

Análisis transitorio del flujo tangencial en tanques horizontales con distintos deflectores

Transient analysis of the tangential flow in horizontal tanks with different deflectors

LIZARDI-RAMOS, Arturo†*, LÓPEZ-CALLEJAS, Raymundo, TERRES-PEÑA, Hilario y VACA-MIER, Mabel

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Delegación Azcapotzalco, C.P. 02200, Ciudad de México, CDMX, México

ID 1^{er} Autor: *Arturo, Lizardi-Ramos* / 7801325509

ID 1^{er} Coautor: *Raymundo, López-Callejas* / ORC ID: 0000-0001-9415-3435, CVU CONACYT ID: 213601

ID 2^{do} Coautor: *Hilario, Terres-Peña* / ORC ID: 0000-0001-7996-5734, CVU CONACYT ID: 98093

ID 3^{er} Coautor: *Mabel, Mier-Vaca* / ORC ID: 0000-0002-1341-7863, CVU CONACYT ID: 12369

Recibido 08 Marzo, 2018; Aceptado 12 Junio, 2018

Resumen

Se presenta el análisis numérico transitorio del flujo generado por la inyección tangencial de aire en un cilindro horizontal que contiene agua y cuya superficie superior está abierta a la atmósfera. El aire se introduce al tanque con una tobera y frente a ella se colocan tres tipos de deflector; con sección transversal circular, triangular y alabeada. El modelo matemático se describe con las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas polares cilíndricas en estado transitorio y se resuelve con el método numérico del elemento finito, a través del software COMSOL MULTIPHYSICS. Los resultados se muestran a través de los campos de velocidad transitorios que se generan en la sección transversal del recipiente, que coinciden con la inyección de aire en el contenedor; además se analiza el comportamiento de la velocidad azimutal a lo largo del diámetro del cilindro, para diferentes tiempos. Al comparar los resultados en estado permanente de los sistemas con deflector triangular y alabeado contra el circular se encontró que: a) el valor del vector velocidad en la parte superior izquierda del tanque disminuyó 1.09 y 18.59%, respectivamente; b) el valor máximo positivo de la velocidad azimutal a lo largo del diámetro del recipiente disminuyó 1.55 y 17.69%, respectivamente.

Flujo Tangencial, Velocidad Azimutal, Deflectores

Abstract

The transient numerical analysis of the flow generated by the tangential injection of air in a horizontal cylinder containing water, with its upper surface open to the atmosphere, is presented. The air is introduced into the tank with a nozzle and in front of it three types of deflectors are placed, namely, deflectors with circular, triangular, and bladed cross-section. The mathematical model is described with the Navier-Stokes equations in cylindrical polar coordinates in transient state; it is solved using the finite-element numerical method, through the COMSOL MULTIPHYSICS software. The results are displayed through the transient fields of velocity that are generated in the cross section of the container, which coincide with the injection of air in the container; also the behavior of the azimuth velocity along the diameter of the cylinder, for different times, is analyzed. When results in steady state of systems with triangular and bladed deflector were compared against the circular one, it was found that: a) the value of the velocity vector in the left upper part of the tank diminished 1.09 and 18.59%, respectively; (b) the maximum positive value of the azimuth velocity along the diameter of the container diminished 1.55 and 17.69%, respectively.

Tangencial Flow, Azimuth Velocity

Citación: LIZARDI-RAMOS, Arturo, LÓPEZ-CALLEJAS, Raymundo, TERRES-PEÑA, Hilario y VACA-MIER, Mabel. Análisis transitorio del flujo tangencial en tanques horizontales con distintos deflectores. Revista de Ingeniería Mecánica. 2018. 2-6: 1-11.

* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: arlr@correo.azc.uam.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Nomenclatura

C	calor específico (J/kg K)
C_d	coeficiente de arrastre
d_b	diámetro de burbuja (m)
\vec{F}	vector de fuerzas de cuerpo (N/ m ³)
g	aceleración gravitatoria (m/s ²)
k	conductividad térmica (W/m K)
m_{gl}	tasa de transferencia del gas (kgs/m ³)
M_w	peso molecular de burbuja de gas (kg/mol)
\vec{N}_g	vector flujo de masa de gas (kg/m ² s)
P	presión (Pa)
R	constante de gas ideal (J/mol K)
r	coordenada radial (m)
Re	número de Reynolds
T	tiempo (s)
T	temperatura (K)
u	componente de velocidad radial (m/s)
v	componente de velocidad tangencial (m/s)
\vec{V}_g	velocidad de la fase gas (m/s)
\vec{V}_l	velocidad de la fase líquida (m/s)
\vec{V}_{des}	velocidad de deslizamiento (m/s)
\vec{V}_{in}	velocidad del gas a la entrada (m/s)
w	componente de velocidad axial (m/s)
z	coordenada axial (m)
α	ángulo entre el eje y el álabe del impulsor (grados)
β	coeficiente de expansión volumétrico (K ⁻¹)
ρ_l	densidad del líquido (kg/m ³)
ρ_g	densidad de la fase gaseosa (kg/m ³)
ρ_{in}	densidad del gas a la entrada (kg/m ³)
μ_l	viscosidad dinámica de la fase líquida (kg/m s)
μ_T	viscosidad turbulenta (kg/m s)
θ	coordenada tangencial (rad)
ϕ_l	fracción de volumen líquido (m ³ /m ³)
ϕ_g	fracción de volumen de gas (m ³ /m ³)

Introducción

La inyección tangencial de gases en contenedores cilíndricos horizontales abiertos a la atmósfera es un fenómeno de gran interés debido a las aplicaciones industriales y de investigación involucradas. Tales aplicaciones van desde la inyección de aire, como en el convertidor Peirce-Smith (para la extracción de cobre), la inyección de gases en biorreactores, en sistemas de aireación, en tinas de hidromasaje médico-terapéutico o en lavadoras de inyección de burbujas [1].

Sin embargo, aún no se cuenta con la suficiente información sobre los parámetros involucrados, tales como la duración del proceso de mezclado gas-líquido, los campos de velocidad generados por los fluidos involucrados, o la pérdida de cantidad de movimiento implicada en el fenómeno; todo lo anterior para casos específicos de configuración geométrica y de dirección del flujo.

En la actualidad los programas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), por sus siglas en inglés, han adquirido gran relevancia debido a la viabilidad de poder modelar fenómenos físicos complejos con gran precisión; además de que es una herramienta que permite reducir, de cierta forma, el costo y tiempo de experimentación. Esto es favorable ya que se consigue optimizar el proceso involucrado e incluso adicionar nuevas herramientas que incrementen la eficiencia y de nuevo reduzcan los gastos de investigación y desarrollo.

