

SIMULACION NUMERICA DEL FLUJO TURBULENTO EN LA ZONA DE INGRESO DE CAUDALES AL PROCESO DE CLARIFICACION EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

I. Matias Ragessi^a, Santiago Márquez Damián^b, Carlos M. García^a, Cecilia Pozzi Piacenza^a, Martín Romagnoli^c, y Gerardo Hillman^a

^a*Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA). Laboratorio de Hidráulica, F.C.E.F.yN., Universidad Nacional de Córdoba, Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina, matiasragessi@gmail.com, <http://www.efn.uncor.edu/>*

^b*Centro Internacional de Métodos Computacionales en Ingeniería (CIMEC), INTEC-UNL/CONICET, Güemes 3450, Santa Fe, Argentina*

^c*CURIHAM, Universidad Nacional de Rosario, Riobamba 245 bis, Rosario, Santa Fe, Argentina.*

Keywords: Flujos turbulentos, simulación numérica, agua potable.

Resumen. En la zona de ingreso de caudales al proceso de clarificación de la planta de tratamiento de agua potable (Planta Los Molinos) que la empresa Aguas Cordobesas S.A opera en cercanías de la localidad de Bower, (provincia de Córdoba, Argentina) se observan a priori patrones de flujo turbulentos incompatibles para el correcto desarrollo de los procesos de clarificación requeridos. Con el fin de elaborar recomendaciones para mejorar estas condiciones de flujo se desarrollaron actividades en dos etapas claramente diferenciadas.

En una primera etapa se procedió a la caracterización experimental del flujo en las condiciones actuales, a partir de mediciones de velocidad en la planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos”. La caracterización experimental del flujo turbulento en la zona de ingreso al proceso de clarificación es complicada debido a las importantes variaciones espaciales y temporales de los flujos tridimensionales presentes por lo cual se requieren técnicas experimentales con altas resoluciones espaciales y temporales a los fines de obtener los parámetros característicos del flujo. Por ello se utilizaron modernas técnicas de medición de velocidades del flujo disponibles en la actualidad.

La segunda etapa, que se reporta en este trabajo, consistió en utilizar un modelo numérico computacional apto para simular flujos turbulentos en la zona de estudio. Para ello se ha implementado un modelo basado en las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS). El código computacional utilizado para resolver numéricamente las ecuaciones RANS pertenece al paquete libre y abierto OpenFOAM(R) (Open Field Operation and Manipulation). El cierre turbulento utilizado es un modelo de dos ecuaciones $k - \epsilon$ estándar. El modelo numérico fue calibrado y validado utilizando los datos experimentales registrados. Sobre la base de esta herramienta se elaboraron recomendaciones relacionadas a las modificaciones a ejecutar en la planta de tratamiento de agua para optimizar el funcionamiento de los clarificadores.

1 INTRODUCCIÓN

La Ciudad de Córdoba se encuentra entre las regiones con mayor incremento poblacional en la República Argentina. A este incremento poblacional se le suma la rápida incorporación de los ambientes semirurales periféricos a la urbanización. Para satisfacer las necesidades de agua potable de una población en continuo crecimiento es necesario la optimización en los procesos de tratamientos existentes para la potabilización del agua. En este marco surge la necesidad de caracterizar el flujo en distintas componentes hidráulicas de las plantas de tratamientos de agua potable existentes para el abastecimiento de la ciudad de Córdoba, con el fin de optimizar el funcionamiento de estas componentes. No existen antecedentes a nivel local, regional y nacional de estudios similares en esta problemática.

En este trabajo se sintetizan los principales aspectos metodológicos utilizados y los resultados alcanzados en la caracterización del flujo turbulento en la zona de ingreso de caudales al proceso de clarificación (ver Figuras 1 y 2) de la planta de tratamiento de agua potable (Planta Los Molinos) que la empresa Aguas Cordobesas S.A. opera en cercanías de la localidad de Bower en la provincia de Córdoba. Esta planta es la encargada de abastecer a aproximadamente un 30% de la población de la ciudad de Córdoba. Observaciones preliminares en la planta sugieren que existen en la zona de estudio patrones de flujo turbulentos los cuales podrían ser incompatibles para el correcto desarrollo de los procesos de clarificación requeridos. Entre los principales inconvenientes observados en la zona de estudio y que se analizan en este trabajo se pueden mencionar: a) Elevados niveles de turbulencia en el flujo en los canales de aforo y distribución transversal que podrían afectar al tamaño de las partículas aglutinadas en los procesos de coagulación y floculación previos al de clarificación. Los esfuerzos de corte turbulentos presentes someten a los flóculos a cizallamiento rompiéndolos en partículas de menor tamaño y peso lo que genera menor eficiencia de los decantadores con volúmenes de extracción de barros menores a los previstos en el diseño. La menor eficiencia de los decantadores implicaría que el manto poroso de los filtros se obstruyera en un tiempo mucho más corto lo cual lleva a un lavado más frecuente; b) La localización asimétrica del canal de aforo con respecto a las unidades de coagulación y floculación existentes produciría una distribución espacial del flujo no homogénea en la transversal; c) La reducción brusca de la sección del canal de aforo en su transición al canal de distribución transversal (ver Figuras 1 y 2) genera zonas de recirculación, que reducen la sección de paso efectiva del flujo; d) Diferentes dimensiones de los canales de distribución transversal de margen derecha e izquierda podría generar una distribución no homogénea de los caudales; y e) La disposición asimétrica de las compuertas de ingreso a los decantadores podría generar una distribución de los caudales no homogéneas en cada unidad de decantación.

