

## Up flow plug hydrodynamic 3D-simulation into a concentric constructed tank to sludge removal

**Gerardo Aldana y José Fuenmayor**

*Centro de Investigación del Agua (CIA). Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia (LUZ) Correo de contacto: gerardoaldana\_21@hotmail.com*

### Abstract

Plug up flow promote hydraulic efficiency and remove organic matter through the sedimentation. To probe this affirmation a metallic tank was constructed 4 concentric rings with and different internal diameter as 3200mm, 2240mm, 1280mm and 320mm respectively. The main objective of this study was to simulate the hydrodynamic velocities vectors for the ringing tank using CFD modeling. DHI MIKE3 computer program was used. Finite Element Mesh FEM was generated and bathymetric was added varying the depth at the weir water crossing pass from 1900mm to 1700mm. Similarity condition were kept to geometric boundaries as original tank design. Methodology consist to setting up a grid with 16 sided-polygons for each ring and 3 running were done for 1440 time step of 30s each one. The simulation showed velocities vectors for the first channel ranges from 0 to  $0.04 \text{ ms}^{-1}$ , second ranging from 0.08 to  $0.12 \text{ ms}^{-1}$  and the third range from 0.04 to  $0.08 \text{ ms}^{-1}$ . Conclusions point out that axial-longitudinal flow was promoting and clear zones appeared with turbulence flow at reduced area such weir water crossing. First and third channel were less velocity and this match well with sediment deposits observed at the real tank.

**Key words:** Computational Fluid Dynamics CFD, Hydrodynamics, concentric tank, Sludge removal.

## Simulación hidrodinámica en 3D del flujo pistón en el interior de un tanque anillado para eliminación de lodos

### Resumen

El flujo pistón promueve la eficiencia hidráulica y la remoción de materia orgánica mediante la sedimentación. Para comprobar esta afirmación se construyó un tanque metálico de 4 anillos concéntricos de diferentes diámetros 3200mm, 2240mm, 1280mm y 320mm respectivamente. El objetivo de esta investigación fue simular los vectores de velocidad utilizando la Dinámica de Flujo Computacional DFC, aplicando el programa MIKE3 a través de una malla 2D de elementos finitos a la cual se le agrego la batimetría de agua variable desde 1900mm hasta 1700mm y las condiciones de bordes circulares de acuerdo al diseño y dimensiones de la estructura del tanque. La metodología consistió en generar un modelo de cuatro anillos concéntricos con polígonos de 16 lados con vertederos para cada uno, se realizaron tres corridas de 1440 pasos de 30s cada una (TS). La magnitud de los vectores de velocidad varió en los rangos para el primer canal desde 0 hasta  $0,04\text{ms}^{-1}$ , para el segundo canal desde 0,08 hasta  $0,12\text{ms}^{-1}$  y en el tercer canal desde 0,04 hasta  $0,08\text{ms}^{-1}$ . Se concluyó que el fluido tuvo un comportamiento de forma axial longitudinalmente señalando zonas de clara turbulencia donde el área era reducida tal como en los vertederos ubicados en los pases de flujo entre los canales. Las zonas donde la velocidad fue menor al promedio, tales como en el 1er y 3er canal arrojaron más depósitos de sedimentos coincidiendo con lo observado en el tanque construido.

**Palabras clave:** Dinámica de Flujo Computacional (DFC), Hidrodinámica, Tanque de Anillos, Remoción de lodos.

## Introducción

El estudio de la hidrodinámica en tanques de agua, incluye varios aspectos tales como: geometría, relación  $L/A$  (largo/ancho), número de dispersión ( $d$ ), tiempo de retención hidráulico real ( $\theta_h$ ), fuerzas de inercias en las entradas y salidas que puedan promover la mezcla axial, transversal y/o vertical. [1]

El flujo axial o pistón mejora la eficiencia hidráulica cuando la relación  $L/A > 8$  [2] y promueve la remoción de materia orgánica a través de la sedimentación física, debido a que los vectores de velocidad se mantienen con un patrón uniforme de flujo equivalente a los vagones de un tren. Las ecuaciones de diseño tradicionales no incluyen parámetros que se ajustan a la realidad, es por esta razón que se recurre a la simulación hidrodinámica para permitir por medio de modelos calibrados, resultados que se aproximen o acerquen a la data obtenida en tanques reactores y lagunas a escala real. [1]

