

XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje

“DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA Y TIEMPO DE RESIDENCIA EN UN TANQUE DE TECHO USADO EN EL SUMINISTRO DE AGUA INTERMITENTE”

Velitchko G. Tzatchkov (1), Rubén Darío Hernández López (2)

(1) Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mor., México. +52 (777) 3 29 36 00, ext. 898, velitchk@tlaloc.imta.mx.

(2) Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ingeniería Hidráulica, Campus Morelos, Jiutepec, Mor., México. +52 (777) 3 29 36 00, ext. 135, ruben.dario.hl@gmail.com.

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados de un estudio en curso sobre la mezcla y el tiempo de residencia del agua en tanques de techo y su consideración en los modelos de redes de distribución de agua. Con un tanque de techo tamaño real de capacidad 1100 litros, se realizaron pruebas en la que se ingresa instantáneamente un trazador en la entrada del flujo. Se utilizó la mecánica de fluidos computacional (CFD) para conocer el modelo de flujo y el campo de concentración en el tanque, mediante el empleo del paquete de modelación PHOENICS.

Palabras claves: Suministro de agua intermitente, tanques de techo, mezcla, tiempo de residencia, modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD)

ABSTRACT

This paper presents the results of an ongoing study on the mixing and residence time of water in roof tanks and its consideration in water distribution network models. A tank real size 1100 liters, were tested in which instantly enters a tracer in the inflow. We used Computational Fluid Dynamics (CFD) for the flow model and the concentration camp in the tank, through the use of PHOENICS modeling package.

Keywords: Intermittent water supply, roof tanks, mixing, residence time, Computational Fluid Dynamic (CFD)

SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

Autor 1: Ingeniero Civil por el Instituto Superior de Ingeniería Civil y de Arquitectura, Sofía, Bulgaria. Doctorado en Hidráulica por el Instituto de Hidrotecnia, Riego y Drenaje, Sofía, Bulgaria. Empleo actual: Especialista en Hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Empleos anteriores: Asesor del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, La Habana, Cuba; Investigador en el Instituto Superior de Ingeniería Civil y de Arquitectura (VIAS), Sofía, Bulgaria. Autor de más de 150 artículos en revistas y congresos, y 14 libros. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (México). Premio Nacional de Ingeniería Civil (México) en dos ocasiones, Premio del mejor artículo teórico publicado en ASCE Journal of Water Resources Planning and Management 2002, y otros premios. Líneas de trabajo: Hidráulica Urbana, Control de pérdidas de agua potable, Modelación y diseño de redes de agua potable, Sectorización de las redes, Transitorios hidráulicos.

INTRODUCCIÓN

El suministro de agua intermitente es común en muchos países en desarrollo, y actualmente en algunos países europeos (por ejemplo, España, Italia, Malta y Chipre). Para tener agua en sus casas todo el tiempo, los usuarios instalan tanques privados que se llenan durante el tiempo en que se presta el suministro. Algunos usuarios tienen tanques privados, incluso cuando el suministro de agua es continuo. Dependiendo del tiempo de suministro y el uso del agua dentro de la casa, el agua puede residir mucho tiempo en los tanques, de horas a días, lo que causa decaimiento del desinfectante y afecta la calidad del agua. No se conocen estudios que describan estos efectos y que se consideren en los modelos de calidad del agua de red de distribución. Los programas conocidos de modelación de red de distribución tales como EPANET incorporan modelos de mezcla y de decaimiento en depósitos de agua idealizados conectados a la red, tales como el modelo de mezcla completa, el modelo de flujo a pistón, y así sucesivamente, que pueden no describir adecuadamente la realidad de la mezcla de los tanques de techo. Información publicada en el marco del Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores (PIGOO, 2010), muestra que en el 2010 el 72.6% de los hogares en México cuentan con servicio continuo de agua potable. El resto que son más de 30 millones de usuarios, reciben el agua intermitentemente o por tandeo. El suministro por tandeo conduce a pérdidas de presión en la red de distribución, lo cual está asociado con la contaminación (Vairavamoorthy y Mansoor, 2006), debido a que se puede presentar presión hidráulica negativa o inversa, que puede succionar patógenos a partir de las fisuras de la red (Lee y Schwab, 2005). Todos estos problemas en las redes de distribución de agua potable se agravan más en los tanques de almacenamiento que de forma directa afectan a la salud pública. La contaminación microbiológica en los tanques de techo puede deberse también a microorganismos suspendidos en la atmósfera. Las partículas orgánicas e inorgánicas suspendidas pueden proporcionar a los microorganismos protección de los desinfectantes y proveer un sustrato disponible para la proliferación bacteriana, con lo que la sobrevivencia y desarrollo de los microorganismos depende de la materia orgánica disuelta en el agua. Los niveles normales de cloro que se mantienen en el sistema de distribución hasta las tomas domiciliarias son insuficientes en la activación de los microorganismos que ingresan