En la primera etapa de este estudio (descrita en la sección 2) se procedió a la caracterización experimental del flujo, a partir de mediciones en la planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos”. La caracterización experimental del flujo turbulento en el proceso de clarificación es complicada debido a las importantes variaciones espaciales y temporales presentes en los flujos tridimensionales presentes por lo cual se requieren instrumentos que presenten altas resoluciones espaciales y temporales a los fines de obtener los parámetros característicos del flujo.

La segunda etapa del estudio (resumida en la sección 3) consistió en utilizar un modelo numérico computacional apto para simular flujos turbulentos en la zona de estudio. Para ello

se ha implementado un modelo basado en las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS). El código computacional utilizado para resolver numéricamente las ecuaciones RANS pertenece al paquete libre y abierto OpenFOAM(R) (Open Field Operation and Manipulation). El cierre turbulento utilizado es un modelo de dos ecuaciones $k - \epsilon$ estándar (donde k es la energía cinética turbulenta y ϵ es la tasa de disipación de esa energía).

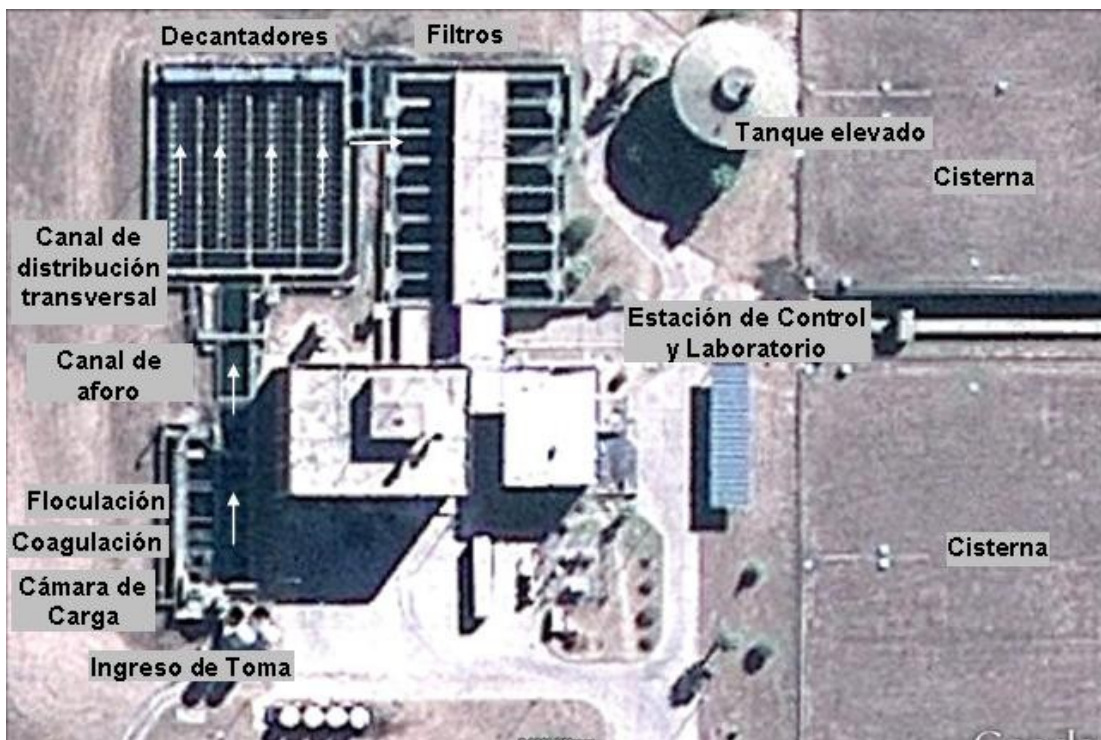


Figura 1: Esquema general del flujo en la Planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos”. Las flechas blancas indican la dirección y sentido del flujo.

