulos de los vectores sean más o menos grandes y que sea entonces el flujo de paso a través del floculador el que predomine y condicione el campo de velocidades.

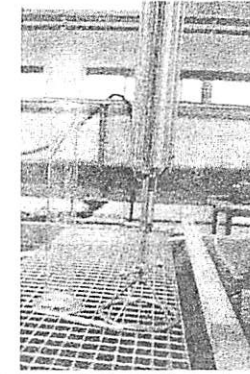


Fig. 3.- Sonda de medición tridimensional de velocidades

Las circunstancias comentadas determinaron la necesidad de estudiar en cada punto el campo de velocidades que se producía durante un tiempo lo suficientemente grande para que la influencia de varios pasos de pala quedasen registrados. Dado que la velocidad de giro era de 25.3 rpm, es decir cada 2.37 segundos se producía el paso de las tres palas, se consideró oportuno realizar la medición durante 4 segundos y tomar 8 medidas durante cada segundo. Por lo tanto el registro en cada punto fue de 32 valores de módulos de velocidades horizontales con su respectiva orientación. También se registraron las velocidades verticales pero no fueron utilizadas en los ensayos programados. La representación de los 32 puntos se realiza en un diagrama polar. Se muestra un ejemplo en la Figura 4.

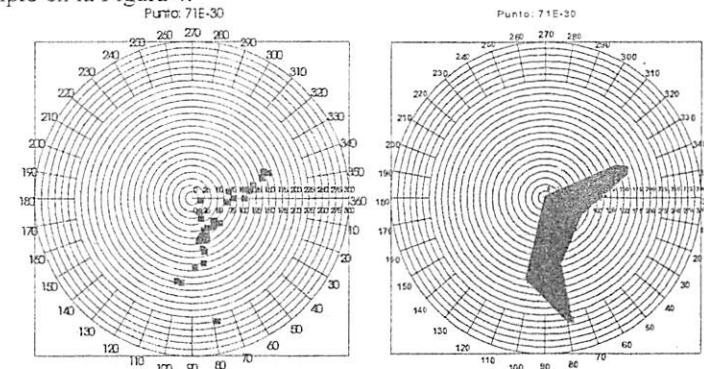


Fig. 4.- Ejemplo de representación de velocidades medidas en diagrama polar y orbital correspondiente generado

Los símbolos cuadrados representan cada uno de los vectores de velocidad medidos. Su origen es el centro del gráfico y el extremo es el cuadrado. Este tipo de gráfica se elaboró para cada uno de los puntos en que se realizó la medición del campo de velocidades. El total de puntos de medición fue de 80, 40 por cámara. Los diagramas polares de todos los puntos medidos en

cada cámara se han representado en croquis a escala mayor. En dichos croquis cada diagrama queda reducido a un tamaño en el que la interpretación de los valores y tendencias es difícil. Con el fin de mejorar la interpretación de los diagramas, y que cuando se representan de forma conjunta se pueda interpretar el fenómeno, se han elaborado lo que se ha denominado "orbitales". El concepto de "orbitales" pretende ser un área que represente la tendencia general de los vectores velocidad en cada punto. El orbital se obtiene realizando una poligonal envolvente a todos los vectores de velocidad representados en el diagrama polar. En general, cuanto mayor área tenga un orbital mayores velocidades hay en el punto y más variables son sus direcciones. En definitiva, cuanto más energía hay en el punto menos probabilidades de producirse sedimentación o acumulación de sedimentos habrá en la zona.

Para completar el estudio hidráulico en el tanque de floculación se han medido velocidades en dos capas. Esta doble medición es importante dado el fenómeno que se había detectado de circulaciones diferentes de agua en la parte superior y en la parte inferior. Midiendo en doble capa el número final de puntos que se miden en un ensayo de caracterización completo es de 160 (80x2).

#### 5.- Medición de los tiempos de retención hidráulica y de la dispersión

En general, cuando un fluido atraviesa un depósito sus distintas fracciones o elementos siguen diversos caminos a lo largo del mismo y tardan tiempos diferentes en atravesarlo. La distribución de estos tiempos de permanencia o retención en la corriente de salida se denomina distribución de los Tiempos de Retención Hidráulica del fluido (dTRH).

