

Flujo en el interior de un tanque vertical modificando el ángulo de inclinación de la flecha de agitación

Arturo Lizardi-Ramos, Raymundo López-Callejas, Hilario Terres-Peña, Sandra Chávez-Sánchez, Mabel Vaca-Mier, Araceli Lara-Valdivia y Oscar Delgado-Román

Laboratorio de Termofluidos, Departamento de Energía, UAM, Azcapotzalco, CDMX, México

Diseño de Procesos Sustentables (Simulación y dinámica de sistemas). **Ponencia Virtual.**

Recibido: 21 de agosto de 2023

Aceptado: 5 de octubre de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

Resumen: Este trabajo versa sobre el comportamiento del flujo de un fluido newtoniano contenido en un tanque cilíndrico vertical cerrado que es originado por la rotación de una flecha que está inclinada a 0° , 15° y 30° respecto al eje del recipiente, y que tiene montado un impulsor de flujo axial, con tres álabes rectos inclinados 30° respecto al eje de la flecha. Las ecuaciones gobernantes del fenómeno son las de Navier-Stokes en coordenadas polares cilíndricas. La metodología y el método numérico propuestos permitieron obtener los campos del vector velocidad (\vec{V}) y el comportamiento de la velocidad radial (u) y axial (w). Los campos de velocidad de los tres sistemas mostraron que se componen de dos flujos circulatorios ubicados en la parte inferior y superior del impulsor y que van cambiando su núcleo conforme el eje de rotación incrementa su ángulo de inclinación. Al comparar las magnitudes promedio positivas de la velocidad de los arreglos con eje inclinado a 15° y 30° , respecto al de 0° , y para los puntos de análisis, se encontró que el de 15° tuvo un incremento del $+35.71\%$. Para la componente de velocidad radial (u), también se obtuvo una mejora en el arreglo de 15° de inclinación con un incremento del valor promedio máximo negativo del 66.80% . Los análisis anteriores muestran que el impulsor de flujo axial con eje de rotación inclinado a 15° contribuyó mayormente a mejorar el movimiento del fluido en el interior del depósito. Los resultados pueden emplearse para fortalecer el diseño de los tanques de mezclado para uso en la industria alimentaria, cosmética, petroquímica, etc. Aunque deberán considerarse los cambios específicos al tipo de sustancia, relaciones geométricas y números de Reynolds.

Palabras clave: Flujo rotatorio, eje de rotación inclinado, impulsores de flujo axial.

Flow inside a vertical tank by modifying the angle of agitation arrow tilt

Abstract: This work deals with the behavior of the flow of a Newtonian fluid contained in a closed vertical cylindrical tank that is caused by the rotation of an arrow that is inclined at 0° , 15° and 30° with respect to the axis of the container, and which has mounted an axial flow impeller, with three straight blades inclined 30° with respect to the axis of the arrow. The governing equations of the phenomenon are those of Navier-Stokes in cylindrical polar coordinates. The proposed methodology and numerical method allowed to obtain the fields of the velocity vector (\vec{V}) and the behavior of the radial velocity (u) and axial velocity (w). The velocity fields of the three systems showed that they are composed of two circulatory flows located at the bottom and top of the impeller and that they change their core as the axis of rotation increases its angle of inclination. When comparing the positive average magnitudes of the speed of the arrays with inclined axis at 15° and 30° , with respect to that of 0° , and for the analysis points, it was found that the 15° had an increase of $+35.71\%$. For the radial velocity component (u), an improvement in the 15° tilt arrangement was also obtained with an increase in the negative maximum average value of 66.80% . Previous analyses show that the axial flow impeller with axis of rotation inclined at 15° contributed mostly to improving fluid movement inside the tank. The results can be used to strengthen the design of mixing tanks for use in the food industry, cosmetics, petrochemicals, etc. Although specific changes to the type of substance, geometric relationships and Reynolds numbers should be considered.

Keywords: Flujo rotatorio, eje de rotación inclinado, impulsores de flujo axial.

Introducción

Los tanques de mezclado son equipos de uso industrial provistos de un sistema de agitación que se diseñan para realizar una mezcla de dos o más sustancias, pero sin generar algún tipo de reacción química. En el diseño se contemplan las propiedades termo físicas de los componentes a mezclar (densidad, viscosidad, calor específico y la temperatura), el tipo de hélice o impulsor, la pertinencia de usar baffles, etc. Frecuentemente se utilizan en la industria química, cosmetológica, alimentaria, etc., Achouri R. et al (2012) y Ameer H. (2016).