El objetivo de este trabajo es determinar los campos de velocidad transitorios generados por la inyección tangencial de aire en un cilindro horizontal que contiene agua y cuya superficie superior está abierta a la atmósfera. Además, en la sección de entrada del aire, se colocan tres tipos de deflector: con sección transversal circular, triangular y alabeada. Para ello se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas polares cilíndricas, en estado transitorio, junto con las condiciones iniciales y de frontera adecuadas. Los resultados permiten obtener los campos de velocidad transitorios en la sección transversal del cilindro que coincide con la inyección de aire en el contenedor y el tipo de deflector empleado; así como el comportamiento de la velocidad azimutal (v) a lo largo del diámetro del cilindro para diferentes tiempos.

El problema ha sido abordado por diferentes investigadores, entre los trabajos más destacados se encuentran:

Valencia A., et al. [2], estudiaron numéricamente la dinámica de fluidos dentro de un recipiente con agua, con la geometría de un convertidor, debido a la inyección de aire provocada por una tobera sumergida.

La simulación tridimensional, dependiente del tiempo, se llevó a cabo con un modelo de volumen de fluido (VOF) y con el modelo de turbulencia estándar $k-\epsilon$, utilizando el software Fluent de CFD. Se hizo un análisis experimental del fenómeno con un tanque lleno de agua. Se compararon los resultados numéricos y experimentales de la velocidad de entrada del aire en el tanque que produce los resultados más favorables respecto a una buena mezcla en el recipiente con un mínimo de salpicaduras.

Real C., et al. [3], caracterizaron un convertidor con inyección de aire en el fondo, por medio de simulación numérica en 3D, utilizando el software Fluent. En el planteamiento del problema se contemplaron las ecuaciones de Navier-Stokes en flujo transitorio, para múltiples velocidades de inyección de aire, y en condiciones isotérmicas. En la simulación se utilizó el modelo $k-\epsilon$ de flujo turbulento para modelar la transferencia de cantidad de movimiento en el cilindro.

En dicho trabajo se encontró que a medida que se aumentaba la velocidad del aire inyectado, se incrementaba la energía cinética de la mata de cobre de manera casi lineal. Se buscó maximizar la energía cinética de la mata de cobre, evitando salpicaduras excesivas en el reactor. López C. y Barrón M. [4], analizaron por medio de la dinámica de fluidos computacional el flujo del fluido y la transferencia de masa dentro de un convertidor Peirce-Smith. En el trabajo se presenta la simulación trifásica (aire-escoria-cobre), en dos dimensiones, y con los rangos de velocidad de inyección de aire de 5 a 150 m/s.

Las simulaciones se llevaron a cabo en estado transitorio, y se estudió el caso de inyección lateral inclinada, determinando las condiciones apropiadas para reducir el desgaste del refractario del convertidor. Chibwe D. K. et al. [5], analizaron experimental y numéricamente el patrón de flujo y mezclado en un convertidor industrial Peirce-Smith, empleando un modelo en frío. Se llevaron a cabo simulaciones 2-D y 3-D del sistema de tres fases, utilizando el modelo de volumen de fluido (VOF) y el modelo de turbulencia $k-\epsilon$, para tener en cuenta la naturaleza multifásica y de turbulencia del flujo. La capa de mata y escoria fueron simuladas con agua y queroseno respectivamente.

La capa de escoria se tomó en cuenta debido a que crea una membrana en la superficie que ocasiona un fenómeno de recirculamiento. Los resultados revelaron que tanto la tasa de flujo volumétrico del aire como la presencia de la capa de escoria superpuesta tienen efectos profundos sobre la eficiencia de mezcla del convertidor. Morales D. [6], empleó simulación numérica por medio de Fluent para realizar un estudio hidrodinámico de un convertidor Peirce-Smith, introduciendo en el convertidor perfiles geométricos que fungen como difusores estáticos y que proporcionan a la mata de cobre un mezclado más homogéneo. Se verificó la factibilidad de la propuesta y se dejó abierta la posibilidad de ampliar la investigación y las áreas de implementación.

En el estudio se concluyó que la formación de remolinos cerca de las paredes del material cerámico, del que está hecho el convertidor, reduce la eficiencia del mezclado, y acelera el desgaste del material del convertidor. Se propone un diseño de perfil aerodinámico que no provoque cambios de velocidades drásticos y por consiguiente fricción que erosione el material del que esté fabricado.

Modelo físico

El sistema a analizar consiste en un contenedor cilíndrico horizontal de radio $R1 = 100$ mm y longitud $L1 = 100$ mm. La parte superior de tanque se encuentra abierta a la atmósfera a través de una abertura de ancho $L2 = 28.2$ mm y a todo lo largo del recipiente.

Para introducir radialmente el aire al sistema se colocó una tobera de radio $R2 = 2$ mm ubicada a la mitad de la longitud del cilindro y a un ángulo de $\theta1 = 225^\circ$, Fig. 1 y 2. Para distribuir el aire en el interior del tanque se colocaron deflectores de sección transversal: circular de radio $R3 = 5$ mm; triangular de lado $L3 = 8.66$ mm; y de perfil alabeado de radio $R4 = 5$ mm con longitud de $L4 = 18.90$ mm, Fig. 3. Los deflectores se colocaron frente a la tobera a una distancia radial de $R5 = 97$ mm, respecto a su borde exterior.