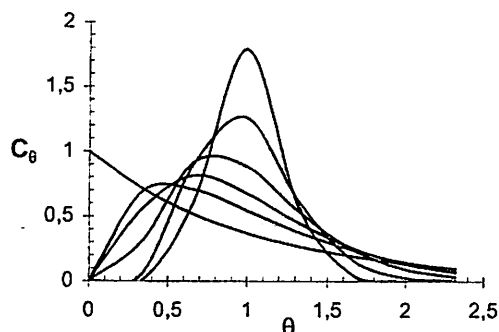


Fig. 5.- Curvas dTRH para el modelo de tanques en serie

En el tratamiento de los datos que se han obtenido en los diferentes ensayos se utilizarán la media y la varianza. La varianza es particularmente útil para comparar curvas experimentales con una curva de una familia de curvas teóricas.

Con el fin de completar la caracterización del flujo del agua a través de las cámaras de floculación se utilizó también el modelo de tanques en serie de Levenspiel (1974). En este modelo se supone que el reactor puede representarse por varios tanques de mezcla completa ideal del mismo tamaño en serie, y el único parámetro es el número de tanques. En la Figura 5 se representan diferentes curvas en las que se aprecia la influencia del parámetro N (siendo  $\theta = t/\bar{t}$  y  $C_\theta = \bar{C}/C$ ). A medida que N aumenta, la curva dTRH se va haciendo más simétrica, aproximándose a una curva normal de distribución. Si se introduce un pulso de trazador en los N tanques representados en la figura, se tiene que:

$$\Delta\sigma^2 \equiv \sigma_{sal}^2 - \sigma_{ent}^2 = \frac{\bar{t}^2}{N}$$

Como estímulo (señal o pulso de trazador) se utilizó una solución de cloruro de sodio (NaCl) disolviendo 500 g de esta sal en 1 litro de agua destilada. Esta señal se vertía sobre el afluente al floculador, siempre en el mismo punto. De esta forma se conseguía un aumento significativo de la conductividad del afluente.

La respuesta de salida se obtuvo midiendo la conductividad del agua en cada una de las secciones o puntos de control del sistema, hasta que recuperaba o se aproximaba a su valor inicial. Para la evaluación del flujo en el sistema se establecieron 6 secciones o puntos de control: Entrada, 4 secciones en la Zona Central (paso por debajo de muro central) y la Salida de la unidad. La curva de trazador en la sección de entrada se analizó porque era necesario para la aplicación del modelo de tanques en serie de Levenspiel. Los ensayos fueron repetidos con el fin de asegurar la sistemática de la dosificación y que, por lo tanto, presentase siempre la misma curva de dTRH en la entrada. Para ello se realizaron 5 ensayos de trazador mediante dosificación instantánea, obteniéndose 5 curvas de dTRH, que confirmaron la validez del método. El control a la salida era obligatorio, ya que proporcionaba información sobre la distribución del Tiempo de Retención Hidráulica de toda la unidad y, fundamentalmente, el valor del Tiempo medio de Retención Hidráulica y la dispersión.

La toma de muestras en cada una de las secciones de control se realizó isocinéticamente: a la misma velocidad que la de paso del fluido por el sistema, mediante el uso de la bomba peristáltica previamente calibrada.

#### CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO INICIAL EN EL MODELO REDUCIDO

El primer estudio que se realizó en el modelo reducido consistió en reproducir la situación real inicial que se producía en el tanque de floculación de la Planta TEL con caudal máximo. La Tabla I contiene los valores medios

del TRH y de la varianza de la dTRH en los seis puntos de control del floculador:

Tabla 1.- RESUMEN DE PARÁMETROS MATEMÁTICOS PROMEDIADOS

Estado Inicial: Zona Entrada				
Parámetro				
$t_{medio}$ (seg)	29.56			
$\sigma^2$ (seg <sup>2</sup> )	245			
Estado Inicial: Zona Central				
Parámetro	Sección A	Sección B1	Sección B2	Sección C
$t_{medio}$ (s)	94.3	79.0	84.6	90.8
$\sigma^2$ (seg <sup>2</sup> )	3624	4126	4822	4342
Estado Inicial: Zona Entrada				
Parámetro				
$t_{medio}$ (seg)	114.9			
$\sigma^2$ (seg <sup>2</sup> )	4955			

Se observa que el flujo es más lento por las secciones laterales (A y C), y que abandona la cámara más rápidamente por las secciones B1 y B2. Los valores de la dispersión nos dicen que el grueso de la masa del trazador sale por las secciones B2, C, B1 y A, en orden decreciente. A continuación se presentan las curvas experimentales de las secciones de control en las diferentes zonas:

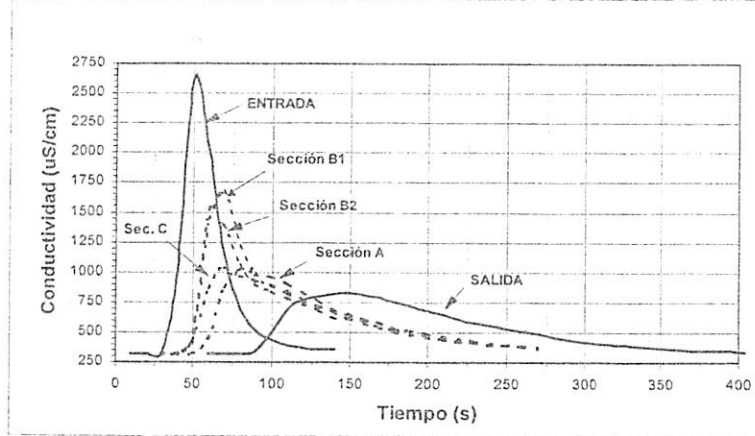


Fig.6.- Curvas de dTRH para el Estado Inicial

La gráfica anterior muestra que las formas de las curvas de respuesta del trazador muestran semejanza dos a dos. Las secciones laterales A y C tienen formas semejantes así como las del centro B1 y B2. La punta de trazador atraviesa cada sección de control en instantes diferentes, lo que indica que el caudal no se reparte homogéneamente, lo cual ya se apreciaba analizando los

valores de dispersión. Por la sección B2 aparece la punta de trazador antes que por la sección B1, y por la sección C antes que por la A, lo que deja patente el carácter asimétrico del funcionamiento del floculador. El análisis de las masas de trazador que atraviesan por cada punto indican que por las secciones B1 y B2 se va un 20% más de trazador (y por tanto de flujo) que por las secciones A y C.

Para completar el análisis del Estado Inicial se realizaron 5 ensayos estímulo-respuesta en la sección de salida del floculador. La varianza (amplitud de la dTRH), como se ve en la Tabla 1, es del mismo orden de magnitud que en la zona central del floculador, debido a que en la cámara previa a la salida el efecto de las hélices de agitación consigue una "concentración" de las líneas de flujo orientándolas hacia la salida. Cabe recordar que en la primera cámara del floculador las hélices, tal como están diseñadas, sirven para "abrir" el flujo de entrada hacia los laterales, mientras que, una vez que pasa el flujo a la siguiente cámara, las hélices de ésta, tienden a hacer converger las líneas de flujo hacia la salida. En definitiva, las hélices generan un flujo preferente a la vez que inactivan algunas zonas de la segunda cámara de la unidad de floculación. Los valores del tiempo de retención medio confirman esta conclusión, pues de un valor del orden de 90 segundos de retención en la primera cámara se pasa a 115 segundos en la unidad completa, es decir, que en la segunda cámara la retención es del orden de un 28% del tiempo en la primera cámara.

Aplicando el modelo de tanques en serie podemos estimar el parámetro de Levenspiel, N, que da un valor de 2.8 depósitos. La caracterización del campo de velocidades en el Estado Inicial se realizó midiendo velocidades en dos capas en ambas cámaras del tanque de floculación (160 orbitales). En la Figura 7 se presenta un croquis de las tendencias apreciadas en la medición de velocidades y del dibujo de los orbitales (capa superior y capa inferior) en las cámaras de floculación y se presenta la distribución del fango que se apreció cuando se vaciaron los tanques reales de la Planta TEL.

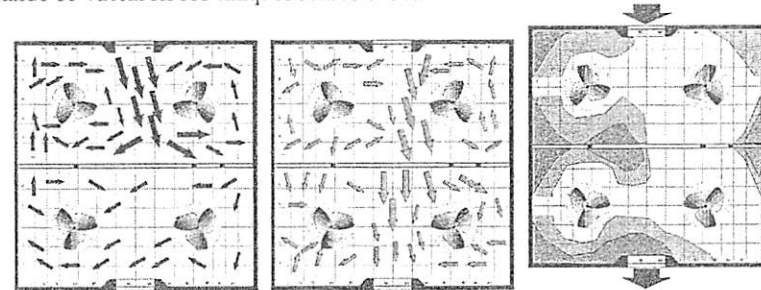


Fig. 7.- Descripción general de flujos en el tanque floculador en la capa superior y en la capa inferior, y descripción de las zonas de acumulación de fangos.