En este trabajo se pretende determinar el comportamiento del flujo en estado permanente de un fluido newtoniano, viscoso e incompresible, contenido en una cámara cilíndrica vertical cerrada con fondo semielíptico. El movimiento del fluido se genera a través de una flecha inclinada a 0° , 15° y 30° , respecto al eje del tanque, que gira en sentido horario y que tiene montado en un extremo un impulsor de flujo axial con tres álabes rectos inclinados 30° , respecto al eje de la flecha. El planteamiento matemático se basa en las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas y en estado permanente. Los resultados se analizarán al comparar los campos del vector velocidad (\vec{V}) y sus magnitudes en cuatro posiciones de interés, además se examinará el comportamiento de las componentes de velocidad radial (u) y axial (w) para los tres arreglos. El fluido a manejar será agua y se tendrá una relación altura/radio del contenedor constante y la misma velocidad angular.

Los trabajos relacionados con esta investigación comienzan con Pao H-P (1972) quien propuso un método numérico para estudiar el flujo de un fluido viscoso confinado en una cámara cilíndrica donde la tapa superior estaba rotando a una velocidad angular constante y las paredes y fondo del recipiente permanecían fijos. Analizó la función corriente, la circulación, la distribución de velocidades y el coeficiente de par para un rango del número de Reynolds de 1 a 400. Bertelá, Gory F. (1982) presentaron un método numérico que permitía resolver el flujo estable y transitorio de un fluido dentro de un depósito cilíndrico con la cubierta rotando. En el estudio analizaron las componentes de velocidad, líneas de corriente y coeficiente de torque para un número de Reynolds de 100 y 1000, y para una relación geométrica de 0.5, 1 y 2. Khalili A. et al (1995) obtuvieron una solución numérica para un flujo laminar inducido dentro de un cilindro por un disco rotatorio situado asimétricamente respecto a la altura. Presentaron el análisis de las líneas de corriente, componente de velocidad tangencial y coeficiente de torque para distintos posicionamientos del disco, para una relación geométrica de 1 a 2 y para un rango del Reynolds de 1 a 5000. Yu P. et al (1980) estudiaron numéricamente el flujo en una cámara cilíndrica con un disco giratorio situado muy cerca del fondo y cuyo radio era menor al de la cámara. Se analizaron las líneas de corriente, momento angular y vorticidad, para diferentes Reynolds (1000, 1500 y 2000), relación geométrica H/R (1.5) y relación de radios R/rd (1.5, 1.8, 2.0, 2.2, 2.6, 3.0, 5.0). Achouri R. et al (2012) realizaron el estudio de un tanque agitado con impulsores de pala inclinada PBT (Pitched Blade Turbine) compuestos por seis alabes y con flujo descendente. El tanque se simuló para flujos multifásicos de gas-líquido a una velocidad constante de 480 rpm y dos inclinaciones de alabes: 45° y 60° . Ameer H. (2016) presenta los resultados numéricos sobre la mezcla de fluidos con agitadores de dos placas planas verticales e inclinadas. Analizó los efectos del ángulo de inclinación de las palas sobre las características locales y globales de la mezcla, y estudió el efecto del Reynolds con el comportamiento reológico de la mezcla. Finalmente, Roza J. (2020) diseñó un tanque agitador vertical para la mezcla de biofertilizante, en el cual dentro de los resultados destacó que el uso de baffles y el uso de una turbina de disco aumentaron la capacidad de producción y mejoraron el mezclado en comparación de tanques agitadores sin el uso de estos elementos.

Materiales y Métodos

Sistema físico

El sistema en estudio se compone de un recipiente cilíndrico vertical cerrado de 4.5 cm de radio, 9 cm de altura (envolvente cilíndrica) y 3 cm de fondo semielíptico. La flecha que rota en su interior tiene una longitud de 10.08 cm, un radio de 0.5 cm, y está inclinada, respecto al eje del depósito, a un ángulo α (en este trabajo α toma los valores de 0° , 15° y 30°). En el extremo de la flecha se acopla un impulsor de flujo axial que tienen un radio proyectado de 2 cm, tres álabes rectos de 0.5 cm de altura por 0.1 cm de espesor y están inclinados 30° respecto a la flecha de rotación (Figura 2 y 3). El impulsor se acopla a la flecha y gira en sentido horario a una velocidad angular constante de 13.61 rad/s.