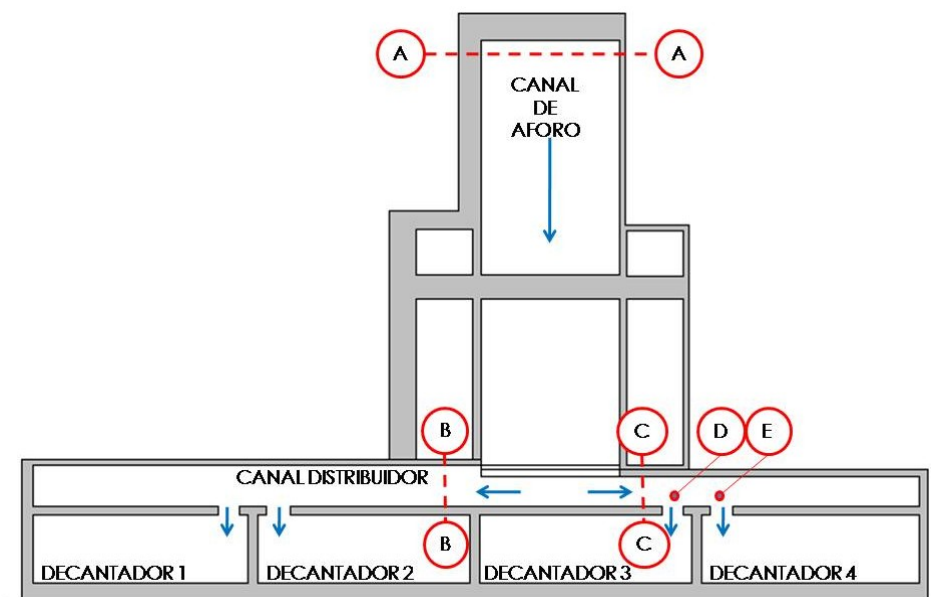


Figura 2: Esquema de la zona de estudio y ubicación de las secciones de medición. Planta de tratamiento de agua potable “Los Molinos”. Las flechas azules indican la dirección del flujo.

2 ESTUDIO EXPERIMENTAL

La caracterización experimental del flujo turbulento en la zona de estudio es complicada debido a las importantes variaciones espaciales y temporales presentes en los patrones de estos flujos por lo cual se requieren técnicas de medición que presenten altas resoluciones espaciales y temporales a los fines de obtener los parámetros característicos del flujo (velocidades medias, fluctuaciones turbulentas, escalas características del problema, etc.) (Ragessi, et al 2009). En este trabajo se utilizó un Velocímetro Acústico Doppler (ADV por sus siglas en inglés) el cual registra puntualmente series temporales de las tres componentes del vector velocidad de flujo (García, et al 2005). Mediciones preliminares indicaron que las condiciones experimentales (niveles de partículas en suspensión) resultan adecuadas para el uso de tecnología acústica. La caracterización de los procesos turbulentos del flujo se llevó adelante aplicando la metodología experimental específica (García y Herrero, 2009).

En la zona de ingreso al canal de aforo (sección A-A en Figura 2) se registraron señales temporales con ADV en cinco puntos distribuidos a lo ancho del canal y en dos planos ubicados a 25cm y 75cm del fondo. Con estas señales se cuantificaron experimentalmente: los caudales de ingreso a la planta; la variación espacial (distribución transversal y vertical) de los patrones de flujo (velocidades medias, energía cinética turbulenta, tasa de disipación de la energía cinética turbulenta); y la evolución temporal de los patrones de flujo. La Tabla 1 resume los principales parámetros computados en base a las series temporales de velocidad registradas.

Tabla 1: Valores medios del flujo en el canal de aforo. V_x, V_y y V_z son las componentes longitudinal, transversal y vertical de la velocidad media. k es la energía cinética turbulenta y ϵ es la disipación de la energía cinética turbulenta. Los valores negativos de V_y y V_z indican flujo hacia la izquierda y hacia abajo respectivamente.

Dist. a margen izquierda (m)	Distancia al Fondo (cm)	V_x (cm/s)	V_y (cm/s)	V_z (cm/s)	k (cm ² /s ²)	ϵ (cm ² /s ³)
0,75	75	31,6	-4,9	1,1	51,9	2,8
1,5	75	31,6	4,9	0,0	45,5	3,8
2,5	75	37,0	3,1	-1,1	40,2	2,2
3,5	75	37,6	-1,8	0,7	34,0	1,3
4,5	75	38,1	5,0	-1,1	21,8	0,8
0,75	25	32,9	8,5	-0,9	46,8	3,7
1,5	25	34,4	-0,8	-0,4	34,7	2,5
2,5	25	38,4	1,2	-2,1	38,0	2,2
3,5	25	37,5	4,4	0,4	24,5	1,6
4,5	25	38,9	-1,6	-2,9	15,8	0,5

En todos los casos, los valores de energía cinética turbulenta (k) se calcularon como

$$k = 0.5(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2) \quad (\text{Ec. 1})$$

donde $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ son la varianzas corregidas por la presencia de ruido Doppler de las señales de velocidad en la dirección longitudinal, transversal y vertical, respectivamente.