Del análisis de los orbitales se deducen los siguientes aspectos:

- El comportamiento de las capas superior e inferior es totalmente diferente tanto en una cámara como en la otra.
- Hay un flujo preferencial oblicuo claro en la entrada de la primera cámara que sobrecarga la zona izquierda (en el sentido del flujo entrante).
- Se generan dos corrientes superficiales rotatorias en sentido contrario al de giro de los agitadores.
- El efecto del flujo entrante en la capa superior es frenado por el muro.
- En la capa inferior se aprecia este flujo preferencial, inducido desde la capa superior. Este flujo inferior sí pasa a la segunda cámara y afecta a la zona izquierda de la segunda cámara.
- La zonas de la derecha de ambas cámaras reciben menos energía y sus aguas se renuevan con más lentitud. Son zonas casi muertas.
- Las zonas que se detectan con orbitales pequeños coinciden con las zonas en las que la acumulación de sedimentos es mayor.

#### REALIZACIÓN DE ENSAYOS CON MODIFICACIONES ESTRUCTURALES Y CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO MODIFICADO FINAL

Con base en la información obtenida de la caracterización del Estado Inicial se procedió a realizar cambios en la geometría del sistema. Se hicieron una serie de modificaciones en dos partes de las cámaras de floculación. La primera modificación consistió en instalar placas deflectoras a la entrada del floculador para redirigir el flujo hacia el centro (entre las palas de agitación). El objetivo era obtener un flujo simétrico que se distribuyese posteriormente de forma equilibrada hacia las dos zonas de influencia de los agitadores de la primera cámara.

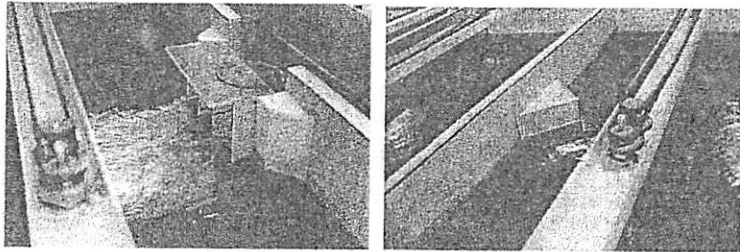


Fig. 8.- Disposición de las placas deflectoras en la entrada del tanque y del módulo deflector central

Se ensayaron diferentes posiciones de las placas con diferentes orientaciones respecto al eje de simetría del sistema. Se procedió a realizar ensayos con los ángulos siguientes: 0°, 20° y 7.5°. Al enfocar el flujo entrante de forma paralela al eje de simetría se apreció que las dos zonas de agitación de la

primera cámara comenzaban a trabajar de forma más equilibrada aunque se seguía cargando un poco más la izquierda. Al mismo tiempo se apreció que seguía existiendo un flujo preferencial que pasaba de forma directa a la segunda cámara. Con el objetivo de impedir este flujo directo se procedió a realizar la segunda modificación, consistente en colocar un módulo deflector en la primera cámara, apoyado en el muro central.

La Tabla 2 contiene los valores medios del TRH y de la varianza de la dTRH en los seis puntos de control del floculador en modelo reducido:

Tabla 2.- RESUMEN DE PARÁMETROS MATEMÁTICOS PROMEDIADOS

Estado Modificado Final: Zona Entrada				
Parámetro				
$t_{\text{medio}}$ (seg)	29.56			
$\sigma^2$ (seg <sup>2</sup> )	245			
Estado Modificado Final: Zona Central				
Parámetro	Sección A	Sección B1	Sección B2	Sección C
$t_{\text{medio}}$ (s)	72.5	68.2	78.9	79.2
$\sigma^2$ (seg <sup>2</sup> )	2669	3203	3780	2918
Estado Modificado Final: Zona Salida				
Parámetro				
$t_{\text{medio}}$ (seg)	117.1			
$\sigma^2$ (seg <sup>2</sup> )	7568			

Se observa que el flujo es más lento por las secciones laterales, A y C, y que abandona la cámara más rápidamente por las secciones B1 y B2. Se aprecia un aumento del TRH en la segunda cámara. Los resultados experimentales obtenidos en los diferentes puntos de control se presentan en la Figura 9.