El objetivo del impulsor de flujo axial es que al girar en sentido horario impulse al fluido hacia el fondo del tanque, mejorando con ello el movimiento del fluido en el contenedor. La sustancia empleada en la simulación es agua y se considera como un fluido viscoso e incompresible de propiedades físicas constantes.

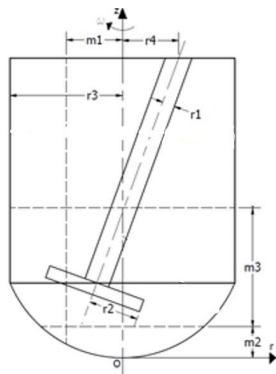


Figura 1. Cotas del tanque, flecha e impulsor y líneas de referencia para el análisis de velocidades

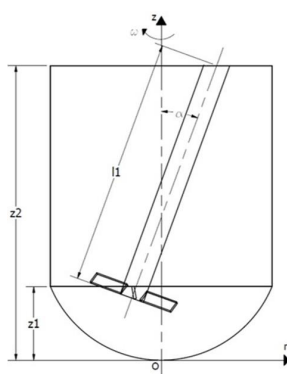


Figura 2. Cotas del tanque y flecha

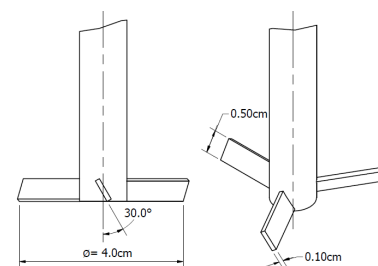


Figura 3. Cotas del impulsor de flujo axial

Fundamento matemático

Las ecuaciones que describen el movimiento de un fluido newtoniano, viscoso, incompresible, en estado permanente, en el interior de un depósito cilíndrico, son las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas Landau y Lifshitz (1982), Tijonov A. N. y Samarsky A. A. (1980).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru) + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v^2}{r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left[\nabla^2 u - \frac{u}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right] \tag{2}$$

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{uv}{r} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \nu \left[\nabla^2 v - \frac{v}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right] \tag{3}$$

$$u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \nabla^2 w + g \tag{4}$$

En estas ecuaciones se tienen como incógnitas las tres componentes de velocidad: radial (u), azimutal o tangencial (v), y axial (w); y la presión (P). Además, la presión en el interior del fluido depende de dichas componentes de velocidad. Las condiciones de frontera para el arreglo con impulsor de flujo axial se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de frontera para el impulsor de flujo axial

$r=0$ $0 \leq z \leq z_2$	$u = 0,$	$v = 0,$	$\frac{\partial w}{\partial r} = 0$	(5)
$r = r_3,$ $z_1 \leq z \leq (z_2 - z_1)$	$u = 0,$	$v = 0,$	$w = 0$	(6)
$0 \leq r \leq r_3,$ $0 \leq z \leq z_1,$ $0 \leq r \leq r_3,$ $z = z_2$	$u = 0,$	$v = 0,$	$w = 0$	(7)
$0 \leq r \leq r_2,$ en l_1 $r_1 \leq r \leq r_2,$ en $(l_1-0.5)$	$u = 0,$	$v = \omega r,$	$w = 0$	(8)
$r = r_1,$ $0 \leq l \leq (l_1 - 0.5),$ $r=r_2$ $l_1 \leq l \leq (l_1 - 0.5)$	$u = 0,$	$v = \omega r,$	$w = 0$	(9)

En las ecuaciones anteriores r_1 , r_2 y r_3 corresponden al radio de la flecha, del impulsor y del tanque, respectivamente; z_1 y z_2 , es la distancia desde el fondo del recipiente hasta la parte recta y tapa del depósito, respectivamente; l_1 es la longitud de la flecha, α es el ángulo entre el eje del cilindro y la flecha, y ω es la velocidad angular a la que gira la flecha y el impulsor (Figuras 1, 2). El número de Reynolds (Re) que caracteriza a los sistemas rotatorios se define como: $Re = \frac{\omega r_2^2}{\nu}$. Las condiciones de frontera que se le han asignado a los álabes del impulsor de flujo axial son las de no deslizamiento y la ecuación $v = \omega r$.