Este tipo de simulación permite caracterizar la hidrodinámica de un tanque de cuatro anillos mediante el uso de las ecuaciones de transporte de Momentum, continuidad y advección-dispersión de flujo en las tres direcciones en el modelo matemático, que describan el comportamiento de dicho tanque, durante periodos específicos de tiempo de retención, según la disponibilidad de datos en la parte experimental, logrando una representación de los vectores de velocidad y mejorar su condición a través de la calibración para reproducir la dirección y magnitud del flujo. [2]

La Universidad del Zulia en el año 2007, llevó a cabo una investigación para la implementación de un reactor concéntrico anaeróbico a flujo pistón para el tratamiento de efluentes cerveceros, esto se realizó en la planta de tratamiento de la cervecería local se diseñó un modelo tamaño piloto tomándose un previo reactor de circulación interna IC y teniendo en cuenta dos condiciones: a) promover el flujo pistón en su funcionamiento y b) velocidades de flujo bajas ( $0.004-0.01 \text{ ms}^{-1}$ ) que faciliten los mecanismos físicos de sedimentación [3].

Para llevar a cabo el diseño se tomó un tanque existente con dimensiones externas de aproximadamente  $12 \text{ m}^3$  de capacidad, de forma circular, de 2.9 m de diámetro y 2.0 m de profundidad. A dicho tanque se le realizó una adaptación mediante un separador espaciador en forma espiral concéntrico, a fin de lograr canalizar el recorrido del agua a través de una longitud determinada. Se construyó con una profundidad interna promedio de 1.8m, se acoplaron 3 secciones dividida por anillos construidos con laminas de acero de 1 pulgada de espesor y 0.48 m de separación entre anillo y anillo, teniendo así una longitud total del reactor de 13.66 m ( $L/A = 28.46$ ) y una área transversal de  $0.87 \text{ m}^2$ . Dicho reactor fue diseñado y construido en la Cervecería Polar

Planta Modelo como tanque de estabilización (TE), fue colocado luego del reactor IC existente y su descarga directa al final del proceso se distribuye a una laguna ecológica [3].

El estudio de la hidrodinámica por medio de la DFC ayuda a obtener una herramienta útil para la simulación de los vectores de velocidad, en las áreas internas de los tanques concéntricos y así poder comprobar la condición de flujo pistón o dispersa y/o dar solución a problemas hidrodinámicos en áreas donde la velocidad sea diferente a la promedio. Esta técnica ha sido utilizada en Australia, Inglaterra y Venezuela; donde se ha propuesto para estudiar la hidrodinámica en lagunas, reactores a escala reducida como modelos físicos [2], [4]. Luego de una década en Inglaterra y en Nueva Zelanda concluyeron que la DFC puede conducir a resultados muy precisos siempre y cuando se utilicen modelos calibrados y validados con data obtenida a escala real [5], [6].

Esta investigación pretende simular, con el uso de herramientas computacionales, el flujo para observar si el recorrido es unidireccional, disminuir los puntos de conflictos, zonas muertas y las pérdidas de energía a través de la optimización en el diseño geométrico del tanque. Además, se desea saber que tan eficaz sería este tipo de estudio en áreas atípicas como los reactores circulares tratando de realizar un diseño de la malla de elementos finitos con polígonos que se acerquen al área de un círculo, pero al mismo tiempo manteniendo las condiciones iniciales del diseño del tanque tales como: longitud, ancho y profundidad.

## Bases teóricas

El modelo de Dinámica de Fluido Computacional se basa en las ecuaciones de movimiento de fluido tales como: la de continuidad, transporte de Momentum en 3 direcciones y la de Esfuerzo de Reynolds. A continuación se presentan las ecuaciones desarrolladas para el programa MIKE 3 en coordenadas cartesianas:

Ecuación de Transporte de Momentum y Esfuerzo de Reynolds en la dirección x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s Q \quad (1)$$

Ecuación de Transporte de Momentum y Esfuerzo de Reynolds en la dirección y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s Q \quad (2)$$

Ecuación de Transporte Momentum y Esfuerzo de Reynolds en la dirección z:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w^2}{\partial z} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} = -fw - g \frac{\partial \eta}{\partial z} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial z} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial z} + F_w + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial w}{\partial z} \right) + w_s Q$$

