

MODELO MATEMÁTICO BIDIMENSIONAL PARA EL ESTUDIO DEL FLUJO DE AGUA A TRAVÉS DE UN DECANTADOR RECTANGULAR CON LAMELAS

Vicent Espert¹, Manuel García², Heliodoro Sancho², Amparo López¹

¹ Unidad Docente Mecánica de Fluidos.
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
Universidad Politécnica de Valencia.

² Aguas de Valencia, S.A.

RESUMEN: El presente artículo describe un modelo matemático bidimensional elaborado para el estudio del flujo de agua en el interior de un decantador rectangular con lamelas. Este modelo matemático integra la ecuación de Laplace por el método de los elementos finitos, obteniéndose el campo de valores de la función potencial en el interior del decantador, del cual se deducen las componentes de velocidad en todos los puntos de estudio. Este modelo matemático se ha utilizado para estudiar el flujo en el interior de un decantador destinado a la potabilización de agua, que la empresa Aguas de Valencia, S.A. está desarrollando de cara a su construcción en futuras instalaciones. A partir de diferentes diseños básicos sugeridos por dicha empresa, se pretende estudiar el efecto de recirculación forzada del agua de entrada originado por un agitador instalado en la zona de floculación. Además, en la zona de decantación se busca que el flujo ascensional se distribuya lo más uniformemente posible en toda la zona de lamelas, a fin de conseguir un mayor aprovechamiento de éstas y por tanto, un mejor rendimiento del decantador. Para ello se ha estudiado el tipo de dispositivo de recogida del agua decantada a instalar, así como su distribución sobre la superficie del decantador, resultando como más favorable la instalación de tres canaletas almenadas que forman vertederos rectangulares en la superficie libre del agua en la zona de decantación, y un vertedero transversal al final de dicha zona..

INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua de origen superficial para consumo urbano requiere, antes de su inyección a la red de distribución, de un proceso de potabilización con objeto de eliminar de la misma todas aquellas sustancias que se puedan considerar como contaminantes: sólidos flotantes, materia sólida en suspensión, organismos patógenos, olores o sabores desagradables, compuestos químicos potencialmente peligrosos, etc. A la salida de estos procesos de potabilización, el agua tratada deberá

cumplir una serie de condiciones que vienen recogidas en la normativa sobre calidad del agua de consumo público.

En el tratamiento de potabilización de las aguas superficiales se siguen una serie de procesos físico-químicos que podemos resumir en:

- **Pretratamientos.** Su objetivo es realizar un primer desbaste de las partículas de mayor tamaño presentes en el agua mediante la utilización de rejillas y/o tamices

Artículo recibido el **11 de diciembre 1995** y aceptado para su publicación el **5 de julio de 1996**. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

de diferentes secciones de paso, así como un desarenado por sedimentación.

- **Clarificación.** Tiene por objeto la eliminación de materia sólida en suspensión en el agua, y consta de las etapas de coagulación-floculación, decantación y filtración.

- **Desinfección.** Se dirige a asegurar la no contaminación bacteriológica del agua desde su entrada a la red de distribución hasta el consumo último por el abonado. El producto desinfectante más utilizado es el cloro.

- **Tratamientos específicos.** Dependiendo de los casos, se somete además al agua a otros tratamientos para eliminación de olores y sabores desagradables, ablandamiento, intercambio iónico para eliminar sustancias disueltas, etc.

Con relación al proceso de clarificación, que es el que ahora nos interesa, la materia orgánica e inorgánica en suspensión (bacterias, partículas sólidas en estado coloidal, etc), debido en unos casos a su baja densidad y en otros a su tamaño (diámetro menor de 0'001 mm), necesitarían desde varios días hasta miles de años en sedimentar de forma natural. Por ello, y a fin de acelerar el proceso de decantación, se suele añadir al agua a tratar un compuesto químico que normalmente se trata de una sal de aluminio o hierro, llamado coagulante, cuya función consiste en neutralizar la carga eléctrica exterior (negativa) de la partícula coloidal. De esta manera se consigue evitar la repulsión entre dichas partículas y se favorece su agrupamiento en partículas de mayor tamaño. Para conseguir una dispersión homogénea del coagulante dentro de la masa de agua a tratar, su dosificación se realiza en un punto donde exista elevada turbulencia.

La aglomeración posterior de los coloides descargados para formar partículas de mayor tamaño es el objeto de la floculación. Se consigue mediante la dosificación de agentes floculantes, como pueden ser la sílice activada o polímeros orgánicos de elevado peso molecular. Esta etapa de aglomeración suele conseguirse en las unidades de sedimentación mediante una agitación mecánica lenta.

La decantación es el proceso de separación, por acción de la gravedad, de los flocules presentes en el agua. Cuando la concentración de las partículas en suspensión es moderada, el floculo disperso sedimenta como si estuviese solo, pero la velocidad de sedimentación aumenta a medida que su tamaño crece, como

consecuencia de su encuentro con partículas más finas; se trata de la sedimentación difusa. En otro caso, cuando la concentración es elevada, la abundancia de floculos da lugar a una sedimentación frenada del conjunto, caracterizada por una superficie de separación netamente definida entre el volumen de fangos y el líquido sobrenadante; se trata de una sedimentación en bloque o en pistón.

Normalmente, tanto la floculación como la decantación se realizan en la misma unidad de tratamiento: el decantador. Por ello, en todo decantador se pueden diferenciar dos zonas: una primera zona donde tiene lugar la floculación del agua coagulada, y una segunda zona donde se produce la decantación o sedimentación de los floculos ya formados.

Atendiendo a la interacción entre el fango formado y el agua bruta de entrada al decantador, éstos se pueden clasificar en: estáticos, cuando no se produce tal interacción; de contacto de fangos, cuando se pone en contacto el agua de entrada con una parte de los fangos previamente formados; y de lecho de fangos, cuando se hace pasar intermitentemente el agua de entrada por el lecho de fangos.

Por otra parte, atendiendo a la forma geométrica de los decantadores, éstos pueden ser de tres tipos: rectangulares, en los cuales el flujo discurre a lo largo del eje longitudinal de los mismos; circulares, en los que la entrada del agua suele ser por la zona central y la salida del agua decantada por la periferia; y cuadrados, cuando la forma del terreno disponible así lo aconseja. En unos y otros casos, la recogida del agua decantada suele ser por medio de vertederos de caída libre que descargan hacia canales colectores, mientras que la retirada de los fangos sedimentados se realiza por medio de rasquetas de movimiento lineal o circular (en el fondo del decantador), que conducen estos fangos hacia una poceta de donde son extraídos de forma intermitente o continua. Existe también la posibilidad de extraer los fangos por succión, haciendo uso de unos dispositivos de aspiración que acompañan en su movimiento a las rasquetas.