Análisis numérico

Para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes (1) a (4), junto con las condiciones de frontera (5) a (9), se utilizó el método numérico del elemento finito. La metodología fue tomada de: Royer and Pryor W., (2011), Torres C. R. and B. J. Grau B. J. (2007):

- En el software se selecciona el entorno gráfico del arreglo a estudiar. En este caso fue el de tres dimensiones, 3D.
- Se dibuja el modelo a estudiar, según se indica en el sistema físico, y se generan los elementos del sistema. En el arreglo con impulsor de flujo axial, y para los ángulos de 0° , 15° y 30° , se generaron 124888, 438096 y 515004 elementos, respectivamente. Se hizo un análisis de independencia de malla al analizar los campos de velocidad para diferente número de elementos.
- En el software se introducen el valor de las propiedades termofísicas del agua que permanecen constantes: viscosidad dinámica (μ), densidad (ρ), calor específico (C), coeficiente de expansión volumétrico (β) y conductividad térmica (k). La presión se maneja con el algoritmo de relajación (TDMA) y se utiliza el modelo $k-\epsilon$, debido a que contempla números de Reynolds altos y supone tanto la viscosidad turbulenta como isotrópica.
- Se introducen las condiciones de frontera y se da el valor de la velocidad angular a la que va a girar la flecha y el impulsor, en este caso 13.61 rad/s en sentido horario.
- Se realizan las simulaciones de los arreglos hasta obtener su convergencia. De los resultados obtenidos se exportan las magnitudes de los campos de velocidad (\vec{V}) y de las componentes de velocidad radial (u) y axial (w).

Resultados y Discusión

Una vez elaborado el programa para los tres arreglos a analizar, se procedió a correrlo. Para todos los casos se utilizó agua como fluido de trabajo, que junto con la geometría de los sistemas se obtuvo un número de Reynolds de 2.17×10^4 . Los campos de velocidad (\vec{V}) generados en los recipientes con impulsor de flujo axial y para los ángulos α de 0° , 15° y 30° , se presentan en las Figuras 4, 5 y 6, respectivamente. Con el fin de comparar el desempeño del flujo, se muestran algunos valores de la velocidad para ciertos lugares de interés. Cabe señalar que se está considerando la dirección del flujo positiva en sentido horario (+) y negativa en sentido antihorario (-).

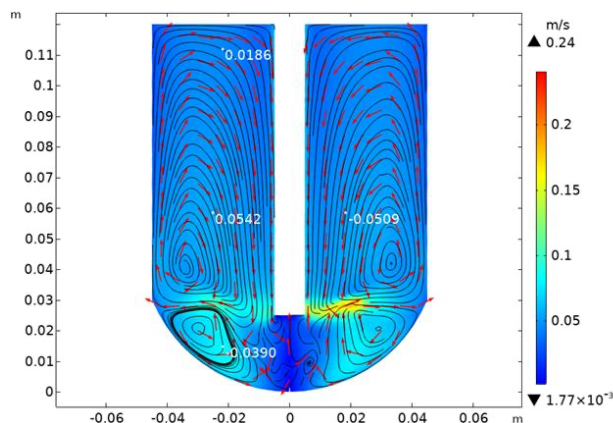


Figura 4 Campo de velocidades (\vec{V}) para $\alpha=0^\circ$

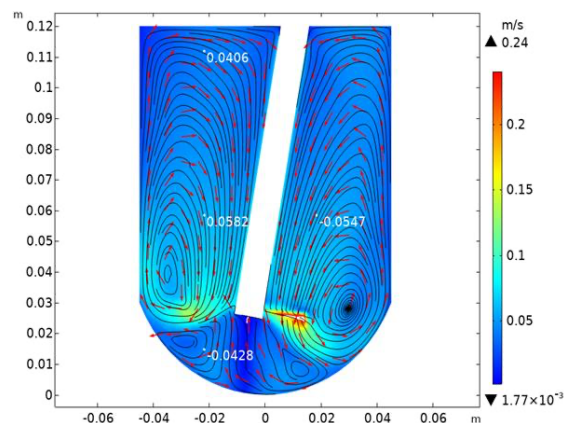
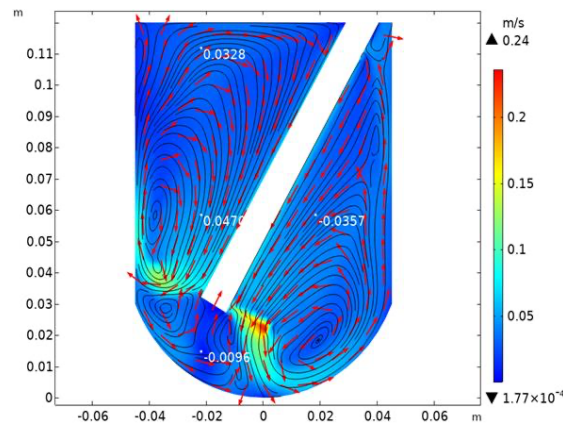