a la tuberías. Estos logran alcanzar los tanques de techo y establecen nichos en forma de capas biofílmicas. Los volúmenes de agua almacenados en tanques, se mezclan e intercambian lentamente con el agua que se distribuye en la línea de servicio. La estratificación del agua ocurre en algunas instancias debido al diseño de las entradas y salidas (Castro y Cristóbal, 2003). El fenómeno de mezcla en depósitos de abastecimiento de agua tiene un efecto directo en la calidad del líquido saliente, por la creación de zonas de mezcla pobre y la estratificación, que pueden tener efectos negativos en la salud pública (Mujal i Colilles et al., 2011). La distribución de tiempos de residencia de un fluido se determina comúnmente utilizando pruebas experimentales, mediante el empleo de trazadores o ensayos de líneas de flujo (Cánepa, 2004).

Este trabajo presenta los resultados de un estudio en curso sobre la mezcla, tiempo de residencia y el decaimiento del cloro en tanques de agua de techo y su consideración en los modelos de redes de distribución de agua. Con un tanque de tamaño real de capacidad 1100 litros instalado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelos, se realizaron pruebas con un trazador con el fin de comprobar la eficiencia de mezcla y el tiempo de residencia del agua dentro del tanque de techo, en función con tipo de entrada y con el caudal entrante. Las pruebas experimentales fueron comparadas con los obtenidos con los cuatro métodos idealizados del modelo de EPANET, con el desarrollo analítico de mezcla completa y con el código comercial CFD de PHOENICS, el cual Martínez et al., (2010) lo consideran como la mejor herramienta para analizar y predecir la calidad del agua en tanques de almacenamiento.

BASE CIENTÍFICO - TEÓRICA

EPANET usa cuatro tipos de modelos de mezcla idealizados para tanques de almacenamiento, estos modelos son: Mezcla completa, mezcla de dos compartimentos, flujo pistón FIFO (por sus siglas en inglés significa primero que entra y primero que sale) y flujo pistón LIFO (por sus siglas en inglés significa último que entra y primero que sale) (Rossman, 2000).

Según Mau, et al., (1995) Las instalaciones de almacenamiento se pueden modelar usando la física, la escala, la base matemática de la hidrodinámica, o los modelos basados en sistemas matemáticos (modelos de balance de masa).

Despreciando el termino de decaimiento la concentración en el tanque, para un modelo tipo mezcla completa, puede resolverse analíticamente con la siguiente ecuación (Mau, et al., 1995):

$$C_T = \frac{V_{T0}C_{T0} + Q_{in}tC_{in}}{V_{T0} + Q_{in}t} \quad (1)$$

$$C_T = \left(\frac{V_{T0}}{V_{T0} + Q_{in}t} \right) C_{T0} + \left(\frac{Q_{in}t}{V_{T0} + Q_{in}t} \right) C_{in} \quad (2)$$

Donde C_T es la concentración en el tanque; V_{T0} es el volumen inicial en el tanque; C_{T0} es la concentración inicial en el tanque; C_{in} es la concentración a la entrada del tanque; Q_{in} es el caudal de entra al tanque; y t es el tiempo .