La tasa de disipación de energía cinética turbulenta (ϵ) se calculó a través del ajuste de la ley $-5/3$ del espectro de velocidad en el rango inercial que no se ve afectado por los efectos del ruido Doppler. Los cálculos de todos los parámetros se realizaron utilizando el algoritmo TUDE desarrollado por García y García (García y García, 2006).

En las secciones B-B y C-C (canal distribuidor en Figura 2) se evaluaron y cuantificaron: los patrones de flujo tridimensionales (corrientes secundarias, etc.), niveles de turbulencia; presencia de zonas de recirculación; entre otros. Se registraron señales en cuatro puntos distribuidos a lo ancho de cada sección en el canal distribuidor (ver Figura 3) y para tres niveles de profundidad medidos desde la superficie libre: 7 cm, 27 cm y 67 cm.

Finalmente la caracterización del flujo en los puntos D y E en la cercanías de las compuertas (ver Figura 2) permite determinar, entre otras cosas, los caudales que ingresan a los respectivos decantadores, las direcciones de los vectores velocidad y los niveles de turbulencia, mediante mediciones en la línea central de cada compuerta a 15 cm de la sección de las compuertas (ver Figura 3 b) y para tres niveles de profundidad medidos desde la superficie libre: 7 cm, 27 cm y 67 cm.

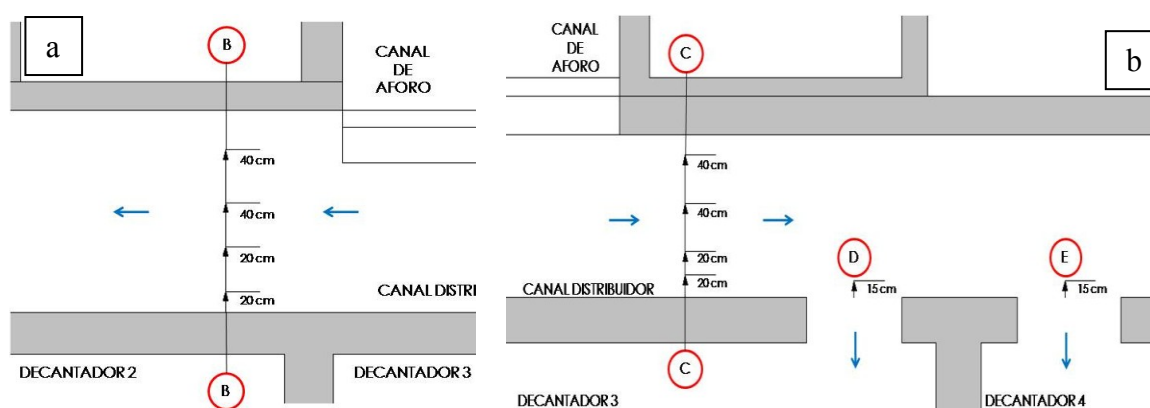


Figura 3: Esquema de medición en las secciones del canal distribuidor. Planta de tratamiento de agua potable "Los Molinos". Las flechas azules indican la dirección del flujo.

En base a las mediciones de velocidad en las distintas secciones mencionadas (A-A, B-B, C-C, D y E) fue posible cuantificar las escalas características de los procesos turbulentos: las escalas de los grandes vórtices y las microescalas (escalas de Kolmogorov) a partir de las cuales se puede inferir un orden de magnitud de los tamaños de flóculos presentes en el flujo en las distintas zonas. Las microescalas de Kolmogorov se calcularon con la Ecuación 2.

$$\eta = (\nu^3 / \epsilon)^{1/4} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde η = Microescala de los procesos turbulento (escalas de Kolmogorov), y
 ν = Viscosidad del fluido.

Los valores de los parámetros turbulentos computados en base a los datos registrados en las últimas secciones mencionadas (B-B, C-C, D y E) se muestran en la sección 4 (resultados) cuando los datos experimentales se contrastan con los reportados por el modelo numérico con el fin de validar a este último.