Figura 5 Campo de velocidades (\vec{V}) para $\alpha=15^\circ$

Figura 6 Campo de velocidades (\vec{V}) para $\alpha=30^\circ$

En la Figura 4 se presenta el arreglo con impulsor de flujo axial y flecha inclinada a 0° , se observa que el fluido es expulsado por el impulsor hacia las paredes y fondo del tanque. Por encima del impulsor, de lado izquierdo y derecho del eje de rotación, se aprecian dos vórtices de tamaño considerable que giran en sentido horario y antihorario, respectivamente. En la región que está por debajo del impulsor, de lado izquierdo y derecho, se generan dos vórtices más pequeños que abarcan el fondo del depósito, éstos giran en sentido antihorario y horario, respectivamente. El campo de velocidades muestra que en las cercanías del impulsor y la flecha se presentan las magnitudes más altas de la velocidad y que lejos de los mismos su intensidad va disminuyendo. Los valores que toma el vector velocidad (\vec{V}) en los puntos seleccionados son: +0.0186, +0.0542, -0.0590 y -0.0390 m/s. En los arreglos con la flecha inclinada a 15° y 30° , Figuras 5 y 6, se aprecia un comportamiento parecido al anterior, pero en estos casos el centro de los vórtices de lado izquierdo y derecho del recipiente cilíndrico, tanto para la parte inferior del impulsor como para la superior, van cambiando de ubicación, debido a la variación del ángulo de inclinación del eje de rotación. Las magnitudes que toma el vector velocidad (\vec{V}) en los puntos seleccionados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores del vector velocidad (\vec{V}) (m/s)

Ángulo de inclinación de la flecha	Velocidad (m/s) en los puntos seleccionados
0°	+0.0186, +0.0542, -0.0509 y -0.0390
15°	+0.0406, +0.0582, -0.0547 y -0.0428
30°	+0.0328, +0.0470, -0.0357 y -0.0096

Al comparar las magnitudes promedio positivas y negativas de la velocidad, de los arreglos con eje inclinado a 15° y 30° , respecto al de 0° , se encontró que su valor tuvo un cambio de: +35.71% y +9.61%, +8.46% y -0.503%, respectivamente. Los resultados muestran que el impulsor de flujo axial con eje inclinado a 15° favoreció la velocidad del fluido en los puntos seleccionados, aunque el centro de los vórtices sufrió un cambio en su posición. Otra observación importante es que el movimiento del fluido en el interior del tanque mantuvo una distribución homogénea y adecuada, resaltando el caso del sistema con eje inclinado a 30° , donde se aprecia que el vórtice principal de lado derecho del eje tuvo gran influencia en el fondo del mismo.

Otro análisis que se hizo sobre el movimiento del fluido dentro del contenedor fue el del comportamiento de las componentes de velocidad radial (u) y axial (w) para tres posiciones de interés: m_1 , m_2 y m_3 , Figura 1. En la Figura 7 se presenta la gráfica de la componente de velocidad radial (u), variando la coordenada "z", para la línea de referencia $m_1=2.25$ cm y para los arreglos con eje de rotación inclinado a $\alpha = 0^\circ$, 15° y 30° .