Donde

t:	Tiempo (s)
x, y, z:	Coordenadas cartesianas (m)
u, v, w:	Componentes de la velocidad de flujo (m/s)
Q:	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
	Viscosidad de Eddy (1,0x10 <sup>-4</sup> a 1,0x10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)
η:	Constante de la gravedad (m/s <sup>2</sup> )
g:	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )
ρ:	Presión del fluido (N/m <sup>2</sup> )
P:	Fuerza de aplicación en la dirección (N)
F:	Fuerza local en la dirección (N)

## Materiales y métodos

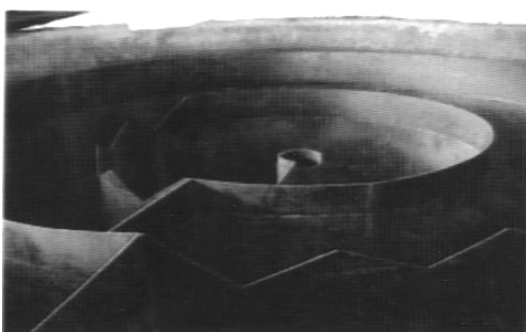
Un tanque metálico de acero inoxidable fue construido con 4 anillos internos en acero, comunicados por rebose a través de vertederos de forma dentada de 50cm, 30cm y 10cm de longitud para los 3 primeros anillos (canal 1, 2 y 3). Las dimensiones del tanque fueron ajustadas a un modelo matemático de superficie libre. La malla FEM fue generada en 2D con los datos de la Tabla 1, alguno de ellos fueron modificados como por ejemplo los dientes en los vertederos para los cuales se tomaron como rectangulares, el espesor de las paredes (25mm) fue mantenido en el modelo, así como también, todas las dimensiones fueron colocadas en milímetros para asegurar consistencia dimensional. Los anillos o canales fueron construidos de acuerdo a las dimensiones mostradas en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Datos del diseño original del tanque para realizar el modelo.

SUPERFICIE	D(mm)	H (mm)	H <sub>1</sub> (mm)	a (mm)	H <sub>2</sub> (mm)
Anillo 1	3200	2000	-	25	
Anillo 2	2240	2000	-	25	
Anillo 3	1280	1800	-	25	
Anillo 4	320	1800	-	25	
Canal 1	-	2000	1900	480	346
Canal 2	-	1900	1800	480	196
Canal 3	-	1800	1700	480	286

Nota: D: Diámetro de cada anillo (mm), H: Altura del tanque (mm), H<sub>1</sub>: Nivel de agua para cada canal (mm), a: Ancho de la pared metálica y canales (mm) respectivamente, H<sub>2</sub>: Nivel de lodos. Fuente: [3]

La entrada superficial en el canal 1 fue alimentado con un caudal de 0,276 Ls<sup>-1</sup> con una válvula de control a una altura de 1900mm, para un tiempo de retención teórico de 0,5d y el efluente fue extraído por gravedad desde el anillo 4 a una altura de 1700mm ubicado en el centro del tanque a través de un vertedero de forma rectangular, según se observa en la Figura 1. Además, se pueden observar también las barreras divisorias, ubicadas transversalmente al inicio y final de su respectivo canal construidas en acero de espesor 1 pulgada.



**Figura 1:** Detalle interno de los 4 anillos y vertederos del tanque metálico construido.

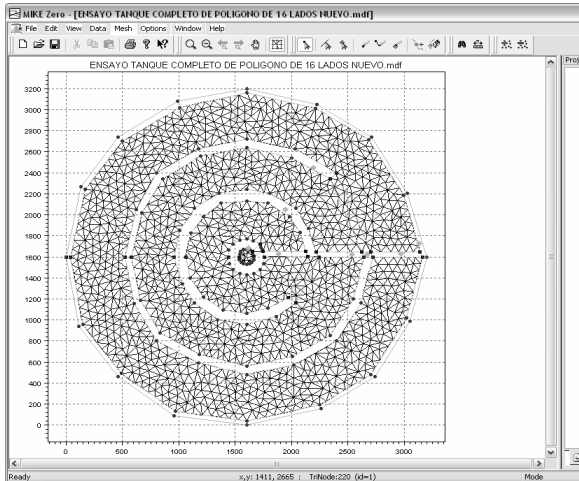
Se procedió a la generación del modelo con dos opciones: primero se diseñó un polígono de 8 lados y posteriormente uno de 16 lados de forma de cubrir el área total del círculo, prefiriendo el segundo. Para ello en un papel milimetrado se graficó dicho polígono y luego se pasaron los datos al generador de malla del MIKE ZERO.