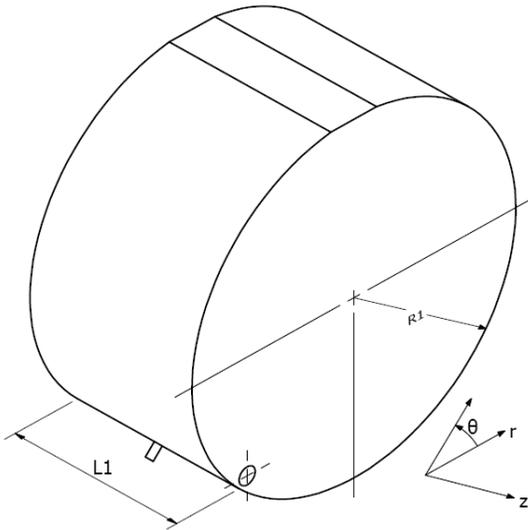


Figura 1 Vista en 3D del modelo físico
Fuente: Elaboración Propia

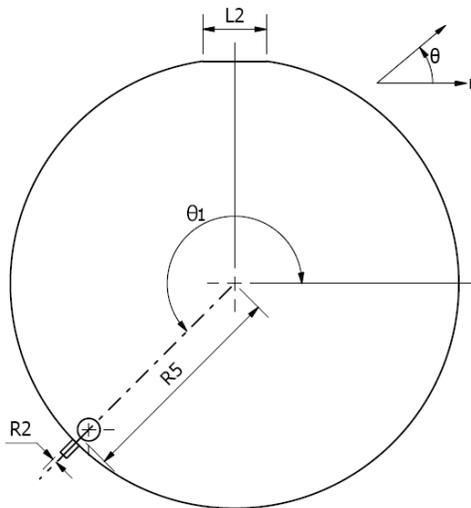


Figura 2 Vista en 2D del modelo físico
Fuente: Elaboración Propia

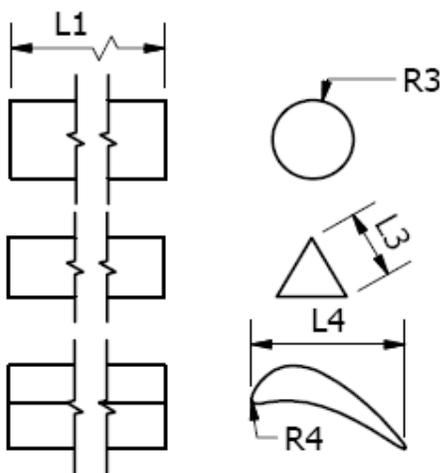


Figura 3 Deflectores empleados
Fuente: Elaboración Propia

Planteamiento matemático

Las expresiones que describen el movimiento transitorio de un fluido Newtoniano, viscoso, en régimen turbulento, bifásico, en el interior de un depósito cilíndrico, son las ecuaciones de continuidad y conservación la cantidad de movimiento de Reynolds-Navier-Stokes para flujo turbulento (RANS, por sus siglas en inglés) [1], [7].

Ecuación RANS para la fase líquida:

$$\begin{aligned} & \phi_1 \rho_1 \frac{\partial \vec{V}_1}{\partial t} + \phi_1 \rho_1 \vec{V}_1 \cdot \nabla \vec{V}_1 \\ & = -\nabla P + \nabla \left[\phi_1 (\mu_1 + \mu_T) (\nabla \vec{V}_1 + (\nabla \vec{V}_1)^T) \right] \\ & + \phi_1 \rho_1 \vec{g} + \vec{F} \end{aligned} \quad (1)$$

Para bajas concentraciones de gas, la fracción de volumen líquido ϕ_1 es aproximadamente uno, entonces:

$$\rho_1 \nabla \vec{V}_1 = 0 \quad (2)$$

La ecuación RANS para la fase gaseosa es:

$$\frac{\partial \rho_g \phi_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \phi_g \vec{V}_g) = -m_{g1} \quad (3)$$

Como aproximación, se considera que no hay transferencia de masa entre la fase líquida y gas, por lo que $m_{g1} = 0$. La ecuación (3) queda de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \rho_g \phi_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \phi_g \vec{V}_g) = 0 \quad (4)$$

La densidad del gas se calculó a partir de la ley de gas ideal:

$$\rho_g = \frac{PM_w}{RT} \quad (5)$$

Donde M_w es el peso molecular de la burbuja de gas, $R = 8.314 \text{ J/mol K}$ es la constante de gas ideal y $T = 293 \text{ K}$ la temperatura del gas.

La velocidad del gas se puede calcular a partir de la ecuación $\vec{V}_g = \vec{V}_1 + \vec{V}_{des}$, donde \vec{V}_{des} es la velocidad de deslizamiento entre el agua y el aire. El balance presión-arrastre se emplea para calcular \vec{V}_{des} . El modelo se basa en la suposición de que las fuerzas de presión de las burbujas se equilibran con la fuerza de arrastre:

$$\frac{3C_d}{4d_b} \rho_l |\vec{V}_{des}| \vec{V}_{des} = -\nabla P \quad (6)$$

Donde $d_b=0.001$ m es el diámetro de la burbuja y C_d es el coeficiente de arrastre (adimensional). Debido a que el diámetro de burbuja es inferior a 0.002 m, se usó el modelo de coeficiente de arrastre de Hadamard-Rybczynski:

$$C_d = \frac{16}{Re} \quad (7)$$

dónde:

$$Re = \frac{d_b \rho_l |\vec{V}_{des}|}{\mu_l} \quad (8)$$

Para las condiciones de frontera se asumió en las paredes del tanque y del deflector la condición de no deslizamiento $\vec{V}_1=0$. A la entrada, el flujo de gas es $-\vec{n} \cdot \vec{N}_g = \vec{V}_{in} \cdot \rho_{in}$ donde $-\vec{n}$ es un vector normal a la sección de entrada que “apunta” al interior del tanque. \vec{V}_{in} y ρ_{in} son la velocidad y densidad del gas a la entrada con valores 0.1 m/s y 0.973 kg/m³, respectivamente. Por otro lado, a la salida del gas se consideró la condición de deslizamiento $\vec{n} \cdot \vec{V}_1=0$, la cual predefine la condición de no penetración del fluido pero si del gas.

Las ecuaciones (1) y (4) se resuelven para las variables \vec{V}_1 y P. El campo de velocidades \vec{V}_1 posee tres componentes: la velocidad radial u, la velocidad tangencial o azimutal v y la velocidad axial w.

Tratamiento numérico

Para resolver las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido en el interior del sistema (1) y (4) junto con las condiciones iniciales y de frontera, se empleó el software COMSOL *Multiphysics*, el cual es un programa de simulación multi-plataforma de análisis de elemento finito que permite hacer estudios convencionales basados en la física y en sistemas acoplados de ecuaciones diferenciales parciales. Para ello se utilizó la siguiente metodología [8]:

- Se selecciona en el software el tipo de análisis, en este caso: modelo en 3D.

- Se dibuja la geometría a analizar y se generan los elementos en el sistema. Para ello se dibujó un cilindro horizontal de 100 mm de radio por 100 mm de longitud, con una abertura en la parte superior de 28.2 mm de ancho a todo lo largo del recipiente. Para introducir el aire al sistema se dibujó una tobera de 2 mm de radio, ubicada a la mitad de la longitud del cilindro y a un ángulo de 225° respecto a la horizontal. Finalmente se generaron tres sistemas con deflectores de diferente sección transversal: uno circular de 5 mm de radio; uno triangular de 8.66 mm de lado; y uno con perfil alabeado de 5 mm de radio con 18.90 mm de longitud. Para el sistema con deflector de sección transversal circular se generaron 242146 elementos (Fig. 4); para el de sección transversal triangular se generaron 224310 elementos (Fig. 5), y para el de sección transversal alabeada se generaron 277150 elementos (Fig. 6). Con el número de nodos y elementos propuestos se satisfacen los criterios de estabilidad y de orden de precisión para los alcances del presente trabajo.
- Se introduce el valor de las propiedades de los fluidos, en este caso agua y aire, que permanecen constantes: viscosidad dinámica (μ), densidad (ρ), calor específico (C), coeficiente de expansión volumétrico (β) y conductividad térmica (k). La presión en el sistema se modela con el algoritmo de relajación (TDMA).