Según Martín-Domínguez, et al., (2005) el tiempo medio de residencia teórico, \bar{C} , está dado por:

$$\bar{C} = V/Q \quad (3)$$

donde V , es el volumen del tanque y Q es el caudal constante que circula por el tanque.

El tiempo de residencia promedio, μ , después de la entrada de un trazador instantáneamente al tanque, está definido por:

$$\mu = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \approx \frac{\sum tC(t)\Delta t}{\sum C(t)\Delta t} \quad (4)$$

donde $C(t)$ es la evolución de la concentración en el tiempo.

La función de distribución del tiempo de residencia normalizado $E(t)$ es:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad (5)$$

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = 1 \quad (6)$$

Considerando datos medidos se tiene que:

$$\int_0^{\infty} C(t)dt = \sum_{i=1}^{i_{max}-1} \left[\frac{C(t_{i+1}) + C(t_i)}{2} \right] (t_{i+1} - t_i) \quad (7)$$

que representa el área por debajo de la curva de la distribución del tiempo de residencia medido.

Rossmann y Grayman (1999) muestran varias formulas empíricas desarrolladas en la industria de procesos químicos para estimar el tiempo de mezcla en tanques, donde el flujo de recirculación en el tanque permanece constante. Las siguientes son estas ecuaciones empíricas:

Tabla 1. Formulas empíricas del tiempo de residencia.

Autor	\bar{C}
Fossett y Prosser (1949)	$8D^2 / M^{\frac{1}{2}}$
Van de Vusse (1959)	$9D^2 / M^{\frac{1}{2}}$
Fox y Gex (1956)	$\frac{KH^{\frac{1}{2}}D}{R^{\frac{1}{2}}M^{\frac{2}{3}}g^{\frac{1}{6}}}$
Okita y Oyama (1963)	$4.6H^{\frac{1}{2}}D^{\frac{3}{2}} / M^{\frac{1}{2}}$

donde D , es el diámetro del tanque; $M=vQ$, en la que M , es el momento del caudal de entrada al tanque y v , es la velocidad; H , es el nivel del agua en el tanque; R , es el número de Reynolds (mayor que 5,000); K , es una constante adimensional, y; g , es la constante gravitacional.

METODOLOGÍA

Se construyó un sistema de depósitos de agua patrocinado por la Coordinación de Hidráulica y la Subcoordinación de Hidráulica Urbana del Instituto Mexicano del Agua (IMTA). Las pruebas se realizaron en el laboratorio de hidráulica de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, campus Morelos, localizado dentro de las instalaciones del IMTA. En la figura 1 se ilustra el sistema de depósitos donde se hicieron las pruebas experimentales.

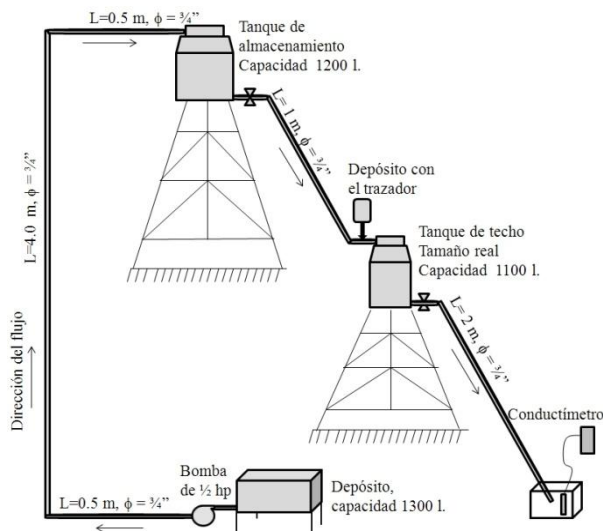


Figura 1. Sistema de depósitos.