3 MODELACION NUMERICA DEL FLUJO TURBULENTO

3.1 Descripción del modelo utilizado

Se ha implementado en este estudio un modelo numérico basado en las ecuaciones promediadas de Reynolds (RANS). El código computacional utilizado para resolver numéricamente las ecuaciones RANS pertenece al paquete libre y abierto OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) (<http://www.openfoam.com/>).

Se utilizó el solver Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (simpleFoam en OpenFOAM), que permite acoplar las ecuaciones de Navier-Stokes con un procedimiento iterativo, para una malla de volúmenes finitos. Este se aplica para flujo estacionario, de una sola fase para densidad y viscosidad constantes (H. K. Versteeg and W. Malalasekera, 2007). El cierre turbulento utilizado es un modelo de dos ecuaciones $k - \epsilon$ estándar (Launder y Sharma, 1974).

La implementación del modelo numérico fue del tipo tridimensional para simular las condiciones del flujo en la zona de estudio y detectar zonas de conflicto como zonas de recirculación.

3.2 Generación de la malla de elementos

La malla utilizada en las simulaciones se compone de volúmenes de tamaño variable. En los borde (fondo y paredes de los canales) los volúmenes tienen una dimensión de 5 cm de lado, aumentando a 7 cm, 10 cm, y 12 cm hacia la zona media del dominio, en la zona central se completa con volúmenes de igual tamaño (ver Figura4). Además se densificó la malla en la zona donde el flujo hace una transición desde el canal de aforo hacia el canal distribuidor.

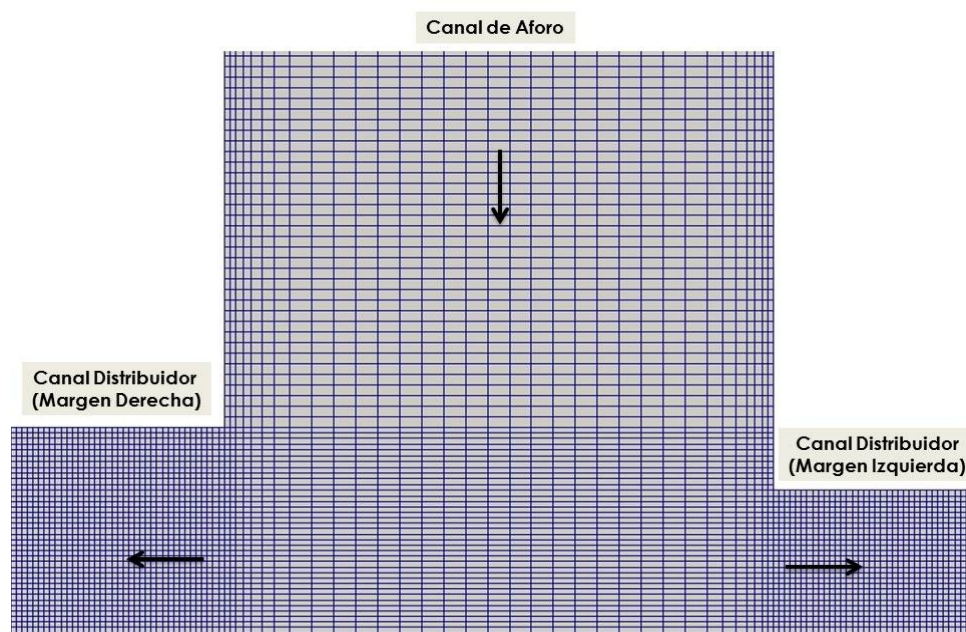


Figura 4.- Detalle malla en la zona de encuentro entre el canal de aforo y el canal distribuidor. Las flechas indican el sentido del flujo.

3.3 Condiciones iniciales y de borde

El solver utilizado requiere establecer condiciones de iniciales y de borde para las variables fundamentales: presión (p), velocidad (U), Energía cinética turbulenta (k) y Disipación de Energía cinética turbulenta (ϵ). Se estableció como valores iniciales iguales a cero las variables en todo el dominio salvo las zonas donde se estableció condiciones de borde específicas.

Condiciones a la entrada:

- p : gradiente de presión nulo,
- U : los valores de velocidad media medidos experimentalmente en la planta en el canal de aforo (sección A-A en Figura 2) y reportados en la Tabla 1,
- k y ϵ : calculados en base a los datos medidos experimentalmente en el canal de aforo (sección A-A en Figura 2) y reportados en la Tabla 1.

Condiciones a la salida:

- p : se calculó la presión estática media en los nodos correspondientes a la salida del modelo (compuertas),
- U : se estableció gradiente de velocidades igual a cero para la zona de las compuertas,
- k y ϵ : se impuso en las compuertas gradiente de energía cinética turbulenta y disipación de dicha energía igual nulo para las compuertas.