En algunos casos se disponen por encima del lecho de fangos, y hasta una cierta profundidad dentro del agua decantada, unos módulos laminares (o lamelas) formados por placas o tubos inclinados unos 60° respecto a la horizontal y en el sentido de la corriente. De esta manera se reduce la distancia recorrida por la partícula hasta depositarse en las paredes de las lamelas, consiguiéndose velocidades aparentes en la zona de decantación muy superiores a las que se obtendrían de no existir tales dispositivos, con el consiguiente ahorro de espacio y costes.

CRITERIOS DE DISEÑO DE LOS DECANTADORES

En el diseño de los decantadores se requiere conocer la superficie de la zona de decantación, la cual se calcula atendiendo a los dos criterios siguientes (Degrémont, 1979): la carga de superficie C_s , en m^3 de agua tratada por m^2 de superficie de decantador y día (m^3/m^2-d), y la carga de materias C_m , en Kg de materia en suspensión a eliminar por m^2 de superficie de decantador y día (Kg/m^2d). La carga de superficie depende de la velocidad de sedimentación de las partículas floculadas dispersas, mientras que la carga de materias está relacionada con la concentración de entrada de la materia a eliminar. La superficie del decantador será, lógicamente, la mayor de las obtenidas según estos dos criterios.

Para el caso de decantadores utilizados en la potabilización de aguas superficiales, y debido a que la concentración de sustancias a eliminar por el proceso de coagulación, floculación y decantación es mucho menor que en el caso de aguas residuales, el criterio que prevalece de entre los mencionados es el de la carga de superficie. Otros criterios que se suelen utilizar son los relacionados con la carga sobre vertedero C_v en m^3 de agua tratada por m lineal de vertedero y día ($m^3/m-d$), y el tiempo de permanencia del agua dentro de la zona de decantación T.

Tabla 1. Valores típicos de los parámetros de diseño de decantadores para potabilización de agua.

TIPO DE DECANTADOR	C_s (m^3/m^2-d)	C_v (m^3/md)	T (h)
Decantador convencional	20-33	250	2-8
Decantador de flujo vertical	55	175	2
Decantador con lamelas inclinadas	90-180	250-500	0'20

En la Tabla 1 aparecen valores típicos de los parámetros de diseño de decantadores para potabilización de agua, con procesos de coagulación y floculación (McGhee, 1991 y Sanks, 1978). En decantadores con lamelas inclinadas se recomienda el ensayo del funcionamiento de las lamelas en plantas piloto antes del dimensionado y construcción del decantador.

Con el fin de conseguir un funcionamiento adecuado del decantador, se hace necesario prestar especial atención a la forma y distribución de los dispositivos de recogida del agua decantada. Para el caso general, el sistema de extracción del agua es un vertedero transversal en la zona de decantación, situado en la pared opuesta a la entrada del agua a esta zona. Además, cuando se instalan lamelas, se recomienda distribuir adecuadamente diversas canaletas transversales de recogida en la parte superior de la zona ocupada por las lamelas, a fin de que el flujo a través de las mismas sea lo más uniforme posible. A su vez, habrá que evitar en todos los casos el establecimiento de corrientes preferentes que dificulten el buen funcionamiento del decantador.

Estas últimas consideraciones llevan aparejada la necesidad de estudiar el flujo de agua que se establece en el interior de la zona de decantación, cuando se modifican las características geométricas o la disposición relativa de los sistemas de recogida del agua decantada. En este sentido, la utilización de modelos matemáticos presta una inestimable colaboración, con un costo muchísimo menor que el caso de utilizar modelos físicos a escala reducida.

CARACTERÍSTICAS DEL DECANTADOR ESTUDIADO

La empresa Aguas de Valencia, S.A. está desarrollando un decantador rectangular con lamelas de cara a su construcción en futuras instalaciones de potabilización de agua. En este sentido, y en base a las consideraciones efectuadas al final del apartado anterior, la U.D. Mecánica de Fluidos del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia ha elaborado y puesto a punto un modelo matemático que permita estudiar el flujo de agua a través del decantador diseñado, y por medio del cual se puedan determinar las condiciones que deberán tener los sistemas de entrada y salida del agua que consigan el mejor rendimiento del decantador.

Las dimensiones globales del decantador estudiado son 23'10 m de largo por 10'00 m de ancho, con una profundidad de agua de 4'30 m y un caudal de diseño de 400 l/s. Este decantador consta, en esencia, de las siguientes partes:

- a) *Zona de entrada o cámara de floculación*, de longitud 5'50 m, alimentada por su parte inferior central por medio de un conducto circular de diámetro 0'70 m. Al agua de entrada se le habrán añadido previamente los

coagulantes y floculantes correspondientes. Se va a disponer una pantalla circular, de 3 m de diámetro, alineada con el conducto de llegada y elevada una cierta altura sobre la base del decantador, y cuyo extremo superior estará por debajo de la superficie libre del agua.

- b) *Zona intermedia*, con diferentes pasos, donde se uniformizará el flujo del agua.
- c) *Zona de decantación*, de longitud 11'85 m, donde se producirá la decantación de los flóculos y de la que se extraerá por su parte superior el agua tratada. Esta zona será de fondo plano, extrayéndose los fangos decantados por medio de un sistema de aspiradores que corre longitudinalmente sobre carriles a lo largo de dicho fondo. En la zona de decantación se dispondrán módulos de lamelas, a una cierta profundidad, inclinados 60° en el sentido de la corriente.

A la entrada al decantador se pretende conseguir un efecto de recirculación interna del agua que llega a la zona de floculación; para ello se ha dispuesto una pantalla circular, de manera que una parte del caudal que circula por dentro de la zona delimitada por dicha pantalla vuelva a entrar a la misma por su parte inferior. Esta recirculación permitirá poner en contacto los flóculos de pequeño tamaño que entran, con los flóculos de mayor tamaño ya existentes, con el consiguiente engrasamiento de estos últimos y su mayor capacidad de sedimentación en la zona de decantación. Una parte del estudio desarrollado se dirige a determinar el efecto de recirculación forzada que se obtiene disponiendo un agitador en el interior de la pantalla circular. Además, se ha estudiado el efecto de diferentes velocidades de rotación del agitador, determinando la velocidad de rotación mínima que provoque recirculaciones apreciables.

Para la recogida del agua tratada se han considerado las siguientes alternativas:

- Disposición de un vertedero rectangular a lo largo de la pared transversal en el extremo final de la zona de decantación.
- Combinación del vertedero rectangular en el extremo final con canaletas transversales en la parte superior de la zona de decantación.

En la zona de decantación se busca que el flujo ascienda

lo más uniformemente posible por los distintos pasos entre lamelas hasta alcanzar el dispositivo de recogida correspondiente. A su vez, para conseguir que las lamelas ejerzan el efecto deseado sobre la decantación de los flóculos, la velocidad ascensional aparente en el espacio entre las mismas deberá ser como máximo del orden de 0'30 mm/s, lo cual corresponde a un valor real de la componente vertical de velocidad del orden de 3'50 mm/s. Después de ensayar diferentes configuraciones, el diseño básico propuesto es el que se esquematiza en la Figura 1.