El sistema de depósitos funciona de la siguiente forma: Se llenan el tanque de techo hasta 1047 litros y el tanque de almacenamiento con agua proveniente del depósito. Cuando el caudal de circulación es constante, se aplica la solución salina de forma instantánea al flujo de entrada y se mide inmediatamente los Sólidos Disueltos Totales (SDT), a la salida del tanque con un equipo multiparámetro (Conductímetro). Las mediciones finalizaron cuando la concentración medida es igual a la concentración inicial dentro del tanque.

Se realizaron dos pruebas con diferentes caudales: La primera prueba se realizó con un caudal constante de 0.5 l/s, volumen de agua dentro del tanque 1047 l, concentración inicial de SDT dentro del tanque 138 mg/l. Para esta primera prueba se disolvió 100 mg de cloruro de sodio o sal común en un litro de agua, la cual fue ingresada instantáneamente al flujo de entrada del tanque de techo. La segunda prueba se realizó con un caudal de 0.089 l/s, volumen de agua dentro del tanque 1047 l, concentración inicial de SDT dentro del tanque 138 mg/l. La solución salina, igual cantidad que la prueba anterior, se ingresó al flujo de entrada de forma instantánea.

La metodología propuesta para este trabajo en la que se aplica al modelo de flujo y al campo de concentración una sustancia conservativa dentro del tanque de techo fue con el fin de determinar la mezcla y el tiempo de residencia. Se utilizó la mecánica de fluidos computacional (CFD) para conocer el modelo de flujo y el campo de concentración en el tanque, mediante el empleo del paquete de modelación PHOENICS, se

determinó el movimiento del agua y se definieron los parámetros que representan la evolución de las concentraciones en el interior del tanque, considerando diferentes patrones de intercambio de flujo. Por consiguiente, se analizó la mezcla mediante simulaciones que proporcionan el flujo y el campo de concentración en el interior del tanque. Similarmente con el código se analizó el tiempo de permanencia o de residencia del agua dentro del tanque de techo.

Se utilizó el programa de modelación de redes de distribución EPANET para la determinación de las concentraciones mediante la utilización de los cuatro modelos de mezcla. Se ingresó al programa de EPANET las condiciones particulares del experimento, así como los datos iniciales de las dos pruebas. Se utilizó el método propuesto por Iglesias, et al., (2006) para una simulación dinámica en la que se emplea un depósito de nivel variable con un sistema de válvulas para mantener la presión en la descarga de la tubería constante independientemente del nivel. Para el sistema de la figura 2 se utilizó un depósito; una válvula sostenedora de presión (nodo 4), para mantener una presión constante a la entrada superior del tanque; se utilizó una válvula de retención para impedir el retorno del agua; se utilizó un reservorio (nodo 2) como depósito del trazador con una concentración de 62630 mg/l; se puso un control en la tubería de salida del reservorio (link 2) para que esta se abra y se cierre en un lapso muy pequeño de tiempo para que el trazador se inyecte en forma instantánea; el depósito del nodo 1 tiene la carga suficiente para un caudal constante, donde el punto de vertido del depósito es en el nodo 12, y por lo tanto la altura del chorro de agua que descarga por la parte superior del tanque, es la diferencia de altura del nodo 12 y el nodo 3; en el nodo 4 (salida) se obtienen los resultados de las simulaciones.