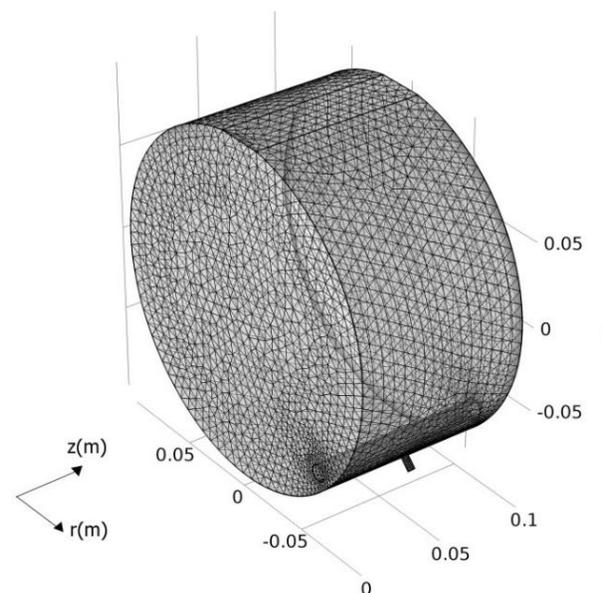


Figura 4 Malla para el sistema con deflector de sección transversal circular.

Fuente: Elaboración Propia

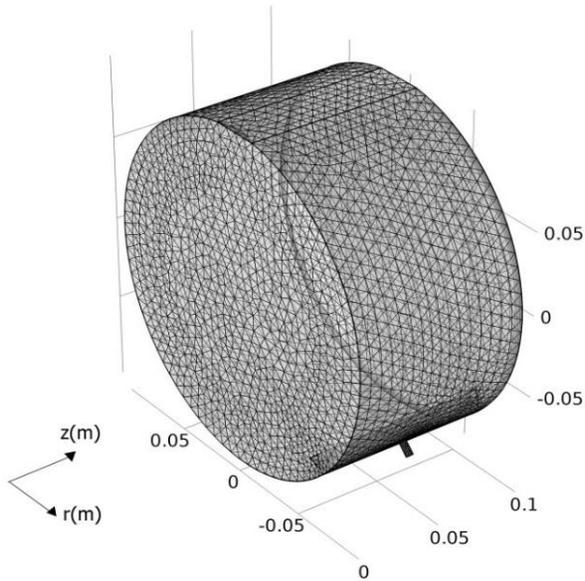


Figura 5 Malla para el sistema con deflector de sección transversal triangular.

Fuente: *Elaboración Propia*

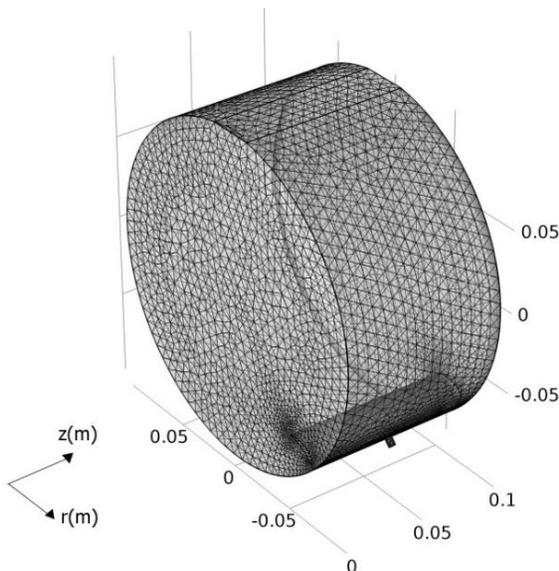


Figura 6 Malla para el sistema con deflector de sección transversal alabeada.

Fuente: *Elaboración Propia*

- d. Se introducen las condiciones de frontera y se da el valor de la velocidad de entrada del aire, en este caso $\vec{V}_{in} = 0.1$ m/s. La interfaz es resuelta con el código de: flujo burbujeante, turbulento y bifásico; que es el adecuado para resolver las ecuaciones descritas en este trabajo.
- e. Se corre el programa y se obtienen los valores transitorios de los campos del vector velocidad (\vec{V}_1) y de la componente de velocidad azimutal (v), en el plano axial que corta la entrada de flujo de aire.

Análisis y resultados

Una vez hecha la programación se llevaron a cabo las corridas para los tres tipos de deflector. El sistema se acotó con los siguientes valores: $L1 = 100$ mm, $L2 = 28.2$ mm, $L3 = 8.66$ mm, $L4 = 18.90$ mm, $R1 = 100$ mm, $R2 = 2$ mm, $R3 = 5$ mm, $R4 = 5$ mm, $R5 = 97$ mm, $\theta1 = 225^\circ$ y $\vec{V}_{in} = 0.1$ m/s. El programa se dejó correr hasta un tiempo de 10 min, pero se observó que a los 90 s se alcanzaba la condición de estado permanente.

Los campos del vector velocidad se muestran en las Figs. 7 a 15 para los tres casos y para los tiempos de 1 s, 10 s y 90 s. En ellas se indican algunos valores de la velocidad para ciertas posiciones constantes y para la sección transversal que coincide con el centro de la tobera.

Lo anterior con el objeto de comparar su magnitud al cambiar el tipo de deflector. Cabe mencionar que se está analizando el movimiento del fluido dentro del contenedor sin tomar en cuenta la concentración aire-agua que se tiene en el sistema, es decir, que el flujo de aire solo se toma en cuenta como generador del movimiento.

En la Fig. 7, sistema con deflector circular y tiempo 1 s, se observa que el aire se introduce al contenedor, se incorpora al agua, y bordea al deflector. El flujo que se dirige de lado izquierdo del mismo tiene un valor de 15.60×10^{-3} m/s, y el del lado derecho de 0.87×10^{-3} m/s.

En el tiempo de 10 s, Fig. 8, el movimiento producido en el recipiente forma un vórtice secundario en la parte superior del tanque.

En los bordes del cilindro se aprecia un movimiento circulatorio en sentido horario. La velocidad en la parte superior izquierda del contenedor es de 30.50×10^{-3} m/s.