MODELO MATEMÁTICO ELABORADO

Fundamentos

Para el estudio del flujo de agua en el interior del decantador se ha elaborado un modelo matemático bidimensional que proporciona el campo de velocidades en el interior del espacio de trabajo, del cual se puede deducir, entre otros, las líneas de corriente y los tiempos de residencia del agua en la zona de decantación.

El modelo matemático elaborado determina el campo de velocidades en régimen permanente resolviendo la función potencial de flujo, en un plano bidimensional, por el método de los elementos finitos. El espacio de estudio será en este caso un plano vertical que contiene al eje longitudinal del decantador. En realidad, el flujo del agua a lo largo del decantador será tridimensional en la zona de entrada, e irá pasando a bidimensional en la parte intermedia debido al efecto de uniformización que se consigue por medio del vertedero de entrada a la zona de decantación. Finalmente, en esta última zona se puede aceptar que el flujo es bidimensional.

Sin embargo, el estudio que se ha llevado a cabo es bidimensional, por la notable simplificación que reporta este tipo de modelo frente al tridimensional. Así, en los casos procesados se supone que la entrada del agua se efectúa por medio de un conducto de sección rectangular de lado menor igual al diámetro de la tubería real de entrada, y cuya anchura transversal será igual a la del decantador. De la misma manera se procede con la pantalla circular, transformándola en dos pantallas iguales y paralelas dispuestas a todo lo ancho de la zona de entrada. Ello dará como resultado un flujo bidimensional a lo largo del decantador, estudiándose el flujo en el plano vertical que contiene al eje longitudinal del mismo, ya que según estas hipótesis simplificadoras el flujo en cualquier otro plano paralelo al anterior sería exactamente igual al considerado.

Para simular con cierta aproximación las condiciones reales de funcionamiento del decantador, en los casos

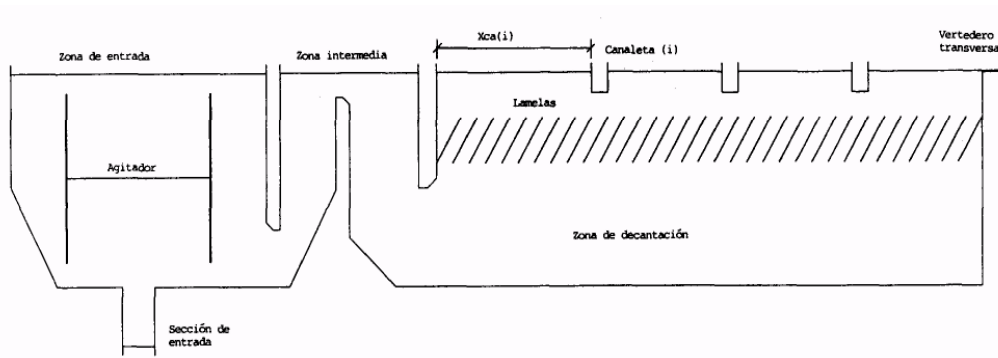


Figura 1. Diseño básico del decantador rectangular con lamelas, agitador y canaletas.

procesados se tiene en cuenta unas veces el caudal de diseño del mismo, y otras veces el caudal de cálculo es el necesario para que la velocidad del agua por la sección rectangular del conducto de entrada al modelo sea igual a la que se establece en la tubería real con el caudal de diseño. Así, mediante el primer supuesto se estudia el flujo en la zona de decantación, mientras que mediante el segundo se hace lo propio con la zona de entrada.

El modelo matemático

Para la elaboración del modelo matemático bidimensional en régimen permanente se hace uso de la hipótesis de que existe una función potencial $\Phi(x,y)$ en el plano de estudio, la cual permite deducir el campo de velocidades del flujo en el mismo. Las componentes de velocidad (u,v) en el punto de coordenadas (x,y) se evalúan como:

$$u = -\frac{\partial\Phi}{\partial x} ; v = -\frac{\partial\Phi}{\partial y} \quad (1)$$

Por otra parte, la ecuación de continuidad establece que:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

y sustituyendo (1) en (2) obtendremos:

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

siendo esta última ecuación diferencial, denominada ecuación de Laplace, la que se resuelve por el método de los elementos finitos en el plano de trabajo considerado anteriormente.

Para la elaboración del modelo matemático se han tenido

en cuenta las siguientes hipótesis simplificadoras:

- El flujo en el interior del decantador se comporta como un flujo bidimensional plano.
- La existencia de flóculos ya formados en el interior del flujo de agua no condiciona el movimiento de ésta, pudiéndose por tanto aplicar la ecuación de Laplace (3) sin modificaciones.
- No se tiene en cuenta la existencia de un manto de fangos en el fondo de la zona de decantación. Se supone que el sistema de extracción de fangos funciona en continuo, por lo que el manto formado no alcanzará en ningún momento un espesor considerable.
- No se ha considerado el efecto perturbador del flujo debido al funcionamiento del sistema de extracción de fangos.
- Existen en el plano de estudio contornos de entrada y de salida. En uno cualquiera de estos contornos se impondrá un valor de referencia de la función potencial; en los otros se fijará la velocidad de entrada o salida del agua, lo cual permite definir las variaciones de la función potencial en tales contornos.
- En los contornos sólidos del decantador, así como en el nivel libre del agua, el flujo no tiene componente de velocidad normal a los mismos.
- Para la aplicación del método de los elementos finitos, el espacio de estudio se divide en cuadriláteros con cuatro nodos que coinciden con sus vértices, y en los cuales se calcula el valor de la función potencial. Todo el espacio de estudio queda dividido, sin solapes, en elementos de este tipo.

- Una vez conocido el valor de la función potencial en cada nodo de estudio, su variación en las direcciones X e Y, necesaria para determinar el campo de velocidades, se evalúa aplicando funciones de interpolación del tipo de splines en el espacio bidimensional.

El programa informático elaborado, denominado FLUXDECA, que resuelve la ecuación de Laplace por el método de los elementos finitos, ha sido escrito en lenguaje FORTRAN e implementado en el ordenador ALLIANT del Centro de Cálculo de la Universidad Politécnica de Valencia. A partir de datos tales como la geometría del decantador, el caudal de entrada y en su caso el caudal trasegado por el agitador, este programa lleva a cabo la división del espacio de estudio en elementos finitos y evalúa la función potencial y el campo de velocidades en el interior del decantador.

Se ha elaborado a su vez un segundo programa informático denominado GRAFDECA, escrito en lenguaje TURBOBASIC e implementado en ordenador PC-486 de la U.D. Mecánica de Fluidos, cuya misión principal es la representación gráfica de los campos de velocidad y líneas de corriente a partir de los resultados obtenidos con el programa anterior. Para llevar a cabo la representación gráfica se ha utilizado el Plotter HPDraftMaster I existente en la U.D. Mecánica de Fluidos.