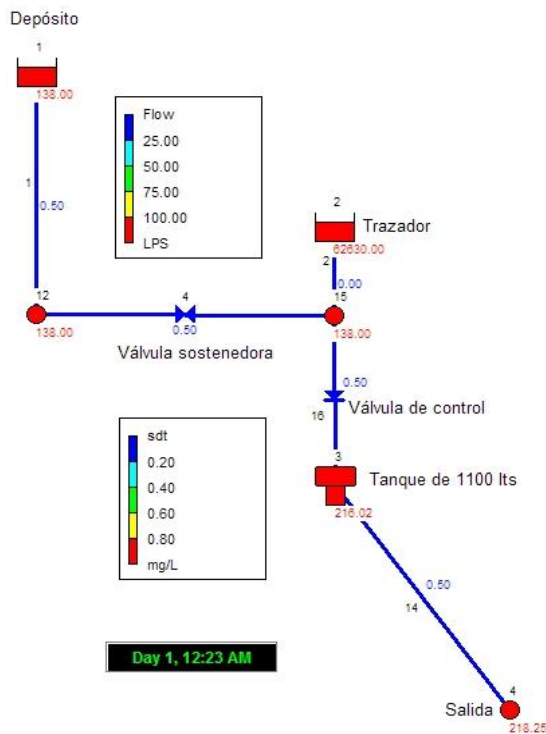


Figura 2. Configuración del sistema de depósitos en EPANET.

La solución analítica se resolvió con la ecuación (2) considerando que el compuesto que estamos utilizando como trazador es conservativo. El resultado de las dos pruebas experimentales fue comparado con los obtenidos en EPANET para mezcla completa.

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados para la primera prueba ($q=0.5$ l/s) mostraron que aplicando respectivamente las ecuaciones (3), (4) y (7), el tiempo medio de residencia teórico fue de 34.9 min., el tiempo de residencia promedio fue de 25.77 min, y el área bajo la curva fue de 2337 mg/min.l. Similarmente aplicando las mismas ecuaciones a los resultados de la segunda prueba ($q=0.089$ l/s), el tiempo medio de residencia teórico fue de 198.5 min., el tiempo de residencia promedio fue de 82.41 min, y el área bajo la curva fue de 20449 mg/min.l.

En la figura 3 se graficaron los datos obtenidos en la primera prueba experimental ($q=0.5$ l/s) y se graficaron también el resultado obtenido con el método analítico de mezcla completa, así mismo se incluye el resultado con los cuatro modelos de mezcla en EPANET.

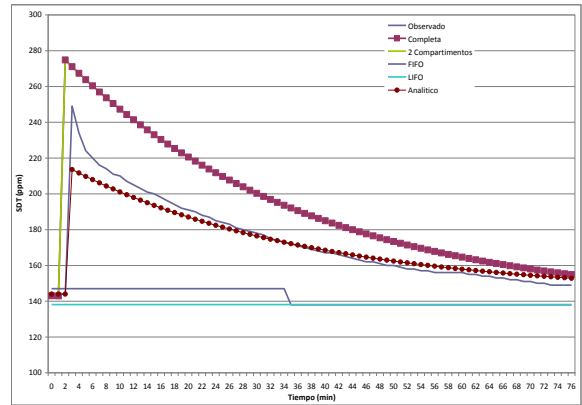


Figura 3. Resultados de SDT a la salida del tanque para un caudal de 0.5 l/s.

En la figura 4 se ilustra los resultados de la prueba 2 suponiendo que la mezcla dentro del tanque se comporta como mezcla completa, por lo tanto solo se muestra los resultados de los datos observados, mezcla completa de EPANET y analítico.

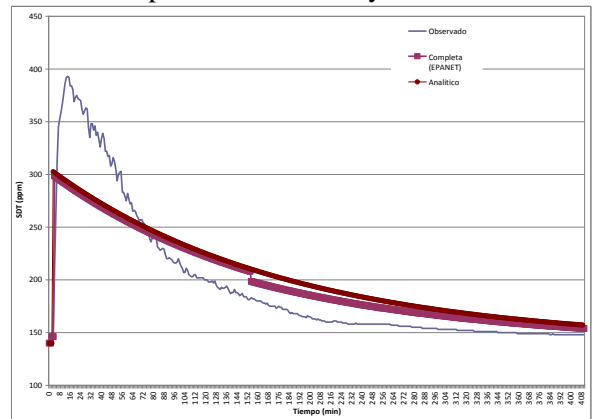


Figura 4. Resultado de SDT a la salida del tanque para un caudal de 0.089 l/s.