Finalmente, en el tiempo de 90 s, Fig. 9, se observa un flujo rotatorio en sentido horario bien definido que abarca prácticamente todo el recipiente. La velocidad en la parte superior izquierda es de 45.70×10^{-3} m/s, ésta permanece constante después de este tiempo.

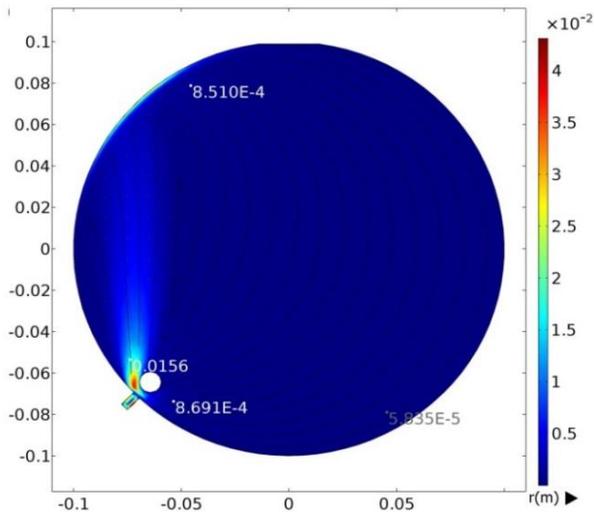


Figura 7 Campo de velocidades (\vec{V}_1) con deflector circular y $t = 1$ s.

Fuente: Elaboración Propia

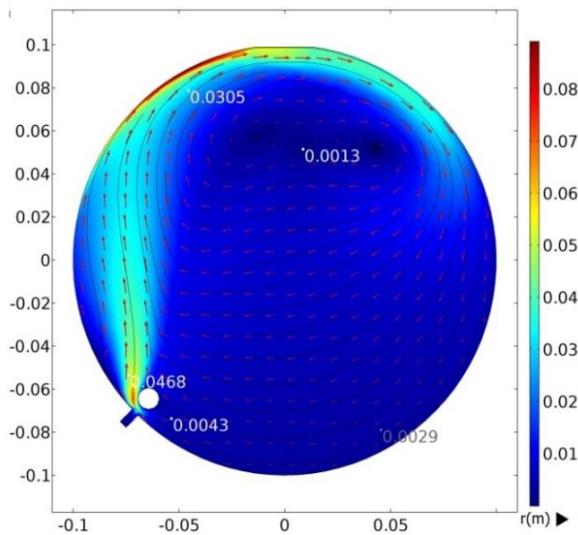


Figura 8 Campo de velocidades (\vec{V}_1) con deflector circular y $t = 10$ s.

Fuente: Elaboración Propia

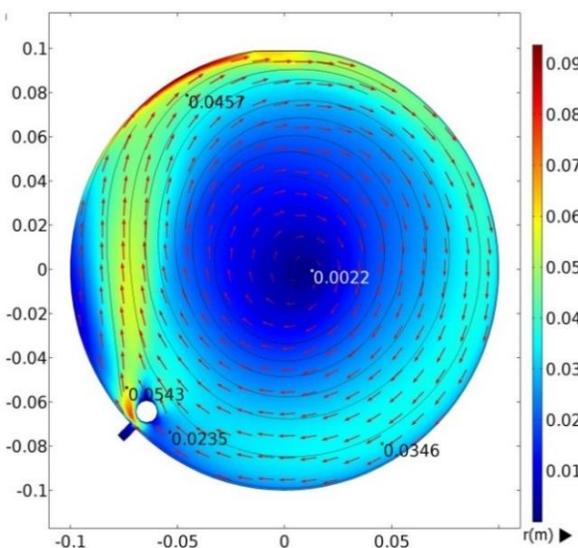


Figura 9 Campo de velocidades (\vec{V}_1) con deflector circular y $t = 90$ s

Fuente: Elaboración Propia

Para el caso del sistema con deflector triangular y tiempo 1 s, Fig. 10, se observa que, como en el caso anterior, la mezcla de aire-agua es dividida por el deflector. Una parte se va hacia izquierda del mismo tomando una velocidad de 12.30×10^{-3} m/s y el resto se va hacia la derecha con una velocidad de 0.756×10^{-3} m/s.

Para el tiempo de 10 s, Fig. 11, se ha formado un vórtice secundario cerca de la frontera del recipiente que está abierta a la atmósfera. El valor de la velocidad en la parte superior izquierda del tanque es de 28.9×10^{-3} m/s. Finalmente, para el tiempo de 90 s, Fig. 12, se aprecia un flujo circulatorio en sentido horario bien definido. Para este tiempo la velocidad en la parte superior izquierda del cilindro es de 45.2×10^{-3} m/s.

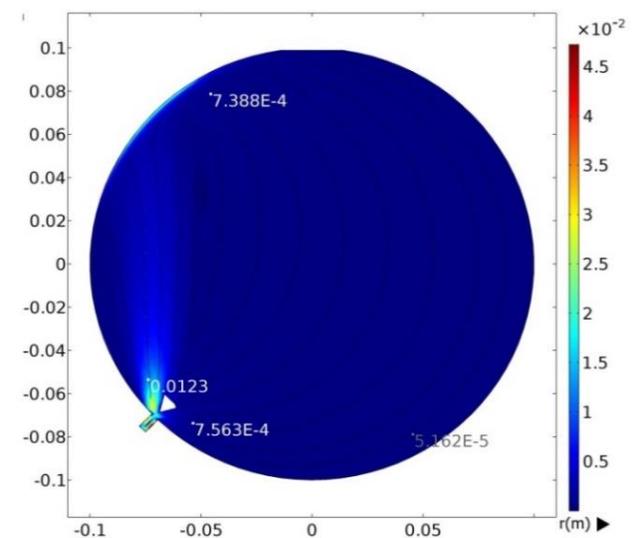


Figura 10 Campo de velocidades (\vec{V}_1) con deflector triangular y $t = 1$ s.

Fuente: Elaboración Propia

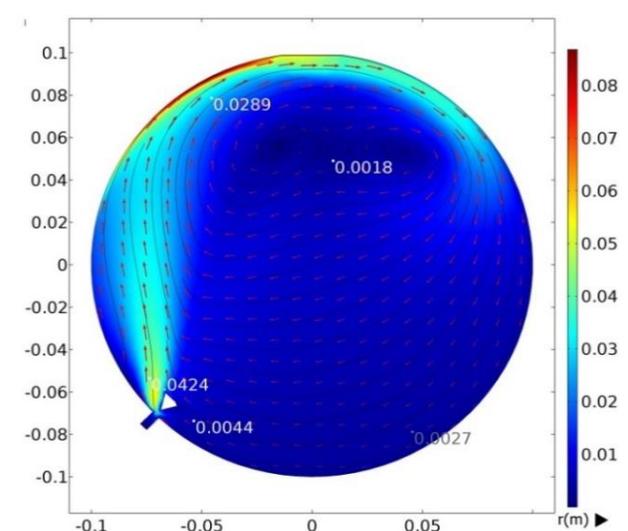


Figura 11 Campo de velocidades (\vec{V}_1) con deflector triangular y $t = 10$ s.