CASOS PROCESADOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Funcionamiento del agitador en la pantalla circular de entrada

Como ya se ha comentado anteriormente, para conseguir el efecto de recirculación del agua de entrada alrededor de la pantalla circular se instalará un agitador en el interior de dicha pantalla. La recirculación conseguida con el agitador será forzada, la cual deberá dominar claramente sobre la recirculación natural que el modelo de flujo potencial utilizado no va a poder predecir. En definitiva, lo que se pretende conseguir es un efecto de recirculación mayor que el que se pueda establecer con el movimiento natural del agua.

Las características del agitador a instalar son las siguientes:

- Diámetro: 2'70 m.
- Velocidad de rotación: variable entre 2'90 y 14'36 rpm.
- Caudal máximo impulsado por la hélice: 10.097 m³/h, correspondiente al número máximo de revoluciones del agitador.

Para simular el funcionamiento del agitador se supone que éste se dispone en un plano horizontal en la sección media de la pantalla circular de entrada,

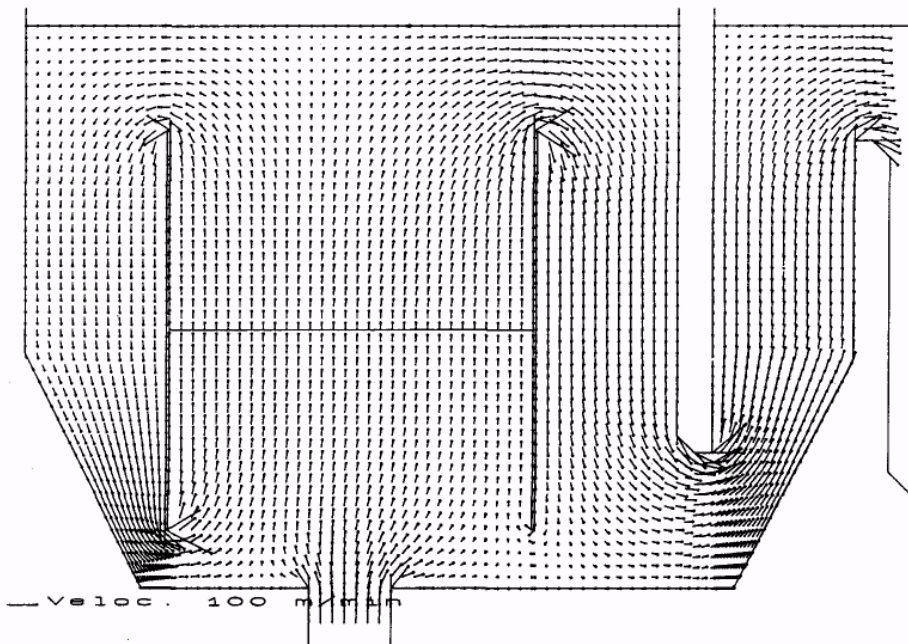


Figura 2 Vectores velocidad en la zona de entrada, para velocidad de rotación del agitador de 14'36 rpm.

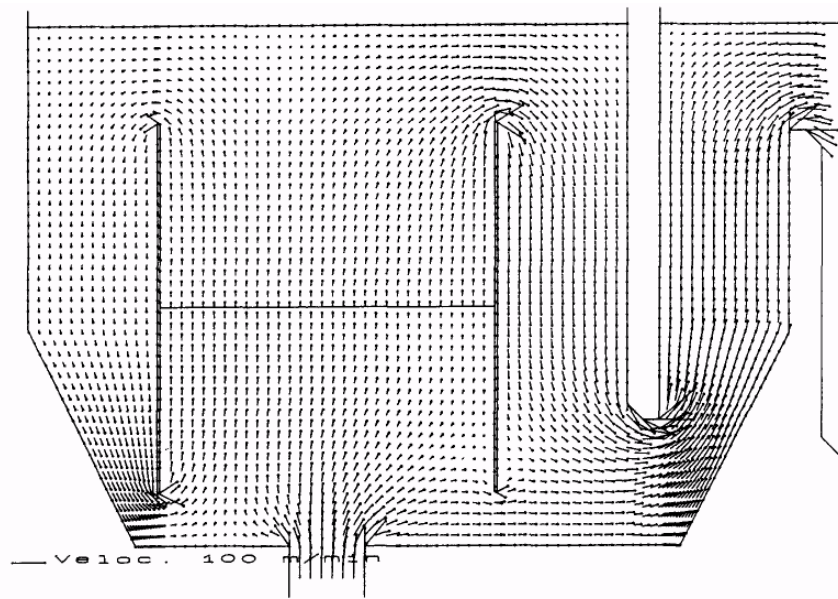


Figura 3 Vectores velocidad en la zona de entrada, para velocidad de rotación del agitador de 8'63 rpm.

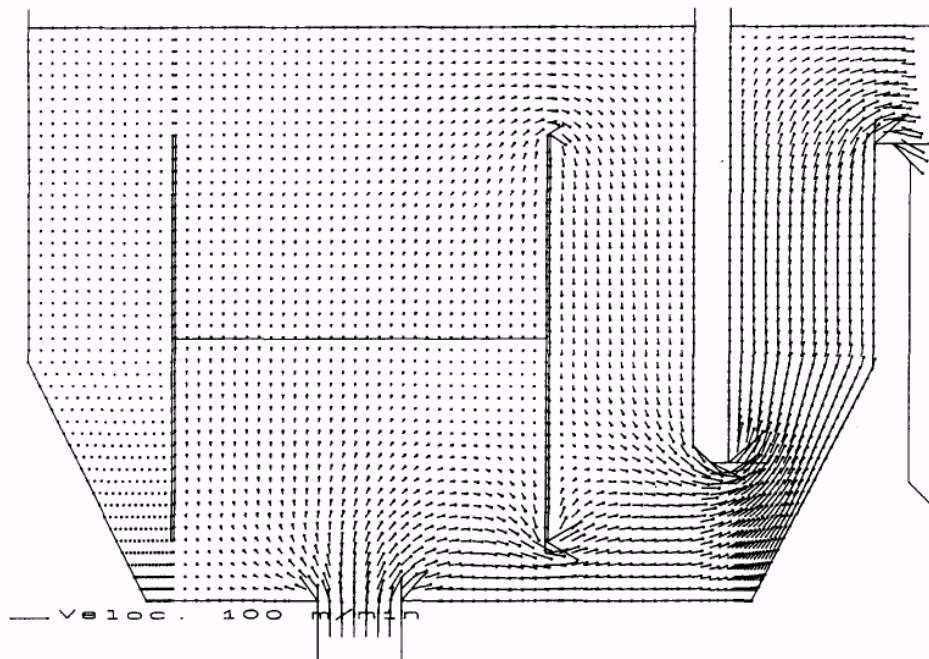


Figura 4. Vectores velocidad en la zona de entrada, para velocidad de rotación del agitador de 2'90 rpm.

ocupando toda la sección transversal en el interior de la misma. Se supone además que el agitador produce, en sus secciones de entrada y salida, velocidades uniformes y con componente únicamente vertical. El caudal de cálculo asignado al agitador para cada caso procesado será aquel que produzca la velocidad real deseada,

teniendo en cuenta que el modelo elaborado es bidimensional.