La malla en 2D FEM triangulada fue generada exitosamente con 1573 nodos y 2664 elementos, los vertederos superficiales fueron indicados como pases de agua en la malla 2D; posteriormente fue modificada la longitud a 30cm en el vertedero del primer canal cuando se colocó una pared de 20cm adyacente a la pared transversal.

## Presentación y análisis de resultados

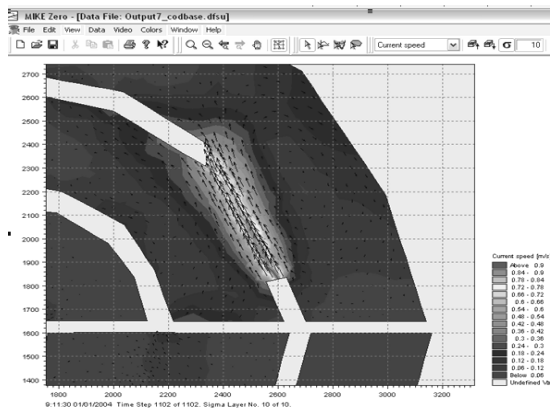
Se realizaron varias corridas con el programa MIKE3 para 1440 TS con la malla original como se muestra en la Figura 2, observándose una zona cercana al primer vertedero con turbulencia, para disminuirla se realizó un ajuste a la malla con una extensión de una pared de 20cm de longitud, como posible solución para eliminar

el conflicto en esta zona tal como se muestra en la Figura 3. En el diseño original a la estructura del primer vertedero se recomienda construir esta pared.



**Figura 2:** Malla 2D para un polígono de 16 lados 4 anillos y sus vertederos.

Se realizó una nueva corrida con la modificación del vertedero 1 en el primer anillo, los vectores de velocidad variaron en el rango de  $0,12 - 0,30\text{ms}^{-1}$  según se observa en la Figura 3. En el resto del tanque fue mucho menor, equivalente a  $0,06\text{ms}^{-1}$ . Los vectores de velocidad se pudieron visualizar en los primeros 400TS en la capa superficial a un rango de variación que fue desde 0 hasta  $0,04 \text{ ms}^{-1}$  para el primer canal. En el segundo varió desde  $0,08$  hasta  $0,12 \text{ ms}^{-1}$  y estuvo por encima del anterior y finalmente para el tercer canal, varió desde  $0,04$  hasta  $0,08\text{ms}^{-1}$  aproximadamente, estos valores correspondieron con el experimento inicial del tanque en su estudio a escala piloto. [3]

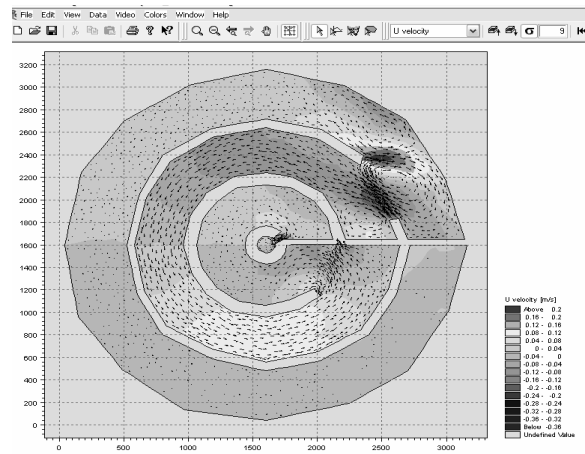


**Figura 3:** Ampliación y visualización de los vectores de velocidad a 1102 TS en el 1er vertedero en la capa superficial.