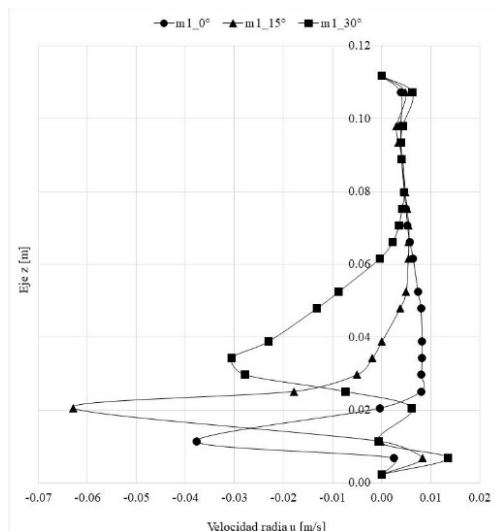


Figura 7. Velocidad radial (u) en la posición m1

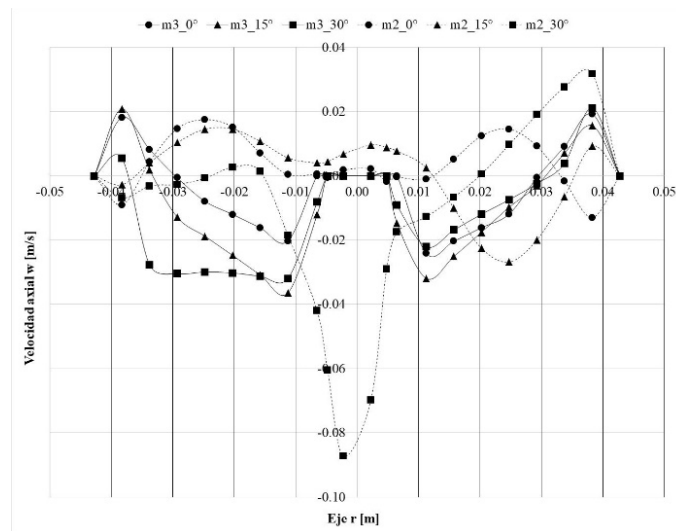


Figura 8. Velocidad axial (w) en m2 y m3

Analizando la curva del arreglo con impulsor de flujo axial y ángulo de inclinación de 0° , se observa que la velocidad radial comienza en cero en el fondo del tanque. Posteriormente se aprecia que el fluido se mueve hacia el eje del cilindro, esto se advierte por el signo positivo de la velocidad. Se observa que su magnitud se va incrementando hasta un máximo positivo de $+2.47 \times 10^{-3}$ m/s y de allí comienza a disminuir su valor hasta cambiar el sentido del flujo. Ahora el fluido se dirige hacia la pared del recipiente, esto se aprecia por el signo negativo de la velocidad. Su magnitud comienza a aumentar hasta un máximo negativo de -37.70×10^{-3} m/s. A continuación, se manifiesta otro cambio en el sentido del flujo, ahora el fluido se mueve nuevamente hacia el centro del depósito, tomando un valor máximo positivo de $+8.24 \times 10^{-3}$ m/s. Finalmente la magnitud de la velocidad radial disminuye hasta hacerse cero sobre la frontera rígida superior. Para los casos con impulsor de flujo axial y ángulos de inclinación de la flecha de rotación de 15° y 30° , se aprecia el mismo comportamiento, pero con distintos valores. En la Tabla 3 se presentan las magnitudes máximas y mínimas de la componente de velocidad radia para los tres arreglos.

Tabla 3. Valores máximos y mínimos de la componente de velocidad radial (u) en m1

Ángulo de la flecha	$u_{\text{máx}}$ (m/s)
0°	$+2.47 \times 10^{-3}$, -37.70×10^{-3} , $+8.24 \times 10^{-3}$
15°	$+8.31 \times 10^{-3}$, -62.88×10^{-3} , $+5.54 \times 10^{-3}$
30°	$+13.52 \times 10^{-3}$, -30.59×10^{-3} , $+4.62 \times 10^{-3}$

Comparando los resultados de la velocidad máxima negativa de los arreglos con impulsor de flujo axial con eje inclinado a 15° y 30° , respecto al de 0° , se encontró que el valor de la componente de velocidad radial se incrementó 66.80% y decreció 18.86%, respectivamente. Lo anterior indica que, al colocar la flecha de rotación con un ángulo de 15° , y para esta posición del sistema, se manifiesta un incremento favorable en esta componente de velocidad.