Con objeto de determinar el efecto de recirculación creado por el agitador se han procesado cinco casos, correspondientes a cinco velocidades de rotación

igualmente distribuidas entre los valores máximo y mínimo. En todos estos casos, el caudal de entrada al decantador es el que reproduce en el modelo bidimensional la velocidad real del agua por el conducto de alimentación.

En las Figuras 2 a 4 se presentan los vectores velocidad en la zona de entrada para los casos de velocidad de rotación máxima, media y mínima. Se puede observar la recirculación forzada del agua alrededor de la pantalla circular de entrada, y cómo este efecto va disminuyendo conforme la velocidad de rotación del agitador va siendo menor. Aunque el modelo de cálculo utilizado es bidimensional y no reproduce correctamente el flujo de agua en la zona de entrada, en realidad esta recirculación forzada se podrá conseguir a lo largo de toda la superficie lateral de la pantalla de una manera similar a la observada en las figuras anteriores.

En definitiva, se puede decir que con una velocidad de rotación del agitador entre el valor máximo y el medio (concretamente, entre 14'36 y 8'63 rpm), la recirculación que se establece parece a priori suficiente para los propósitos que se desean. Se estima que no sería conveniente trabajar a velocidades de rotación más bajas de 8'63 rpm.

Flujo en la zona de decantación con vertedero transversal único

Con el modelo elaborado se ha simulado, además, el flujo en la zona de decantación, cuando la extracción del agua decantada se realiza por medio de un

vertedero transversal único al final de la zona de decantación. Una vez superada la zona intermedia, el flujo bidimensional calculado en la zona de decantación responderá con suficiente aproximación a las condiciones reales de funcionamiento. Para llevar a cabo esta simulación se ha utilizado el caudal de diseño del decantador como caudal de entrada.

En la Figura 5 se representan los vectores velocidad en el módulo de entrada a la zona de decantación, de longitud 3'50 m. Se puede observar cómo se establece una corriente preferente, en dirección diagonal, desde la parte superior izquierda hasta la parte inferior derecha por donde entra el agua a la zona de decantación. Ello sugirió acortar la longitud de este módulo hasta 1'50 m, pues el valor inicial que se le había dado en el diseño resultaba excesivo. Con ello se evitan estas corrientes preferentes y se consigue un mejor arrastre de los flóculos que puedan sedimentar en dicho módulo. Además, de esta manera se acorta la longitud total del decantador.

En la Figura 6 se representan los vectores velocidad en la zona de decantación, y en la Figura 7 las líneas de corriente de las partículas que entran a dicha zona. A su vez, en la Tabla 2 se indica el tiempo de permanencia de estas partículas en la zona de decantación. Se puede observar cómo el flujo a través de la zona ocupada por las lamelas se establece al principio y al final de la misma, circulando el agua de una manera uniforme por la parte superior e inferior de esta zona. Se puede afirmar, pues, que una buena parte de las lamelas no ejercen ningún tipo de mejora sobre la velocidad de sedimentación de los flóculos, al estar

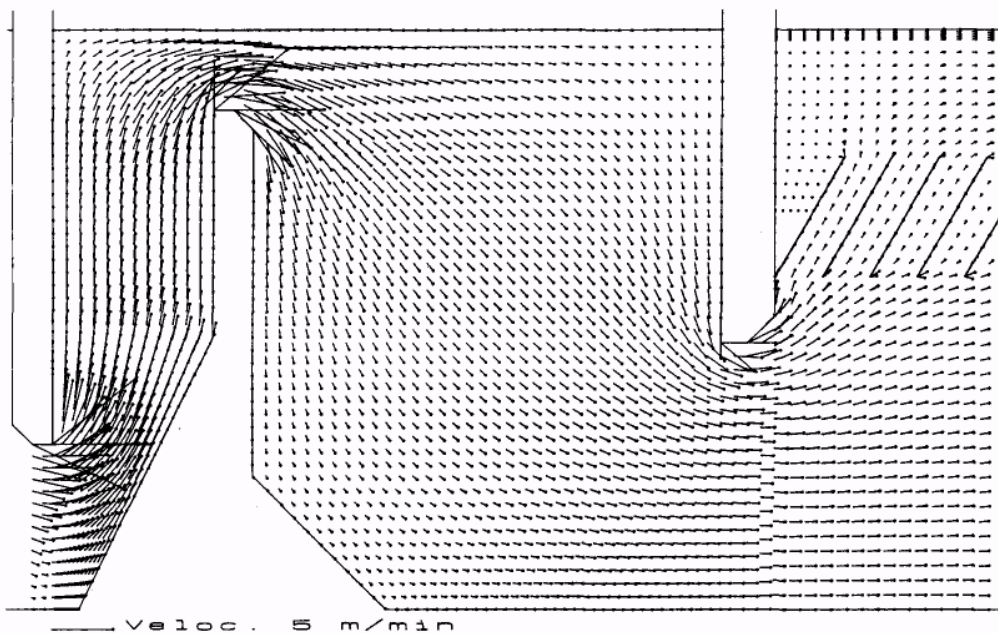


Figura 5. Vectores velocidad en el módulo de entrada a la zona de decantación.

en ellas el agua prácticamente en reposo. Se justifica, así, la necesidad de disponer de canaletas transversales de recogida de agua decantada en la parte superior de la zona de decantación.

Por otra parte, la instalación de canaletas transversales sobre la zona de decantación tiene por objeto, además de recoger el agua decantada, conseguir que el flujo ascensional en esta zona sea lo más uniforme posible, con lo que se obtendría el máximo rendimiento del

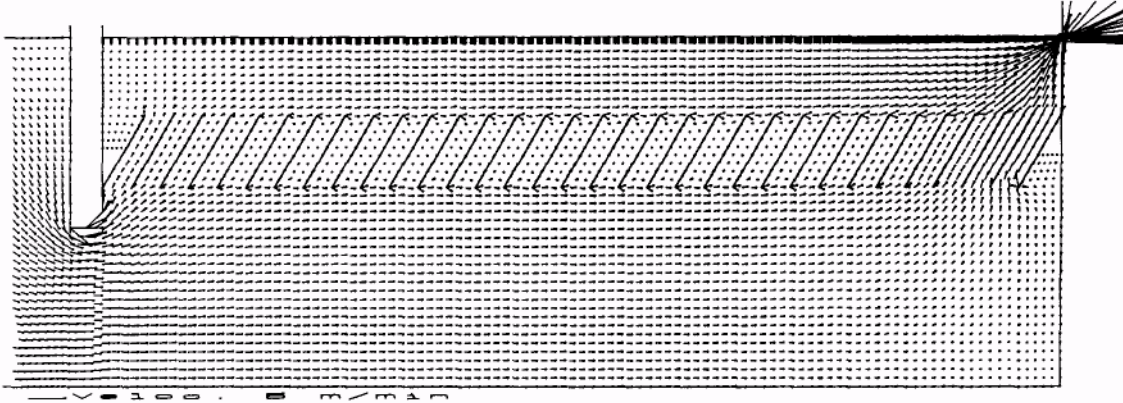


Figura 6. Vectores velocidad en la zona de decantación, sin canaletas de recogida.