Fuente: Elaboración Propia

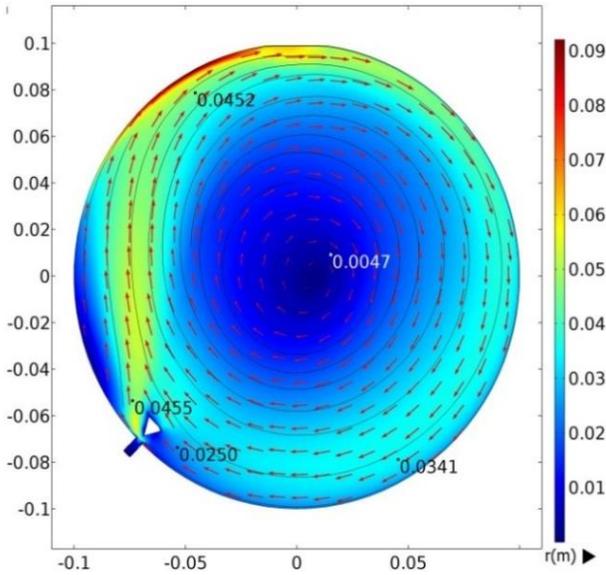


Figura 12 Campo de velocidades (\vec{V}_1) con deflector triangular y $t = 90$ s.
Fuente: Elaboración Propia

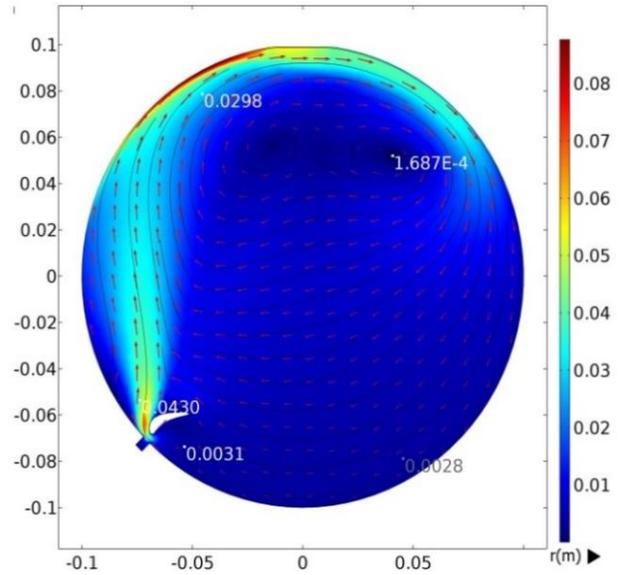


Figura 14 Campo de velocidades (\vec{V}_1) con deflector alabeado y $t = 10$ s.
Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, para el sistema con deflector alabeado se observa un comportamiento parecido a los casos anteriores pero con magnitudes distintas. Para el tiempo de 1 s, Fig. 13, el flujo en la parte izquierda del deflector toma una velocidad de 15.9×10^{-3} m/s y el de la parte derecha toma un valor de 0.758×10^{-3} m/s. Para el tiempo de 10 y 90 s, Fig. 14 y 15, la velocidad en la parte superior izquierda del recipiente es de 29.8×10^{-3} y 37.2×10^{-3} m/s, respectivamente.

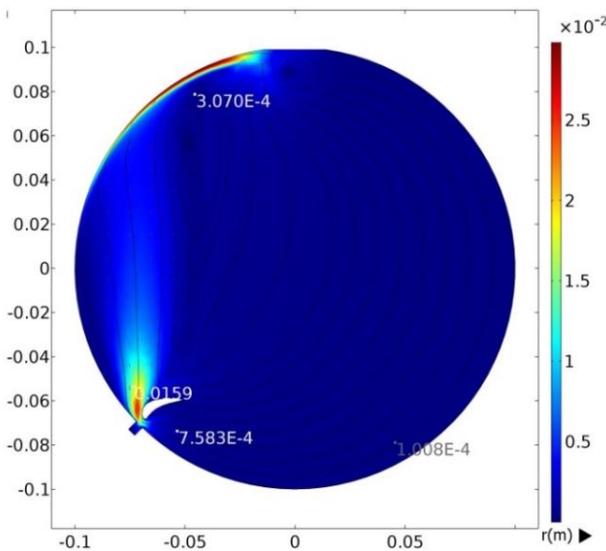


Figura 13 Campo de velocidades (\vec{V}_1) con deflector alabeado y $t = 1$ s.
Fuente: Elaboración Propia

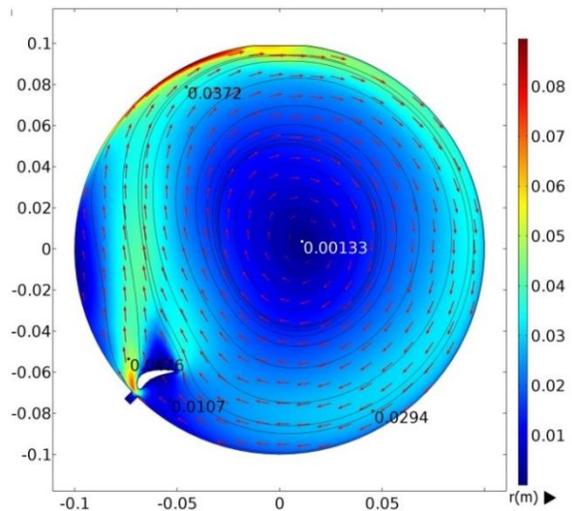


Figura 15 Campo de velocidades (\vec{V}_1) con deflector alabeado y $t = 90$ s
Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 1 se muestran a manera de resumen las magnitudes del vector velocidad (\vec{V}_1) para diferentes tiempos y posiciones. Para el tiempo de 1 s se indica la velocidad de lado izquierdo y derecho de los deflectores, y para los tiempos de 10 y 90 s se señala la velocidad en la parte superior izquierda del depósito.