En la Figura 8 se muestra el comportamiento de la componente de velocidad axial (w), variando la coordenada "r", en las posiciones de referencia $m_2=1.25$ cm y $m_3=2.75$ cm, Figura 1, y para los arreglos con impulsor de flujo axial con flecha inclinada a 0° , 15° y 30° . Para el arreglo con ángulo de 0° y $m_2=1.25$ cm, la curva comienza en cero sobre la pared izquierda del fondo del tanque. Posteriormente, se aprecia que el fluido se dirige hacia el fondo del recipiente. Se observa que su valor alcanza un máximo negativo de -9.05×10^{-3} m/s y de allí comienza a disminuir su magnitud hasta cambiar el sentido del flujo. Ahora el fluido se dirige hacia la tapa del contenedor. Su valor comienza a aumentar hasta un máximo positivo de $+17.47 \times 10^{-3}$ m/s. A continuación, el flujo disminuye nuevamente su intensidad a valores cercanos a cero, cuando pasa por la región del centro del cilindro, y de allí retoma su dirección hacia la parte superior del tanque, alcanzando una magnitud máxima positiva de $+14.54 \times 10^{-3}$ m/s. Después, el fluido cambia el sentido del flujo hacia el fondo del depósito con un máximo negativo de -12.96×10^{-3} m/s. Finalmente la velocidad axial se hace cero sobre la pared derecha del fondo del recipiente. En los arreglos con impulsor de flujo axial y ángulos de inclinación del

eje de rotación de 15° y 30° , el flujo se comporta de manera similar, pero con distintas magnitudes. En la Tabla 4 se muestran los valores máximos y mínimos de la componente de velocidad vertical para los tres arreglos. Al comparar los resultados máximos positivos y negativos del sistema con impulsor de flujo axial con ángulo de inclinación de la flecha de 15° y 30° , respecto al de 0° , se encontró que la velocidad axial se vio favorecida mayormente para el caso del eje inclinado en 30° .

Tabla 4. Valores máximos y mínimos de la componente de velocidad axial (w) en m^2 y m^3

Ángulo de la flecha	$w_{\text{máx}}$ (m/s)	
	m^2	m^3
0°	-9.05×10^{-3} , $+17.47 \times 10^{-3}$, $+14.54 \times 10^{-3}$, -12.96×10^{-3}	$+18.19 \times 10^{-3}$, -20.29×10^{-3} , -24.15×10^{-3} , $+19.23 \times 10^{-3}$
15°	-2.76×10^{-3} , $+14.57 \times 10^{-3}$, $+9.64 \times 10^{-3}$, -26.8×10^{-3}	$+20.87 \times 10^{-3}$, -36.43×10^{-3} , -31.94×10^{-3} , $+15.65 \times 10^{-3}$
30°	-6.81×10^{-3} , $+2.68 \times 10^{-3}$, -87.22×10^{-3} , $+31.82 \times 10^{-3}$	$+5.41 \times 10^{-3}$, -31.97×10^{-3} , -22.11×10^{-3} , $+21.09 \times 10^{-3}$

Ahora se presenta el mismo análisis de la componente de velocidad axial (w), Figura 8, pero en la posición $m_3=2.75$ cm, Figura 1, y para los tres arreglos. En la curva con impulsor de flujo axial y ángulo de la flecha de 0° , se observa que la velocidad vertical toma el valor de cero sobre la pared izquierda del tanque, posteriormente se aprecia que el fluido se dirige hacia la parte superior del cilindro, esto se advierte por el signo positivo de la velocidad. Su magnitud se va incrementando hasta un máximo positivo de $+18.19 \times 10^{-3}$ m/s. Posteriormente se presenta un cambio en la dirección del flujo, esto se identifica por el signo negativo de la velocidad, su valor va disminuyendo hasta un máximo negativo de -20.29×10^{-3} m/s. De allí se presenta una zona de velocidad cero, que es la parte que ocupa eje de rotación, y posteriormente el fluido retoma el movimiento hacia el fondo del depósito con una magnitud máxima negativa de -24.15×10^{-3} m/s. A continuación, se presenta otro cambio en la dirección del flujo hacia la parte superior del recipiente, presentándose un máximo positivo de $+19.23 \times 10^{-3}$. Finalmente, la intensidad de la velocidad vertical se hace cero al llegar a la pared derecha del cilindro. Para el arreglo con impulsor de flujo axial y ángulo de la flecha de 15° y 30° , el movimiento del fluido es similar, pero con valores distintos. En la Tabla 4 se muestran las magnitudes máximas positivas y negativas de la componente de velocidad vertical para los tres arreglos. Comparando los resultados máximos positivos y negativos entre el sistema con impulsor de flujo axial con flecha inclinada a 15° y 30° , respecto a la vertical con 0° , se determinó que la velocidad axial cambió: (+14.73%, +79.54%, +32.25%, -18.87%) y (-70.26%, +57.56%, -8.44%, +9.67%), respectivamente. Tal como en el análisis anterior, se observa que el impulsor de flujo axial con flecha inclinada a 15° favorece el flujo vertical en esta región.