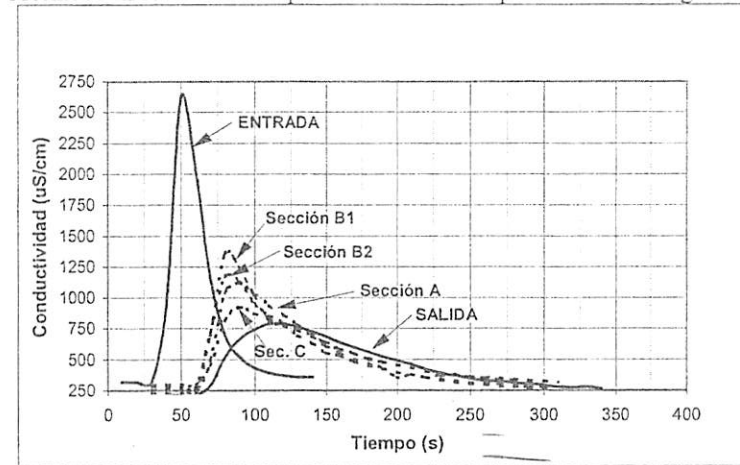


Fig.9.- Curvas de dTRH para el Estado Modificado Final.

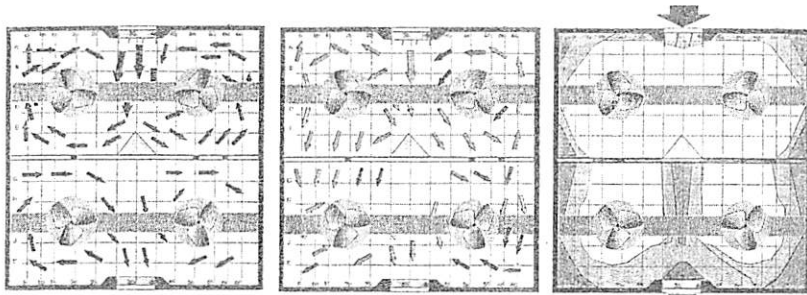


Fig. 10.- Descripción general de flujos en el tanque floculador en capa superior y en capa inferior, y descripción de las zonas de acumulación de fangos.

Como puede observarse, las curvas A, B1, B2 y C son mucho más semejantes entre sí que en el Estado Inicial. La inclinación del flujo en la sección de entrada es un factor fundamental para conseguir una buena distribución de las edades del fluido en la unidad de floculación. Sin embargo, con las lamelas a  $7.5^\circ$  y el tajamar, persiste la tendencia del flujo hacia la zona B1 aunque de forma menos pronunciada que en el Estado Inicial. El número N que se obtiene con el modelo de Levenspiel es de 1.9 depósitos.

#### CONCLUSIONES

1. La distribución de los tiempos de retención hidráulica de la unidad de floculación mejora sustancialmente si se corrige la dirección del flujo en la sección de entrada. Esta corrección debe ser del orden de  $7.5^\circ$ .
2. Los cambios geométricos introducidos producen una mejor relación entre los tiempos medios de retención de las dos cámaras de la unidad de floculación. Así, en el Estado Inicial el Tiempo medio de Retención Hidráulica en la 2ª cámara era del orden del 27% del de la 1ª cámara; mientras que en el Estado Modificado Final (placas deflectoras a  $7.5^\circ$  más módulo del deflector central) esta relación llega a alcanzar un 56%.
3. Con respecto al Estado Inicial, el grado de mezcla ha aumentado, pues ahora la unidad de floculación queda representada por 1.9 tanques en serie de mezcla ideal de igual volumen, mientras que en el Estado Inicial era de 2.8 depósitos.
4. El sentido de giro de las hélices de la 2ª cámara de la unidad, aparentemente, no mejora el grado de mezcla sino que parece concentrar las líneas de flujo hacia la salida del floculador generando una circulación preferente a la vez que deja inactivas determinadas zonas de esta cámara. Si se cambia el sentido de giro de las hélices en la 2ª cámara y se colocan deflectores podrían activarse zonas muertas ó de baja velocidad de flujo, con lo que mejoraría la distribución de TRH del flujo en la unidad global.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Horvath, Nestmann; (1984); "Application of similitude in activated sludge treatment"; in Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures; Esslinger (H. Kobus, Ed.).
- Levenspiel, O.; (1974); "Ingeniería de las Reacciones Químicas"; Ed. Reverté, Barcelona.
- Metcalf and Eddy; (1995); "Ingeniería de aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización"; Ed. McGraw-Hill; Tercera edición; 1485 págs., ISBN 84-481-1607-0.
- Pérez, J.; (1992); "Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención"; Serie: Filtración Rápida; Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente; Lima.