En la figura 5 y 6, respectivamente, se ilustra la distribución de velocidades para la prueba 1 y 2, las cuales fueron obtenidas con PHOENICS.

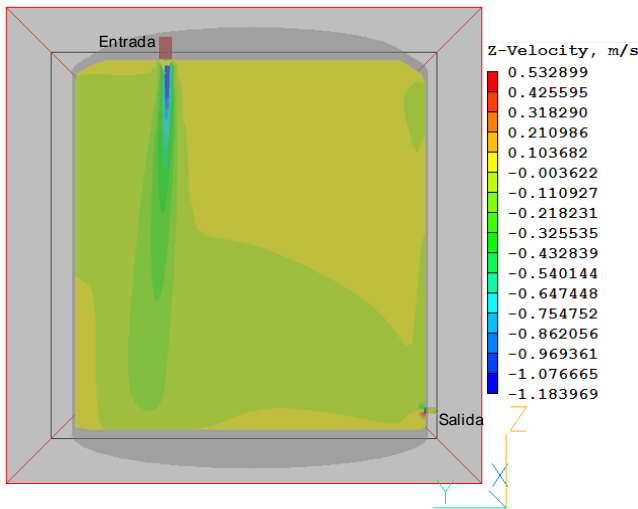


Figura 5. Distribución de velocidades en el plano Y-Z para un caudal de 0.5 l/s.

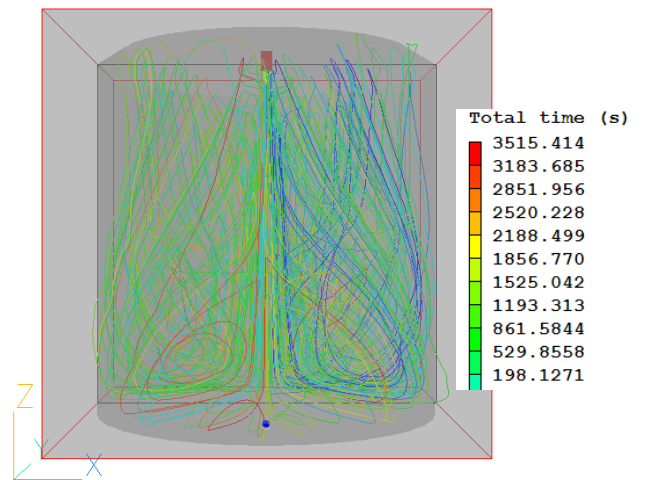


Figura 7. Tiempo de residencia en el plano X-Z para un caudal de 0.5 l/s.

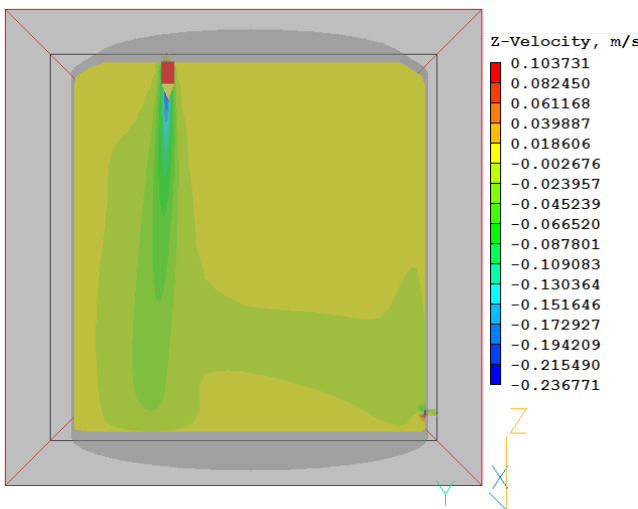


Figura 6. Distribución de velocidades en el plano Y-Z para un caudal de 0.089 l/s.