Tpo.	Circular	Triangular	Alabeado
1 s	$+15.60 \times 10^{-3}$ $+0.869 \times 10^{-3}$	$+12.30 \times 10^{-3}$ $+0.756 \times 10^{-3}$	$+15.90 \times 10^{-3}$ $+0.758 \times 10^{-3}$
10 s	$+30.50 \times 10^{-3}$	$+28.90 \times 10^{-3}$	$+29.8 \times 10^{-3}$
90 s	$+45.70 \times 10^{-3}$	$+45.20 \times 10^{-3}$	$+37.2 \times 10^{-3}$

Tabla 1 Valores del vector velocidad (\vec{V}_1), m/s, para posiciones específicas en los tres sistemas.
Fuente: Elaboración Propia

Haciendo una comparación de los valores del vector velocidad, en la posición superior izquierda del recipiente, para el tiempo de 90 s, de los sistemas con deflector triangular y alabeado respecto al circular, se observó una disminución del 1.09 y 18.59 %, respectivamente.

Es decir que en esa parte del depósito se tiene una mayor velocidad cuando se coloca un deflector circular y una menor cuando se coloca un deflector alabeado.

Para hacer una comparación más precisa sobre el comportamiento del fluido en el depósito, se hicieron gráficas de la componente de velocidad azimutal (v) en la línea horizontal que va desde 0° hasta 180° , para los tiempos de 1, 10 y 90 segundos y para los tres deflectores.

En la Fig. 16, sistema con deflector circular, se observa que la curva de la componente de velocidad tangencial, en el tiempo 1 s, comienza en cero sobre la pared izquierda del depósito, posteriormente va aumentando su valor hasta un máximo positivo de 4.95×10^{-3} m/s y de allí baja su intensidad hasta hacerse cero. Después de este punto, la velocidad se mantiene prácticamente en el resto del sistema.

En este tiempo las magnitudes de la velocidad son bajas debido a que apenas comienza el movimiento del fluido en el contenedor. Para el tiempo de 10 s se aprecia que la velocidad toma un valor máximo positivo de 33.04×10^{-3} m/s, de lado izquierdo del depósito, y una magnitud máxima negativa de -6.95×10^{-3} m/s, de lado derecho del recipiente.

En este tiempo el flujo dentro del contenedor aún no alcanza el estado permanente, manifestándose una transferencia de cantidad de movimiento que genera un vórtice secundario.

Finalmente, en el tiempo de 90 s, se observa que la velocidad también toma dos valores máximos en el sistema, uno positivo de 50.94×10^{-3} m/s y otro negativo de -37.75×10^{-3} m/s. En este tiempo se ha alcanzado el estado permanente del flujo y se tiene un vórtice bien definido en el centro del cilindro.

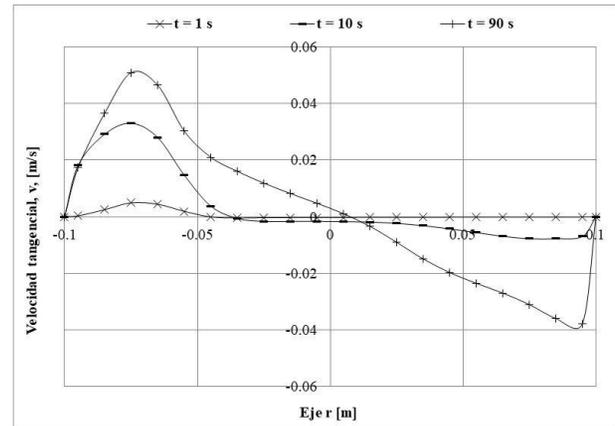


Figura 16 Componente de velocidad tangencial (v) para el sistema con deflector circular

Fuente: *Elaboración Propia*

En la Fig. 17, sistema con deflector triangular, se observa el mismo comportamiento del caso anterior, pero con valores distintos.

Para el tiempo de 1 s, la componente de velocidad tangencial comienza en cero sobre la pared izquierda del depósito y posteriormente va aumentando su magnitud hasta un máximo positivo de 4.44×10^{-3} m/s.

De allí baja su intensidad hasta hacerse cero y permanece constante hasta la pared del lado derecho del recipiente. Para el tiempo de 10 s se aprecian, como en el caso del deflector circular, dos valores máximos, uno positivo de 32.74×10^{-3} y uno negativo de -6.26×10^{-3} m/s.

Finalmente, para el tiempo de 90 s, en donde se ha alcanzado el flujo estacionario, también se observa que la velocidad toma dos magnitudes máximas en el cilindro, una positiva de 50.15×10^{-3} m/s y otra negativa de -36.96×10^{-3} m/s.

El sistema con deflector alabeado, Fig. 18, tiene el mismo comportamiento que los casos anteriores, pero con valores distintos. Las magnitudes máximas positivas y negativas de la componente de velocidad tangencial para los tres casos se muestran en la Tabla 2.

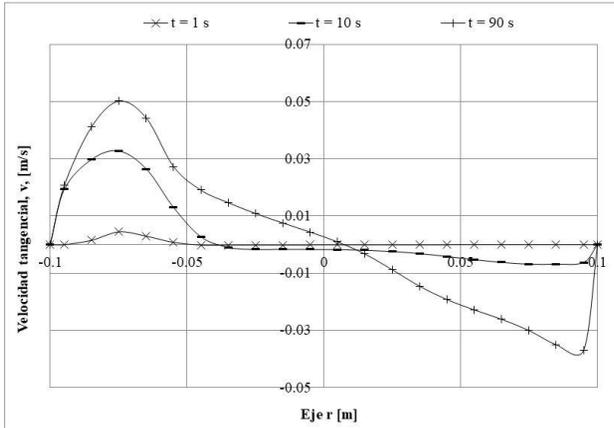


Figura 17 Componente de velocidad tangencial (v) para el sistema con deflector triangular.

Fuente: Elaboración Propia

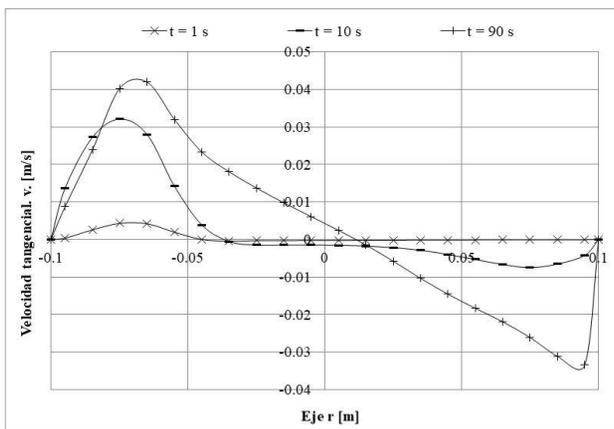


Figura 18 Componente de velocidad tangencial (v) para el sistema con deflector alabeado.