Tabla 2. Líneas de comente y tiempos de permanencia en la zona de decantación para la Figura 4.

L.C.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T(min)	31'9	24'3	20'7	18'9	17'9	17'7	18'2	19'1	19'0	18'7

Disposición de canaletas de recogida en la zona de decantación

A la vista de los resultados obtenidos en el caso anterior se decidió instalar tres canaletas transversales de tipo almenado, formando vertederos rectangulares a lo largo de las dos paredes verticales que forman la sección recta de cada una de ellas. La disposición de estas canaletas se puede observar en la Figura 1.

decantador. Esto último sería consecuencia del aprovechamiento máximo de las lamelas.

Para procesar este caso, el caudal de entrada al decantador será el de diseño, esto es, 400 l/s. Como supuesto de cálculo se admite que el caudal de salida del agua decantada se distribuye a partes iguales entre cada una de las paredes laterales de las canaletas y el vertedero transversal al final de la zona de decantación.

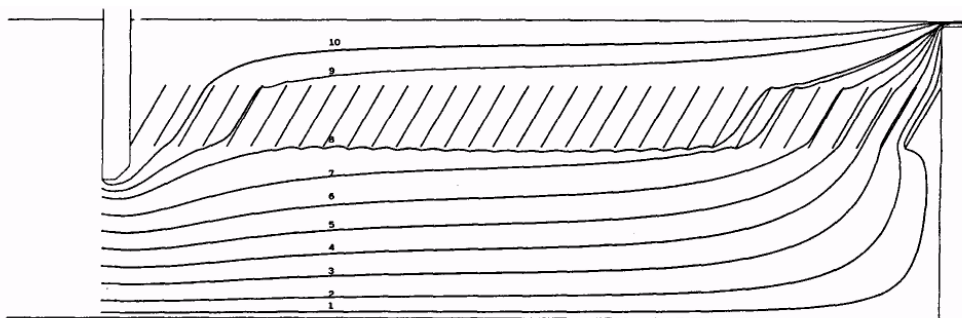


Figura 7. Líneas de corriente en la zona de decantación, sin canaletas de recogida.

Esto puede conseguirse, en la realidad, ajustando convenientemente la posición vertical de las canaletas,

observar el efecto que produce sobre el flujo a través de la zona ocupada por las lamelas la diferente disposición de las canaletas, dentro de este caso se han

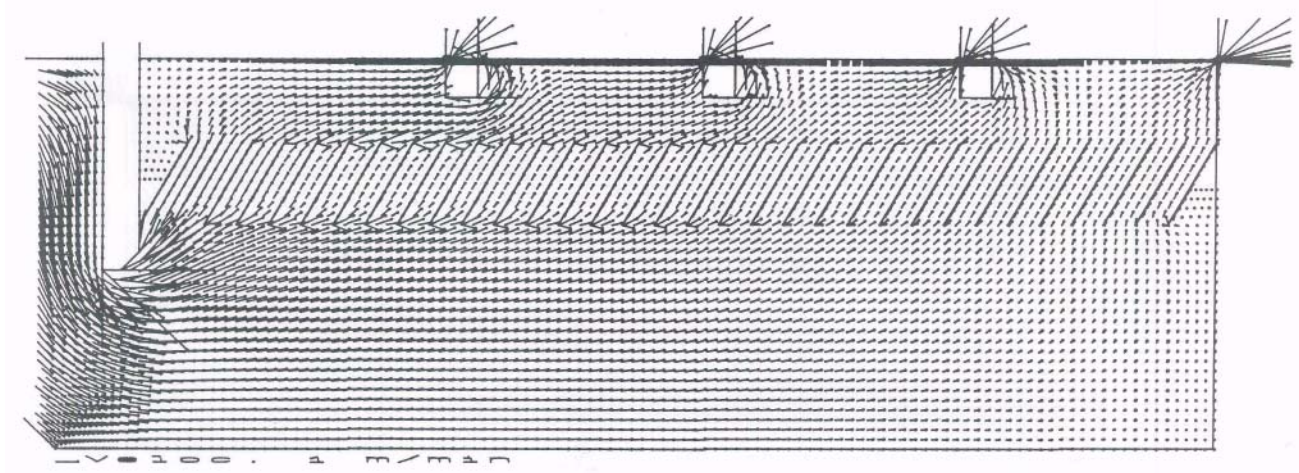


Figura 8. Vectores velocidad en la zona de decantación, para posición final de las canaletas.

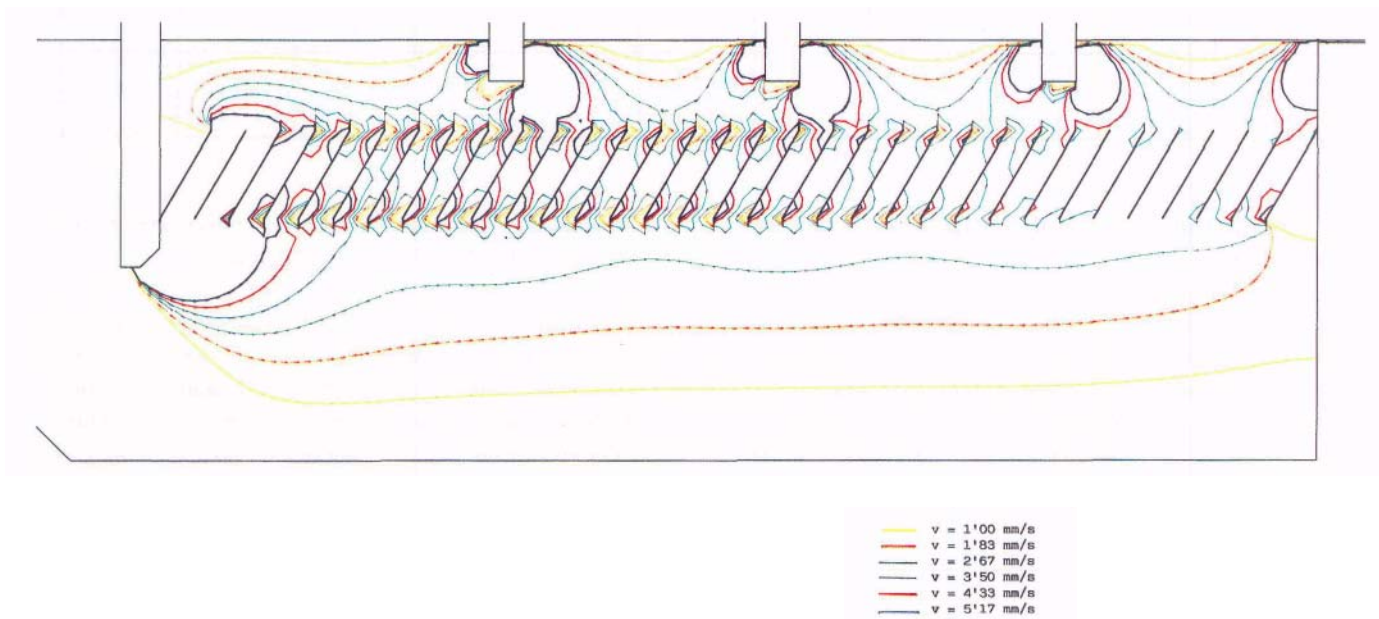


Figura 9 Líneas de igual velocidad vertical en zona de decantación, para posición final de las canaletas.

con la consiguiente adaptación de la lámina de agua sobre la cresta de los vertederos.