Condiciones en paredes y fondo:

- p : gradiente de presión nulo,
- U : se estableció que las velocidades sean igual a cero,
- k y ϵ : se utilizó las funciones `kqRWallFunction` y `epsilonWallFunction` para k y ϵ respectivamente. Estas son funciones estándar de la librería de `openfoam` que establecen la ley con la cual varía la energía cinética turbulenta y la disipación a medida que se aproxima a la pared y al fondo.

Condiciones en superficie libre:

- p : gradiente de presión nulo,
- U : debido a que en prototipo la superficie libre no presenta variaciones de nivel, en modelo se impuso una superficie rígida sin esfuerzos de corte para que no afecte al flujo interno (la condición `slip` en inglés). De esta manera es posible simplificar el modelo de uno a dos fases (agua-aire) simulando la superficie libre a otro a simple fase (agua). Esta simplificación permite reducir el esfuerzo computacional necesario y trabajar con un modelo menos complejo respecto a las condiciones de borde, parámetros físicos y ecuaciones a resolver."
 - k y ϵ : gradiente de presión nulo.

La simulación comienza desde tiempo t igual a cero y se configuró un paso de tiempo de 1 segundo. El caso simulado converge a la solución estacionaria en 2449 iteraciones.

4 RESULTADOS

A continuación se realiza la comparación de los resultados obtenidos del estudio experimental y la simulación numérica en las secciones B-B y C-C (canal distribuidor en Figura 2), y flujo de entrada de las compuertas D y E (ver Figura 2).

En ambas ramas del canal distribuidor se observan que los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los registrados con ADV en la planta son similares para las tres profundidades relevadas (ver Figura 5). En la rama derecha del canal distribuidor (sección B-B en Figura 2) los valores (numéricos y experimentales) de velocidad longitudinal media mantienen un valor casi constante hasta una distancia aproximada de 1,0 m y luego decrecen a valores cercanos a cero (ver Figura 5). Esta característica permitió estimar que el ancho efectivo de paso del flujo en este margen (aproximadamente de 1m) es significativamente menor al ancho de la sección del canal distribuidor, lo que implica que aproximadamente solo la mitad del ancho del canal contribuye al paso del flujo. Esto permite además definir las zonas de recirculación en la margen derecha del canal. En la rama izquierda del canal distribuidor (sección C-C en Figura 2) el ancho efectivo se reduce apreciablemente, aproximadamente a 0.75 m.