Para poder visualizar los vectores de velocidad, se

realizó el incremento del caudal en un amplio rango entre  $0,276$  hasta  $340 \text{ Ls}^{-1}$ , cuyos valores mínimos se observaron en el primer y tercer canal, con una variación desde  $0,18\text{ms}^{-1}$  hasta  $0,24 \text{ ms}^{-1}$  para las zonas con mayor velocidad y desde  $0,06\text{ms}^{-1}$  hasta  $0,12 \text{ ms}^{-1}$  para las menores. La calibración del modelo se logró además, en dichos canales, donde se depositó una mayor cantidad de lodo con valores entre  $34,6\text{cm}$  y  $28,6\text{cm}$  respectivamente, en comparación al segundo canal que fue de  $19,6\text{cm}$ , valores que coincidieron con la realidad en cuanto al comportamiento del primer y tercer canal [3].

El incremento virtual del caudal hasta  $340 \text{ Ls}^{-1}$  permitió una visualización amplia de las direcciones del fluido, se pudo observar claramente y en detalle los vectores de velocidad en los vertederos donde se precisó el incremento de la turbulencia en el 1ro, alcanzando velocidades hasta  $1\text{m/s}$ , según se observa en la Figura 4; dicho comportamiento fue similar a través de las diferentes corridas en el modelo.



**Figura 4:** Simulación de los vectores de velocidad en la superficie. Incremento virtual del caudal resultando una velocidad promedio hasta  $1\text{m/s}$ .

Al inicio del primer canal donde se descarga el caudal las velocidades simuladas son despreciables, igual como ocurrió en la realidad ya que variaron en el rango desde  $0,004\text{ms}^{-1}$  hasta  $0,01 \text{ ms}^{-1}$  [3], este régimen hidráulico se mantuvo en el primer tercio de longitud del canal variando desde  $0\text{ms}^{-1}$  hasta  $0,008 \text{ ms}^{-1}$ . Luego, se incrementó ligeramente y en forma errática sin mantener un comportamiento homogéneo en el segundo tercio de longitud del canal. Cuando se aproximó el fluido al cruce del 1er vertedero aparecieron dos vórtices bien definidos al final del primer canal, uno en la parte superior y otro inferior sobre el vertedero. Fue allí donde el régimen cambió a turbulento incrementándose las velocidades en un rango de  $0,1-0,2 \text{ ms}^{-1}$ .

El vórtice superior generó pérdidas hidráulicas ya que se observó que los vectores de velocidad un 30% aproximadamente realizaron un flujo reverso, el

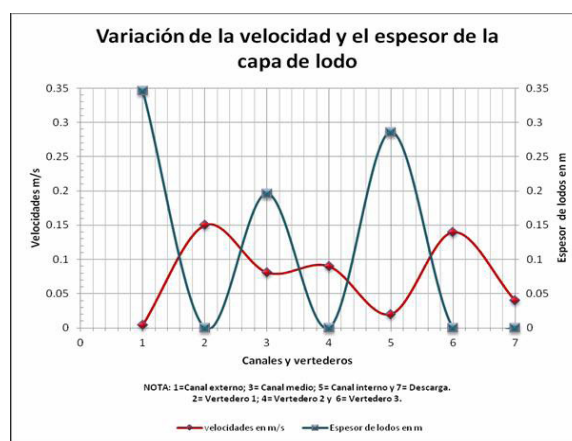
resto de los vectores continuaron su dirección hacia el segundo vórtice; donde, el fluido rotó casi  $360^\circ$  antes de pasar al segundo canal, con velocidades que variaron en un rango desde  $0,072-0,9 \text{ ms}^{-1}$ .

Antes de la modificación de la pared se observó que el fluido era completamente errático y generaba una zona con mucha pérdida en el primer cruce. Esta zona de conflicto fue mejorada, siendo innecesario modificar en el modelo las otras longitudes del resto de los vertederos a pesar que en el diseño original del tanque metálico existían [3], por lo que se concluye que las zonas críticas generadas por la turbulencia fueron disminuidas y se recomienda sean eliminadas.

En el segundo canal al inicio, luego del cruce sobre el vertedero el 90% del flujo aproximadamente atraviesa sin inconveniente por la parte central, según se observa en la Figura 4, el resto del fluido se incorporó al flujo reverso del primer vórtice del canal anterior. Además, se observó una pérdida de fluido generada en la pared divisoria adyacente del 2do canal, donde se produjo un área crítica con un vórtice con velocidades reducidas [7]. En todo el resto de la longitud del canal se observó un régimen laminar donde las velocidades variaron en un rango desde  $0,7 \text{ ms}^{-1}$  hasta  $1,2 \text{ ms}^{-1}$  siendo en este canal, donde se concentró la mayor parte del fluido y tuvo un comportamiento muy homogéneo similar a un flujo pistón, donde la turbulencia y/o viscosidad de Eddy se mantuvo constante [8].