La localización de cada una de las canaletas se define por medio de la distancia $X_{ca}(i)$ entre el separador de

entrada a la zona de decantación y la canaleta (i). Para procesado cinco subcasos, cada uno de ellos correspondiente a un conjunto diferente de distancias $X_{ca}(i)$. Estas distancias oscilaron, para la primera canaleta, entre 1'94 m y 5'13 m, distribuyéndose uniformemente las otras dos entre la primera y el vertedero transversal al final de la zona de decantación.

En las Figuras 8 y 9 se muestran los vectores velocidad y las líneas de igual velocidad vertical en la zona de decantación, para la disposición de canaletas que produce una distribución de velocidades más uniforme en la zona ocupada por las lamelas. Las líneas de igual velocidad vertical representadas en la Figura 9 corresponden a los valores de 1'00, 1'83, 2'67, 3'50, 4'33 y 5'17 mm/s. La mejor disposición de las canaletas viene indicada en la Tabla 3.

Tabla 3. Posición X_{ca} que deberán tener las canaletas en la zona de decantación, como resultado del Estudio

CANALETA	X_{ca} (m)
1	3'36
2	6'20
3	9'00

En la Figura 9 se observa que a través de la mayor parte de los pasos entre lamelas, la componente vertical de la velocidad oscila alrededor de los 3'50 mm/s, valor impuesto inicialmente como condición de diseño. Cabe indicar también que en ningún caso se van a conseguir componentes verticales de velocidad menores de 4'33 mm/s en los primeros pasos entre lamelas, debido al efecto de proximidad de la sección de entrada del agua a la zona de decantación.

Este hecho se puso de manifiesto al procesar el modelo con valores de $X_{ca}(l)$ decrecientes a partir de los 3'36 m, obteniéndose componentes verticales de velocidad cada vez mayores para el espacio entre las primeras lámelas. Sin embargo, para valores crecientes de $X_{ca}(l)$ a partir

del valor indicado, en cada caso el flujo entre las primeras lamelas era prácticamente el mismo que para el caso de $X_{ca}(l) = 3'36$ m, para a continuación decrecer la componente vertical de la velocidad entre las siguientes lamelas, y posteriormente crecer como fruto del efecto de tiro de las otras canaletas. Por ello, la disposición indicada en la Tabla 3 es la que mejor cumple la condición de que el flujo de agua a través de la zona ocupada por las lamelas sea lo más uniforme posible.

Tabla 4. Líneas de corriente y tiempos de permanencia en la zona de decantación, para posición final de las canaletas.

LÍNEA DE CORRIENTE	T (min)
1	53'4
2	40'5
3	31'4
4	23'6
5	20'1
6	16'9
7	13'0
8	8'6
9	6'6
10	

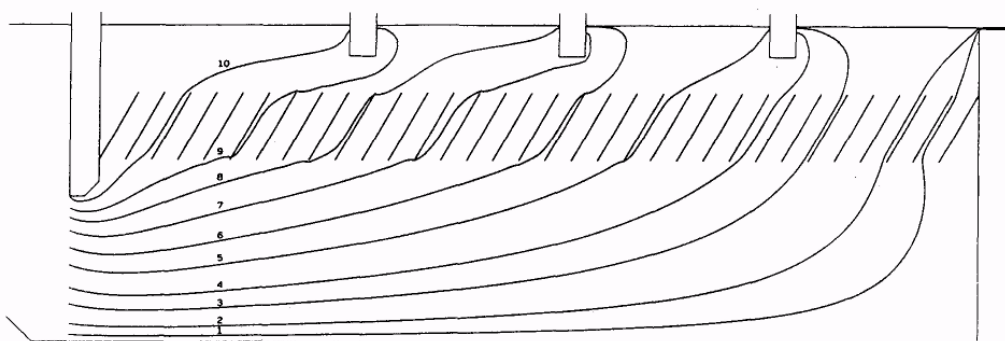


Figura 10. Líneas de comente en la zona de decantación, para posición final de las canaletas.

En la Figura 10 se representan las líneas de corriente de las partículas que entran a la zona de decantación para la disposición de canaletas escogida como resultado del Estudio, y en la Tabla 4 los tiempos de permanencia de las partículas que siguen estas líneas de corriente. Se puede ver que estos tiempos de permanencia son del orden de 7'5 minutos para las partículas que son recogidas por la canaleta 1, de 14 minutos por las de la canaleta 2, de 25 minutos por las de la canaleta 3 y de 47 minutos para las que salen por el vertedero transversal al extremo final de la zona de decantación.

De aquí se deduce que la primera canaleta recoge el agua decantada con un tiempo de permanencia en la zona de decantación menor que el valor típico asignado a un decantador con lamelas inclinadas, Tabla 1, el cual es de $0'20 \text{ h} = 12$ minutos. Por otra parte, el agua recogida por el resto de canaletas y por el vertedero transversal al final de la zona de decantación sí tiene un tiempo de permanencia mayor que dicho valor típico.

El tiempo de permanencia en la zona de decantación, para el agua recogida por la primera canaleta, podría aumentar si se separase más esta canaleta de la sección de entrada a dicha zona. Sin embargo, este hecho trae como consecuencia una mayor irregularidad en el flujo de agua que atraviesa las lamelas, como ya se ha comentado en párrafos anteriores. Por ello, en el diseño que nos ocupa se ha preferido sacrificar este tiempo de permanencia y conseguir una mayor regularidad en el flujo de agua a través de las lamelas.

Con objeto de aumentar el tiempo de permanencia del agua recogida por la primera canaleta, otra posibilidad sería disminuir el caudal recogido por la misma. Sin embargo, con ello no parece en principio que se vaya a reducir la componente vertical de velocidad en los primeros pasos entre lamelas, con lo que las velocidades de circulación por la parte superior de las lamelas, antes de llegar a la primera canaleta, serían prácticamente las mismas que en el caso anterior, así como el tiempo de permanencia al que nos estamos refiriendo. De todas maneras, no se han llevado a cabo cálculos en este sentido que puedan corroborar lo que estamos diciendo.