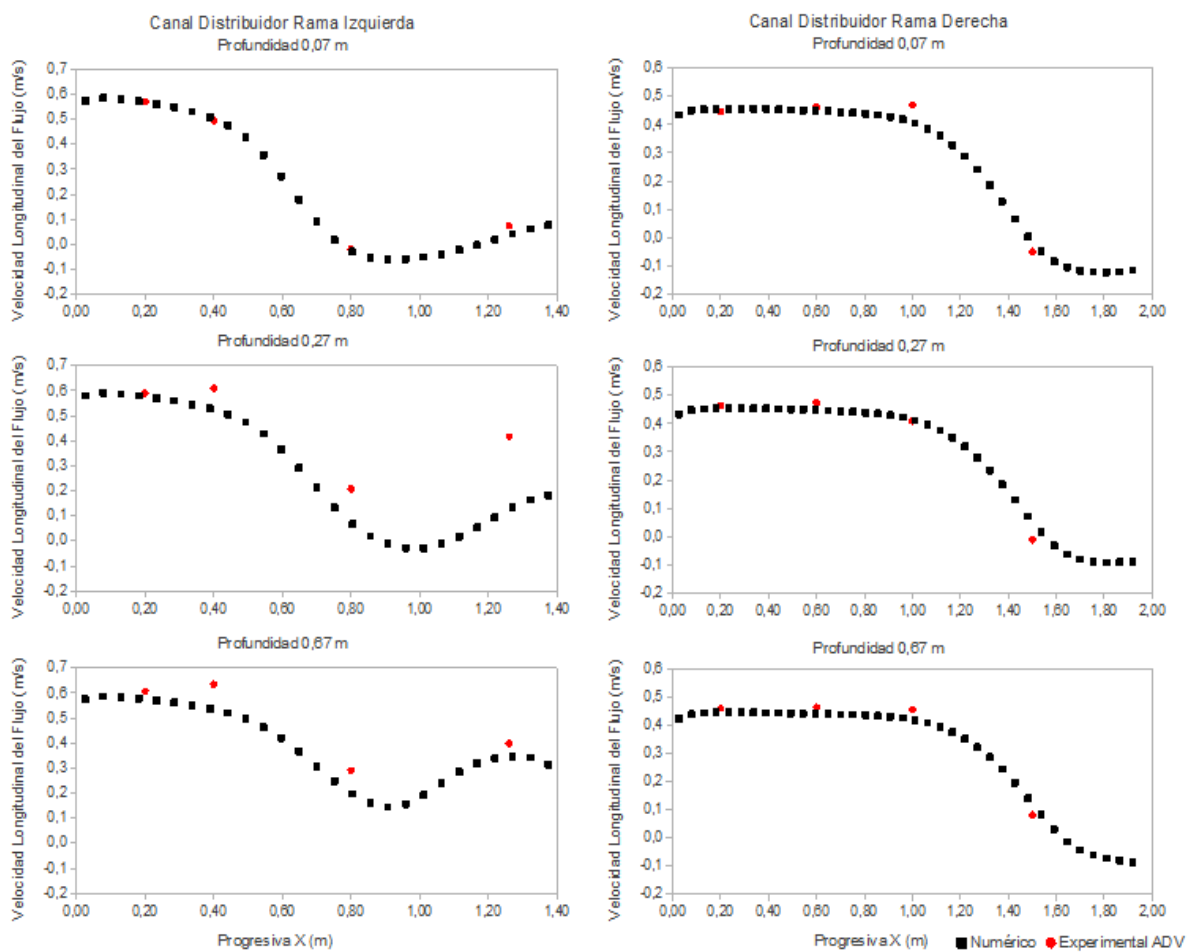


Figura 5: Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes del modelo numérico y los registrados con ADV en el canal distribuidor de la planta.

En la zona cercana a las compuertas 3 y 4 (puntos D y E, ver Figura 2) se observa que los valores de la velocidad longitudinal (entrante hacia cada compuerta) media del flujo resultantes del modelo numérico y los registrados con ADV en la planta son similares (ver Figura 6).

El flujo en el punto D presenta valores de velocidad longitudinal de flujo menores a los del

punto E. Las mediciones en la planta indican que los vectores de velocidad en D presentan valores importantes de la componente paralela a esa compuerta 3 (no mostrada en este trabajo) lo que implica que la ubicación de la compuerta no es la más eficiente para captar el flujo. Esta característica particular del flujo genera que el caudal que ingresa al decantador 3 es aproximadamente la mitad del que ingresa al decantador 4. El ingreso de mayores caudales al decantador 4 (con un volumen similar a las otras unidades de decantación) implica menor tiempo de permanencia dentro de ese decantador, disminuyendo su eficiencia.

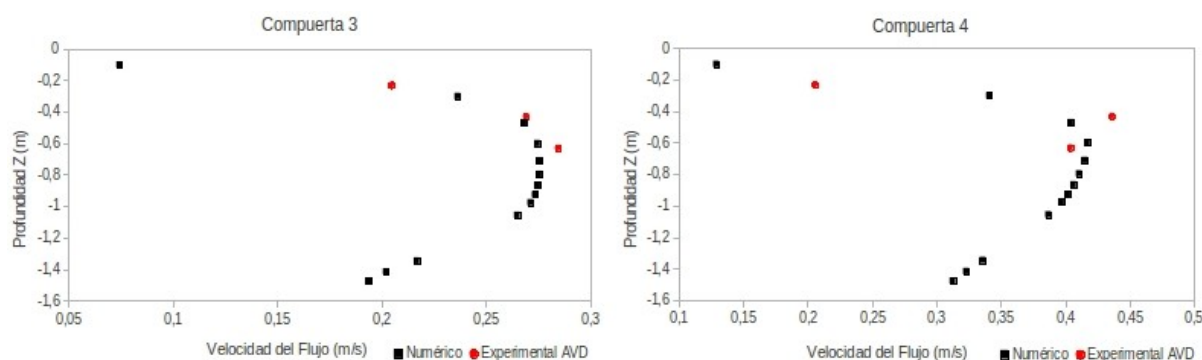


Figura 6: Comparación de los valores de la velocidad longitudinal media del flujo resultantes de modelo numérico y los registrados con ADV en la zona cercana a las compuertas 3 y 4 de la planta (puntos D y E en Figura 2).

Los valores obtenidos de energía cinética turbulenta k en las secciones B-B y C-C (canal distribuidor en Figura 2), y en las cercanías de las compuertas de la rama izquierda del canal de distribución transversal (puntos D y E en Figura 2) son un orden de magnitud superiores a los observados en la zona de ingreso (sección A-A en Figura 2). Esto se puede apreciar comparando los valores obtenidos de las mediciones con ADV en la planta. El flujo resultante de la modelación numérica presenta un comportamiento similar al observado en la planta. La Tabla 2 resume los valores de k máximos para las distintas secciones.

Tabla 2: Valores de k máximos observados en la planta y como resultado de la modelación numérica para distintas secciones.