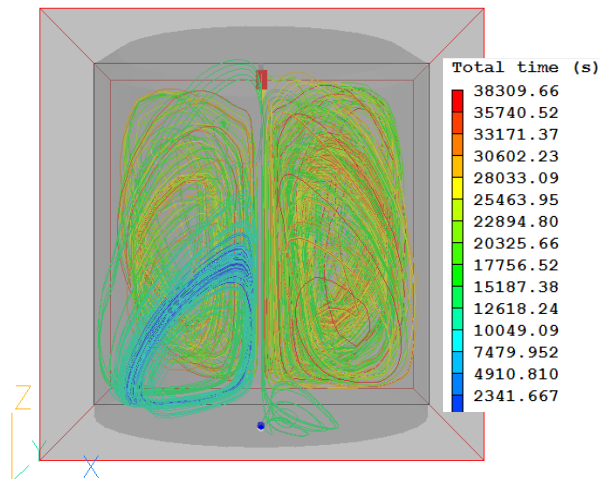


Figura 8. Tiempo de residencia en el plano X-Z para un caudal de 0.089 l/s.

También con PHOENICS se obtuvo que para la prueba 1 el tiempo máximo de residencia fue de 59 minutos y el tiempo medio fue de 31 minutos, ver figura 7. En la prueba 2 el tiempo máximo de residencia fue de 638.5 minutos y el tiempo medio de 338 minutos, ver figura 8.

Separadamente se obtuvo el tiempo de residencia resolviendo tres de la cuatro fórmulas empíricas de la tabla 1. En la tabla 2 se muestran estos resultados.

Tabla 2. Resultados empíricos del tiempo de residencia

Autor	τ_1 (min)	τ_2 (min)
Fossett y Prosser (1949)	6	33
Van de Vusse (1959)	7	37
Okita y Oyama (1963)	27	150

ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los resultados obtenidos con el experimento en las pruebas 1 y 2, el tiempo de residencia varió con el caudal de entrada y con el método utilizado. Para la prueba con un caudal mayor (0.5 l/s) el tiempo de residencia medio teórico, mediante la fórmula convencional, fue de 35 minutos, mientras que con el modelo PHOENICS fue de 31 minutos y con la fórmula de Okita y Oyama, fue de 27 minutos. En la prueba menor (0.089 l/s) el tiempo de residencia medio

teórico, con la fórmula convencional, fue de 198.5 minutos, con el modelo PHOENICS fue de 338 minutos y con la fórmula empírica de Okita y Oyama fue de 150 minutos.

Los resultados de la distribución de concentración mostró que el tipo de mezcla obtenido con los datos observados difieren del tipo de mezcla completa, tanto por el generado con la herramienta EPANET que con la fórmula analítica.

CONCLUSIONES

Las fórmula convencional y las fórmulas empíricas pueden ser utilizadas como referencia para conocer el tiempo de residencia de cierta sustancia en un tanque o reservorio, pero no son muy exactas debido a que cada depósito de almacenamiento tiene su propia configuración. La relación altura-diámetro puede influir en los tiempos, así como el caudal de entrada y la distribución espacial de la entrada y salida.

Según la distribución de velocidades para el tipo de configuración usada en el experimento se concluye que el tipo de mezcla producido no es de mezcla completa. Según los resultados con el modelo PHOENICS se forma una zona de transferencia muy marcada entre la entrada y salida, formando zonas muertas a los lados, la cual se reduce de acuerdo a mayor caudal de circulación.

RECOMENDACIONES, Y TRABAJO FUTURO

De acuerdo a las diferencias entre los métodos empleados, es necesario generar una fórmula empírica para el tiempo de residencia, así mismo desarrollar una ecuación propia, como la de mezcla completa, flujo a pistón o de varios compartimentos, que genere el tipo de mezcla adecuado en los tanques de techo más utilizados en México. Para esto se pretende realizar experimentos variando la configuración de entrada y salida, y usando un caudal de circulación constante y variable. En lugar de utilizar un trazador como la sal, se pretende usar cloro para conocer su decaimiento a través del tiempo, para esto se instalará un medidor de cloro en línea a la salida del tanque.