Al final del segundo canal, el flujo descargó por gravedad en el vertedero, atravesándolo sin novedad, a excepción de una parte del fluido que continua en la dirección paralela al canal impactando con la pared, donde se produce una pérdida local. Esta pérdida de energía se debe al cambio de la dirección del flujo y la mezcla entre las capas superficiales y la del fondo, debido a las fuerzas de inercia que al disminuir la sección en el cruce producen esfuerzos cortantes en la columna de agua [9]. Por lo anteriormente expuesto se concluye que a medida que se incrementó la velocidad en el canal, el número de vórtices se incrementó; específicamente en los vertederos, este hallazgo puede ser ventajoso para utilizar este diseño en tanques para mezclas rápidas con coagulantes.

Con la finalidad de obtener una correlación entre los valores experimentales y los simulados se construyó una Figura, graficando los valores de las velocidades simuladas para: a) cada canal (externo, medio y interno), b) vertederos (1er, 2do y 3ro) y c) la descarga en el efluente, respectivamente. Estos valores fueron correlacionados con los experimentales [3], en relación a los espesores de lodos medidos por sedimentación. En la Figura 5, se observa en las ordenadas el valor de los lodos y las velocidades y en la abscisa la posición de los puntos de medición.



Nota: 1 = Vertedero 1, 2 = canal externo, 3 = Vertedero 2, 4 = vertedero 3, 5 = canal medio, 6 = canal interno, 7 = Descarga. —●— Velocidad —●— Espesor de lodos

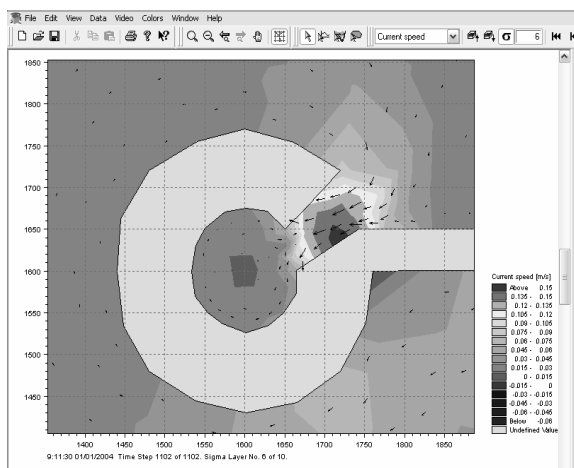
**Figura 5:** Variaciones de las velocidades en los canales y vertederos versus la acumulación de lodos en el tanque metálico (datos tomados en experiencia real) [3]

Se observó en la Figura 5 que la velocidad máxima ocurrió cuando el fluido pasó por el primer vertedero (punto 1), sin originar algún depósito de lodos, en el canal externo la velocidad fue despreciable (punto 2); igual como ocurrió para el canal interno (punto 6), con una acumulación máxima de lodos. En los otros puntos, se incrementaron las velocidades (puntos 3 y 5), pero luego fue estabilizada para cambiar de régimen al comportamiento axial y finalmente fue disminuida totalmente en el 3er vertedero de descarga y en el efluente final (puntos 4 y 7). Esta Figura contribuyó para la calibración del modelo matemático desarrollado.

En el tercer canal al inicio, el flujo pistón continuó una vez que cruzó el vertedero y se generó una pequeña pérdida en la pared opuesta en forma de vórtice, para luego continuar el flujo con un comportamiento errático y velocidades casi despreciables en la mayor parte de la longitud del canal, según se observa en la Figura 4. En la parte final, se generaron dos pérdidas, la primera apareció con una reducción gradual del fluido en un 40% con flujo turbulento antes del cruce del vertedero; y la segunda, en la pared opuesta con un 60% del fluido estacionario.

El modelo calibrado en este estudio permitió observar con detalles los pases de fluidos en cada uno de los vertederos, y descubrir las características hidráulicas de cada uno, difícil de ser observado en la realidad, aunque el estudio de investigación fue desarrollado en un tanque a escala piloto [10]. Las salidas obtenidas con el modelo permitieron visualizar el fluido unidireccional y se puede concluir que el flujo pistón estuvo involucrado solo en el canal del medio, con número de dispersión (d) menor de 0,1, en los otros dos canales el flujo fue ligeramente disperso con números de dispersión que variaron entre 0,1 a 0,2 [2].