Sección	Valor experimental de k (cm^2/s^2)	Valor numérico de k (cm^2/s^2)
Canal de Aforo	50	50
Sección B-B	128	126
Sección C-C	494	227
Compuerta 3	369	239
Compuerta 4	339	476

La Tabla 3 muestra los menores valores de las escalas de Kolmogorov obtenidos del estudio experimental en las secciones A-A, B-B, C-C, y los puntos D y E de la planta (ver Figura 2), y se los compara con los valores resultantes del modelo numérico para las mismas secciones.

Tabla 3: Valores de η mínimos observados en la planta y como resultado de la modelación numérica para distintas secciones.

Sección	Valor experimental de η (mm)	Valor numérico de η (mm)
Canal de Aforo	0,26	0,19
Sección B-B	0,12	0,12
Sección C-C	0,07	0,10
Punto D	0,09	0,11
Punto E	0,15	0,09

El diseño hidráulico de una planta potabilizadora debe lograr que la intensidad de la turbulencia disminuya a medida que el flujo avanza en el proceso de clarificación. Los resultados expuestos en las Tablas 2 y 3 muestran que las microescalas de los procesos turbulentos en la sección C-C, los puntos D y E (ver Figura 2), y en las compuertas 3 y 4 son menores que los observados en el canal de aforo (sección A-A ver Figura 2). Esto indica que los flóculos formados al inicio del proceso (coagulación – floculación, lo cual implica una inversión importante) podrían romperse debido a la intensidad de los procesos turbulentos en la zona del canal distribuidor y las compuertas de ingreso a los decantadores.

5 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones derivadas del análisis de los resultados se resumen a continuación.

- Los datos relevados experimentalmente en el canal de aforo (sección A-A en Figura 2) fueron usados satisfactoriamente como condiciones de borde para la calibración del modelo numérico implementado.
- La caracterización experimental del flujo en la sección B-B y C-C muestra una marcada característica tridimensional del flujo en esas regiones con elevadas velocidades longitudinales, transversales y verticales. Se observa una marcada separación del flujo en ambas secciones lo que reduce la sección efectiva de paso.
- El estudio experimental indica que los valores de energía cinética turbulenta en la sección B-B y C-C son un orden de magnitud superiores a los observados en la zona de ingreso (sección A-A).
- El programa de simulación numérica utilizado (OpenFOAM(R)) se adapta de forma adecuada al problema.
- Se ha calibrado y validado adecuadamente el modelo número tridimensional en base a los datos medidos en la planta de tratamiento. Los resultados obtenidos de la modelación numérica en tres dimensiones representan adecuadamente en forma cualitativa el comportamiento del campo de velocidad en la zona estudiada.

- La energía cinética turbulenta modelada muestra un patrón de comportamiento similar al observado en el prototipo.
- Se verificó que el uso de un contorno sólido y la hipótesis de deslizamiento en la superficie libre son correctas. Esto permite resolver el problema sin requerir el uso de un esquema de simulación a dos fases con la consecuente reducción en complejidad en el modelo numérico.
- Los resultados expuestos indican que los flóculos formados al inicio del proceso (coagulación - floculación) se rompen debido a la intensidad de los procesos turbulentos en la zona del canal distribuidor y las compuertas de ingreso a los decantadores.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- García C., Cantero M., Niño Y., and García M. (2005). "Turbulence measurements with Acoustic Doppler Velocimeters". *J. Hydr. Engrg. ASCE*. 131, 1062-1073.
- García y García (2006). "Characterization of flow turbulence in large-scale bubble-plume experiments". *Experiments in Fluids*, Volumen 41, Tomo 1, pp.91-101
- García C.M y Herrero, H. (2009). "Metodología Experimental Para Caracterizar Flujos Turbulentos Con Velocímetros Acústicos Doppler". I Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica. Carlos Paz, Córdoba, Argentina.
- H. K. Versteeg and W. Malalasekera (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method*.
- Launder, B. E., and Sharma, B. I. (1974). "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc", *Letters in Heat and Mass Transfer*, vol. 1, no. 2, pp. 131-138.
- OpenCFD Ltd. (2005). Derivation, modelling and solution of the conditionally averaged two-phase flow equations. Tech. Rep. TR/HGW/02, 2005.
- OpenCFD. <http://www.opencfd.co.uk/openfoam/>, 2007.
- Ragessi, I.; Haisama, M.; Garcia, C.; Herrero, H.; Balderrama, C.; Tarrab, L. y Cantero, M. (2009), "Caracterización experimental del Flujo Turbulento en componentes hidráulicas de una planta de tratamiento de agua potable para optimizar su funcionamiento". III Foro de Extensión Universitaria. Universidad Nacional de Córdoba.