A la vista de los resultados obtenidos se deduce fácilmente que, para las dimensiones dadas a la zona de decantación, no habrá ninguna otra distribución posible de canaletas que consiga, en la mayor parte del espacio ocupado por las lamelas, componentes verticales de velocidad menores que $3'50 \text{ mm/s}$. A su vez, y como estas componentes de velocidad oscilan alrededor del valor de referencia para el caso que nos ocupa, se puede decir que las dimensiones de la zona de decantación utilizadas son las mínimas necesarias para conseguir el

efecto deseado.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha elaborado un modelo matemático bidimensional para el estudio del flujo en el interior de un decantador rectangular con lamelas destinado a la potabilización de agua. Este modelo matemático integra la ecuación de Laplace por el método de los elementos finitos, obteniéndose el campo de valores de la función potencial en el interior del decantador, del cual se deducen las componentes de velocidad en todos los puntos de estudio.

Este modelo matemático se ha utilizado para estudiar el flujo de agua en el interior de un decantador rectangular con lamelas, que la empresa Aguas de Valencia, S.A. está desarrollando con el fin de construirlo en futuras instalaciones. Se busca, a partir de diferentes diseños básicos sugeridos por la propia empresa, determinar cuál de ellos es el más adecuado con la condición de que cumpla las especificaciones siguientes:

- Se pretende conseguir un efecto de recirculación forzada del agua alrededor de la pantalla circular en la zona de entrada, con objeto de favorecer el engrosamiento de flocúles por captación de la materia coagulada. Esta recirculación se obtendrá por medio de un agitador instalado en el interior de dicha pantalla. Se estudiará el efecto de diferentes velocidades de rotación del agitador, determinando la velocidad de rotación mínima que provoque tales recirculaciones.
- En la zona de decantación se busca que el flujo ascienda lo más uniformemente posible por los distintos pasos entre lamelas hasta alcanzar el dispositivo de recogida de agua decantada correspondiente. Este dispositivo de recogida será un vertedero rectangular en la pared transversal al final de la zona de decantación, sólo o combinado con tres canaletas almenadas, formando a su vez vertederos rectangulares, y dispuestas sobre el nivel libre del agua decantada.
- Para asegurar que las lamelas ejerzan el efecto deseado sobre la decantación de los flocúles, la componente vertical de la velocidad en los pasos entre las mismas deberá ser como máximo del orden de $3'50 \text{ mm/s}$.

Desarrollado el Estudio como se ha expuesto en el presente artículo, las conclusiones a las que se ha llegado son las siguientes:

- 1) Se ha estudiado el efecto de recirculación del agua alrededor de la pantalla circular de entrada, producido por un agitador girando a diferentes velocidades de rotación. Se puede comprobar cómo este efecto va siendo menor conforme disminuye la rotación. La conclusión es que con una velocidad de rotación del agitador entre 14'36 y 8'63 rpm la recirculación que se establece parece a priori suficiente para los propósitos que se desean. Se estima que no es conveniente trabajar a velocidades de rotación más bajas de 8'63 rpm.
- 2) Cuando se extrae el agua decantada por medio de un vertedero rectangular en la pared transversal al final de la zona de decantación, el flujo se establece de una forma bastante regular por la parte superior e inferior del espacio ocupado por las lamelas, pasando fluido tan sólo a través de los extremos inicial y final de este espacio. En el resto del espacio entre lamelas, el flujo presenta unas componentes de velocidad muy bajas. Esto justifica la disposición de tres canaletas transversales de recogida de agua decantada en la superficie libre de la zona de decantación, además del vertedero rectangular mencionado, con el propósito de lograr la uniformización del flujo a través del espacio entre lamelas.
- 3) Se ha estudiado el flujo de agua a través del espacio entre lamelas para diferentes posiciones de las canaletas. Se observa que para la disposición que se ha considerado como solución del Estudio, la distribución de velocidades en dicho espacio es más uniforme que para cualquiera de las otras disposiciones.
- 4) Con la disposición de canaletas indicada en el párrafo anterior, la componente vertical de la velocidad en la mayor parte del espacio ocupado por las lamelas oscila alrededor del valor de referencia de 3'50 mm/s. Por ello, se puede decir que las dimensiones dadas a la zona de decantación son las mínimas necesarias para conseguir en este espacio una componente ascendente de la velocidad del orden de magnitud del valor de referencia.
- 5) Del estudio de las líneas de corriente en el interior de la zona de decantación se deduce que el tiempo de permanencia de las partículas de agua en el interior de la misma oscila entre 6'6 y 53'4 minutos, dependiendo del punto por donde salga la partícula.
- 6) Se observa que el tiempo de permanencia de las partículas de agua que salen por la primera canaleta es menor que el valor típico asignado a un decantador con lamelas inclinadas. A su vez, la velocidad ascensional del agua en los primeros pasos entre lamelas es mayor que el valor de referencia. Este problema, que afecta solamente a la primera parte de la zona de decantación, tiene difícil solución en un diseño de decantador como el que nos hemos impuesto.

En definitiva, la modelización matemática del flujo de agua en el interior de un decantador se ha revelado como una herramienta de gran utilidad para ajustar los parámetros hidráulicos de diseño del mismo. Y ello constituye, al fin y al cabo, un procedimiento de diseño mucho más económico que la utilización de modelos físicos a escala reducida.

AGRADECIMIENTOS

El presente artículo está basado en el Contrato para Proyecto de Investigación y Desarrollo firmado en Septiembre de 1994 entre la Universidad Politécnica de Valencia y la empresa Aguas de Valencia, S.A. con el título "Elaboración y puesta a punto de un modelo matemático bidimensional para el estudio del flujo de agua a través de un decantador rectangular con lamelas". Agradecemos a la empresa Aguas de Valencia, S.A. las facilidades ofrecidas para el desarrollo de este Estudio, así como la autorización concedida para la publicación de los resultados del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrés, M. (1994). *Diseño de una Planta Potabilizadora. Las de Picassent y Manises. Curso de Abastecimiento de Agua Potable: Calidad y Tratamientos*. Valencia, 22 al 25 de Marzo de 1994. U.D. Mecánica de Fluidos (Universidad Politécnica de Valencia) y EGEVASA (Excma. Diputación de Valencia). 52 pág.

- Chung, T.J. (1977). Finite Element Analysis in Fluid Dynamics. Ed. McGraw Hill. New York.
- Degremont (1979). Manual Técnico del Agua (4ª ed.). S.A.E. de Depuración de Aguas Degremont.
- Hinton, E. y Owen, D.R.J. (1977). Finite Element Programming. Ed. Academic Press. Londres.
- McGhee, T.J. (1991). Water Supply and Sewerage (6th ed.). Ed. McGraw Hill. New York.
- Salvato, J.A. (1992). Environmental Engineering and Sanitation (4th ed.). Ed. John Wiley and Sons. New York.
- Sanks, R.L. (1978). Water Treatment Plant Design for the Practicing Engineer. Ed. Ann Arbor Science. Michigan.
- U.D. Mecánica de Fluidos (1995). Curso de Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua (Tomo I). U.D. Mecánica de Fluidos (Universidad Politécnica de Valencia) y Aguas de Valencia, S.A.