BIBLIOGRAFÍA

- Cánepa, L. (2004). "Tratamiento de Agua para Consumo Humano. Plantas de Filtración Rápida." Manual III: Evaluación de plantas de tecnología apropiada, CEPIS, Lima, Perú.
- Castro, N. y Chaidez C. (2003). "Riesgos Microbiológicos del Almacenamiento de Agua Potable en Tinacos." Agua Latinoamérica, Mayo/Junio.
- Christodoulou, S. y A. Agathokleous. (2012). "A Study on the Effects of Intermittent Water Supply on the Vulnerability on Urban Water Distribution Network," Water Science & Technology: Water Supply 12 (4), pp. 523-530.
- Cobacho, R., Arregui, F., Cabrera, E. y E. Cabrera Jr. (2008). "Private Water Storage Tank: Evaluating their Inefficiencies" International Journal Water Practice and Technology, 3 (1).
- De Marchis, M., Fontanazza, C. M., Freni, G., La Loggia, G., Napoli, E., y V. Notaro. (2011). "Analysis of the Impact of Intermittent Distribution by Modeling the Network-Filling Process." Journal of Hydroinformatics, 13 (3), pp. 358-373.
- Rizzo A. y J. Cilia. (2005). "Quantifying Meter Under-registration Caused by the Ball Valves of Roof Tanks (for indirect plumbing systems)." Proceedings of the Leakage, Halifax, Canadá, pp. 1-12.
- Iglesias, P. L., Martínez, F. J., Fuentes, V. S., y R. Pérez. (2006, Junio 5) "Representación de Diferentes Tipologías de Depósitos Mediante el Modelo EPANET". VI SEREA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua, Joao Pessoa, Brasil.
- Lee, E. y K. Schwab. (2005). "Deficiencies in Drinking Water Distribution Systems in Developing Countries." IWA, Journal of Water and Health, 3(3), pp. 109-127.

Martin-Dominguez, A., Tzatchkov, V. G., Martin-Dominguez, I. R., y D. F. Lawler. (2005, November). "An Enhanced Tanks-in-Series Model for Interpretation of Tracer Test." Journal of water Supply: Research and Technology -AQUA, 54 (7), pp. 435-448, IWA Publishing.

Martínez-Solano, F. J., Iglesias, P. L., Gualtieri, C., y P. A. Lopez-Jiménez. (2010). "Modelling Flow and Concentration Field in Rectangular Water Tanks." International Congress on Environmental Modelling and Software, Modelling for Environment's Sake, iEMSs, Fifth Biennial Meeting Ottawa, Canada, pp. 1-10.

Mau, R. E., Boulos, P.F., Clark, R. M., Grayman, W. M., Tekippe, R. J., y R. R. Trussell. (1995). "Explicit Mathematical Models of distribution Storage Water Quality," J. Hydraul. Eng., 121 (10), pp. 699-709.

Mujal i Colilles A., Bateman-Pinzón A. y V. de Medina-Iglesias. (2011). "Estudio Experimental de la Eficiencia de Mezcla en Depósitos de Abastecimiento de Agua." Tecnología y Ciencias del Agua II, (3), pp. 77-95.

Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, PIGOO. (2010). Promedio de tomas con servicio continuo. http://www.pigoo.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=21&Itemid=511,

Rossman, L. A. y M. W. Grayman. (1999). "Scale-model Studies of Mixing in Drinking Water Storage Tanks." J. Env. Eng, 125 (8), pp. 755-761.

Rossman, L. A. (2000). "EPANET 2, Users Manual." National Risk Management Research Laboratory, Office of research and Development, USEPA, EPA, Publication EPA/600/R-00/057, 200 p.

Vairavamoorthy, K. y M. Mansoor (2006). "Demand Management in Developing Countries." Water Demand Management. IWA Publishing, London, UK., pp. 180-214.