Fuente: Elaboración Propia

Tpo.	Circular	Triangular	Alabeado
1 s	$+4.95 \times 10^{-3}$	$+4.44 \times 10^{-3}$	$+4.29 \times 10^{-3}$
10 s	$+33.04 \times 10^{-3}$ -6.95×10^{-3}	$+32.74 \times 10^{-3}$ -6.26×10^{-3}	$+32.06 \times 10^{-3}$ -6.55×10^{-3}
90 s	$+50.94 \times 10^{-3}$ -37.75×10^{-3}	$+50.15 \times 10^{-3}$ -36.96×10^{-3}	$+41.93 \times 10^{-3}$ -33.45×10^{-3}

Tabla 2 Valores máximos de la velocidad tangencial (v), m/s, para los tres deflectores

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, en la Fig. 19, se presentan las gráficas de la componente de velocidad tangencial para los tres deflectores y para el tiempo de 90 s, que es cuando el sistema ha alcanzado el estado permanente. En ella se aprecia que la velocidad del flujo, del lado izquierdo del depósito, tiene los valores más altos. Lo anterior es debido a que en esa parte se encuentra la entrada de aire en el recipiente, quien es el que transmite la cantidad de movimiento al agua.

De lado derecho se observan magnitudes menores debido a que en esa parte solo está presente la recirculación del fluido. Comparando los valores máximos positivos de la componente de velocidad tangencial de los sistemas con deflector triangular y alabeado, respecto al circular, se encontró una disminución del 1.55 y 17.69 %, respectivamente. Es decir, el flujo con mayor intensidad se tiene con el deflector circular, seguido del triangular y por último el alabeado.

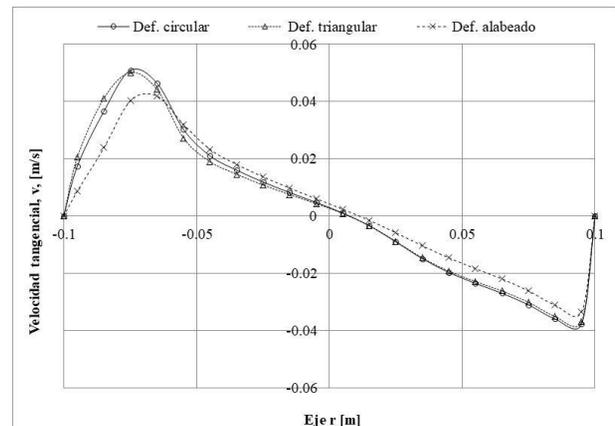


Figura 19 Componente de velocidad tangencial (v) para el tiempo t = 90 s y los tres deflectores.

Fuente: Elaboración Propia

Conclusiones

En este trabajo se determinó la distribución de velocidades transitoria generada por la inyección tangencial de aire en un contenedor cilíndrico horizontal que contiene agua, que está abierto a la atmósfera, y al cual se le colocaron deflectores de sección transversal: circular, triangular y alabeada, enfrente de la tobera. Se encontró que en los primeros segundos del fenómeno el flujo bordea a los deflectores, predominantemente en la zona lateral izquierda, provocando el movimiento del fluido en esa dirección.

Para el tiempo de 10 segundos se formó un flujo circulatorio en sentido horario alrededor del recipiente y se produjo un flujo secundario en la parte superior del tanque. Cuando el proceso alcanzó el estado permanente, el flujo secundario desapareció y se formó un movimiento circulatorio bien definido con su centro al lado derecho del centro geométrico, esto último ocasionado por la posición de la tobera que introdujo el aire al depósito.

Al analizar los campos del vector velocidad en la parte superior de los sistemas, en estado permanente, se encontró que el valor más alto fue el del contenedor con deflector circular seguido del triangular y el alabeado. Al comparar dichas magnitudes entre los recipientes con deflector del triangular y alabeado contra el circular se encontró una disminución del 1.09 y 18.59 %, respectivamente. Al examinar la gráfica en estado permanente de la componente de velocidad tangencial se observó, como en el análisis anterior, que el valor más alto fue el del sistema con deflector circular, seguido del triangular y el alabeado.

Al hacer una comparación de las magnitudes máximas positivas de la velocidad tangencial para los depósitos con deflector triangular y alabeado, respecto al circular, se encontró una reducción del 1.55 y 17.69 %, respectivamente. Los resultados anteriores indican que el deflector circular es el que tiene mejor desempeño en la distribución del movimiento del fluido en el interior del tanque, aunque la diferencia que hubo con el deflector triangular fue mínima.

La forma y la posición en que se colocó el deflector alabeado provocaron que en su parte posterior el movimiento del fluido fuera despreciable, causando que el flujo en el recipiente fuera menor que el de los otros dos casos. Aunque se logró un avance con este estudio, aún falta mayor análisis para considerar otras variables, tales como el cambio de la posición del deflector alabeado, otros rangos de velocidad y distintos tipos de fluido involucrados.

Referencias

[1] Al-Mashhadani M. K. H., Wilkinson S. J., Zimmerman W. B., (2015), Airlift bioreactor for biological applications with microbubble mediated transport processes, *Chemical Engineering Science*, Vol. 137, pp. 243-253, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2015.06.032>.

[2] Valencia A., Paredes R., Rosales M., Gody E., Ortega J., (2004), Fluid dynamics of submerged gas injection into liquid in a model of copper converter, *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, No. 1, pp. 21-30.

[3] Real C., Hoyos L., Cervantes F., Miranda R., Palomar M., Barron M., Gonzales J., (2007), Fluid characterization of copper converters, *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, Vol. XXVI, pp. 1311-1323.

[4] López C., Barrón M., (2007), Análisis numérico de la inyección de aire en un convertidor de cobre Peirce-Smith, 4° Congreso Internacional, 2do Congreso Nacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. 17 al 19 de Enero de 2007. Morelia, Michoacán, México. ISBN 978-84-96736-08-5.

[5] Chibwe D. K., Akdogan G., Aldrich C., Eric R. H., (2011), CFD Modelling of global mixing parameters in a Peirce-Smith converter with comparison to physical modelling, *Chemical Product and Process Modeling*, Vol. 6, Iss. 1, Article 22. DOI: 10.2202/1934-2659.1594.

[6] Morales D., (2011), Estudio hidrodinámico de un convertidor de cobre utilizando la técnica de Dinámica de Fluidos Computacional. Proyecto de Integración de Ingeniería Mecánica, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

[7] Tjonov, A. N., Samarsky, A. A., (1980), *Ecuaciones de la física matemática*, Edit. MIR, Moscú, pp. 1-29.

[8] Pryor, R. W., (2011), *Multiphysics Modeling Using COMSOL, A First Principles Approach*, Jones & Bartlett Learning.