Conclusiones

Este trabajo versó sobre el comportamiento del flujo de un fluido newtoniano contenido en un tanque cilíndrico vertical cerrado con fondo semielíptico, que es originado por la rotación de una flecha que está inclinada a 0° , 15° y 30° respecto al eje del recipiente, y que tiene montado un impulsor de flujo axial, con tres álabes rectos inclinados 30° respecto al eje de la flecha. La metodología y el método numérico propuestos para la solución fueron apropiados pues con ellos se permitió obtener los campos del vector velocidad (\vec{V}) y las gráficas de las componentes de velocidad radial (u) y axial (w) para los tres arreglos, encontrándose coincidencias con los resultados de la literatura especializada. El análisis del campo de velocidades de los tres sistemas mostró que se componen de dos flujos circulatorios ubicados en la parte inferior y superior del impulsor, que van cambiando su núcleo conforme el eje de rotación incrementa su ángulo de inclinación. Al comparar las magnitudes promedio positivas de la velocidad de los arreglos con eje inclinado a 15° y 30° , respecto al de 0° , y para los puntos de análisis, se encontró que el de 15° tuvo un mayor incremento, siendo éste de +35.71%. Respecto al análisis de la componente de velocidad radial (u), se encontró similitud en el comportamiento de los tres sistemas y, al igual que en el caso de los campos de flujo, se obtuvo una mejora en el arreglo de 15° de inclinación con un incremento del valor promedio máximo negativo del 66.80%. Los resultados mostraron que el

impulsor de flujo axial con eje de rotación inclinado a 15° favoreció mayormente el movimiento del fluido en el interior del depósito. Al utilizar este arreglo se obtuvo un mejor comportamiento en cuanto a la distribución de velocidades obtenida y por ende al mezclado del fluido; lo anterior generado por la presencia de los vórtices en el sistema. Además, no se encontraron zonas de estancamiento debido a las características y uso del impulsor de flujo axial descendente. Aunque los resultados fueron favorables, aún se requiere de mayor investigación para contemplar otras relaciones geométricas del contenedor, otro tipo de fluidos y distintos números de Reynolds.

Bibliografía

- Achouri, R., Mokni, I., Mhiri, H., & Bournot, P. (2012). A 3D CFD simulation of a self inducing Pitched Blade Turbine Downflow. *Energy conversion and management*, 64, 633-641. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.06.005>.
- Ameur, H. (2016). Mixing of complex fluids with flat and pitched bladed impellers: Effect of blade attack angle and shear-thinning behaviour. *Food and Bioproducts Processing*, 99, 71-77. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.04.004>.
- Bertelá, M., & Gori, F. (1982). Laminar flow in a cylindrical container with a rotating cover. <https://doi.org/10.1115/1.3240849>
- Khalili, A., Adabala, R. R., & Rath, H. J. (1995). Flow induced by an asymmetrically placed disk rotating coaxially inside a cylindrical casing. *Acta mechanica*, 113, 9-19. <https://doi.org/10.1007/BF01212630>
- Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. (1982). Fluid Mechanics. *Fluid Mechanics. Second Edition. 1987. Pergamon*
- Pao, H. P. (1972). Numerical Solution of the Navier-Stokes Equations for Flows in the Disk-Cylinder System. *The physics of fluids*, 15(1), 4-11. <https://doi.org/10.1063/1.1693752>
- Pryor, R. W. (2011). Multiphysics modeling using COMSOL v. 4. *A first principles approach: Jones and Bartlett Publishers*.
- Rozo Ibarra, J. S. (2021). Propuesta de diseño estructural de un tanque agitador vertical para la mezcla de biofertilizante. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/2534>
- Tijonov, A. N., & Samarsky, A. A. (1980). Ecuaciones de la física matemática, Edit. MIR, Moscú, 1-29.
- Torres C. R. and Grau B. J. (2007). Introd. a la mec. de fluidos y transf. de calor con COMSOL Multiphysics, 1ª ed., Barcelona: Addlink Media.
- Yu, P., Lee, T. S., Zeng, Y., & Low, H. T. (2007). Characterization of flow behavior in an enclosed cylinder with a partially rotating end wall. *Physics of fluids*, 19(5). <https://doi.org/10.1063/1.2731420>