En el vertedero 3, el fluido atravesó sin ningún tipo de pérdida y descargó por gravedad en el efluente final. En la realidad la descarga se efectúa en forma de espiral, debido a la fuerza centrífuga que ejercen los anillos concéntricos en una caída libre desde 1700mm hacia una tubería externa en el fondo del tanque. El modelo calibrado reprodujo esta característica hidráulica, cuando se observó que el fluido que salió del vertedero a través de los vectores de velocidad circundó inmediatamente la periferia de la descarga en la dirección de los agujeros (sentido de las agujas del reloj) y posteriormente se dirigió hacia la capa más profunda [11] tal como se muestra en la Figura 6.



**Figura 6:** Vectores de velocidad en la capa superficial en el 3er vertedero y la descarga final del modelo tanque.

## Conclusiones

Los modelos matemáticos computacionales son un método práctico y útil para reproducir las condiciones o fenómenos de flujo axial, advectivo y reverso que ocurren en un sistema a escala real en reactores circulares. La similitud geométrica, dinámica y cinemática y los vectores de velocidad demostraron las zonas de conflicto y con velocidades diferentes a la promedio. Los tanques con anillos concéntricos promueven el flujo pistón y la remoción de materia orgánica a través de la sedimentación física. En este estudio se determinó que la escala por incremento o disminución de la geometría para la generación de malla de elementos finitos no es una limitante.

## Referencias bibliográficas

1. Aldana, G. y Pérez, J. "Simulación del patrón de flujo y del tiempo de retención hidráulico en lagunas de estabilización y reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA) a través de un modelo físico".

Revista Técnica de Ingeniería. Vol. 33 No 1, (2010). 48-58.

2. Aldana, G. J. "Hydraulic behavior and performance improvement of waste stabilization ponds using a computational fluid dynamic and physical model". Ph.D Thesis Dissertation University of Surrey, UniS, UK, (2004). 264-290.
3. Pedrique, F.; Aldana, G.; Rincón, N. y Bracho, N. (2007) "Uso de un reactor experimental concéntrico anaeróbico a flujo pistón para el tratamiento de efluentes cerveceros". Revista. Técnica de Ingeniería, Edición Especial, (2007). 36-47.
- 4.- Aldana, G. y Bracho, Nibis. "Simulación y predicción de la hidrodinámica en las lagunas de estabilización de LUZ utilizando un modelo computacional en 3D". Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia, Vol. 28, N° 1 (2005). 86-94.
5. Yabani, M. "A study of the hydraulic behavior of waste stabilization pond using a physical model". M.Sc. Thesis Center for Environment Health Engineering (CEHE), University of Surrey, UniS, UK (2002).
6. Zeng, Y., Mu, S., Lou, S. Tartakovsky, B., Guiot, P., Wu, P. "Hydraulic modeling and axial dispersion analysis of UASB reactor". Biochemical Engineering Journal, Vol. 25 (2005). 113-123.
7. Thomann, R. and Muller, J. "Principles of Surface Water Quality Modeling and Control". HarperCollinsPublishers Inc. USA (1987). 69-81.
8. Guganesharajah, R.K. "Numerical Aspects of Computational Hydraulic and Water Quality Models for Rivers, Estuaries, Reservoirs and Aquifers with particular reference to WSP". Ph.D Thesis Dissertation University of Surrey UniS, UK (2000). Chapter 5,45-97.
9. Fox, R and McDonald, A. "Introducción a la mecánica de fluidos" Segunda edición. Grupo Impresa, SA de C.V, México. (1993). 276-318.
10. Fuenmayor, J. "Simulación de la Hidrodinámica de un Tanque de Anillos en 3D". Tesis Ingeniería Química. Universidad del Zulia LUZ, Venezuela (2012). 58-79.
11. Ferziger, J.H, and Peric M. "Computational Methods for Fluid Dynamics" Second Edition Springer, Germany (1999). Chapter One, 3-20.

Recibido el 25 de Marzo de 2014

En forma revisada el 30 de Noviembre de 2015