

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO BIFÁSICO EN ENTRADA DE BOMBAS. SISTEMA PARA AGUAS POCO PROFUNDAS

NUMERICAL SIMULATION OF TWO-PHASE FLOW ON PUMPS INLET. SYSTEM FOR SHALLOW WATER

Sebastián L. Maglione^a, Guillermo E. Muschiatto^{a,b}, Raúl A. Dean^{a,b} y Tomás M. Fernandez^a

^a*Grupo de Ingeniería Aplicada al Sistema Agroalimentario (GIASA), Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nacional 36 km 601, Córdoba (X5804BYA), Argentina, giasa@ing.unrc.edu.ar, <http://www.ing.unrc.edu.ar/grupos/giasa/>*

^b*Instituto para el Desarrollo Agroindustrial y de la Salud (IDAS) UNRC-CONICET, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nacional 36 km 601, Córdoba (X5804BYA), Argentina, <https://idas.conicet.gov.ar>*

Palabras clave: Riego, CFD, caudal bifásico, Córdoba.

Resumen. Uno de los problemas de la producción agrícola en la región central de Argentina, Córdoba, es la mala distribución temporal de las lluvias y su escasez. Según un estudio realizado por el Banco Mundial, Argentina tiene un buen potencial para aumentar el área de riego, y en consecuencia incrementar la productividad de la agricultura de regadío. Un aspecto fundamental a tener en cuenta en el diseño de los sistemas de bombeo para riego en aguas superficiales poco profundas (≤ 40 cm) de ríos, lagos y canales, es lograr una geometría en la entrada de la tubería de admisión de la bomba que permita el mínimo arrastre de aire y partículas, por lo que es necesario describir adecuadamente el flujo. En este artículo, se emplean técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) con el método level-set, para resolver las ecuaciones bidimensionales que gobiernan un flujo bifásico, viscoso, incompresible y no estacionario. Se presentan los resultados de los perfiles de velocidad y de la evolución de la interface en la entrada del sistema de bombeo y en la región próxima.

Keywords: Irrigation, CFD, two-phase flow, Córdoba.

Abstract. One of the problems of agricultural production in the central region of Argentina, Córdoba, is the poor seasonal distribution of rainfall and its scarcity. According to a study carried out by the World Bank, Argentina has good potential to increase the irrigated area, and consequently increase the productivity of irrigated agriculture. A fundamental aspect to take into account in the design of pumping systems for irrigation in shallow surface waters (≤ 40 cm) of rivers, lakes and canals, is to achieve a geometry at the entrance of the pump intake pipe that allow minimal entrainment of air and particles, so it is necessary to adequately describe the flow. In this article, Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques are used with the level-set method, to solve the two-dimensional equations that govern a biphasic, viscous, incompressible and non-steady flow. The results of the velocity profiles and the evolution of the interface at the entrance of the pumping system and in the near region are presented.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de alimentos a nivel mundial, presenta para Argentina la oportunidad de convertirse en uno de los principales proveedores de granos y carnes. (FAO, 2002, 2015).

Un estudio del Banco Mundial (BM), considera que Argentina tiene un gran potencial para aumentar el área bajo riego. La capacidad total de almacenamiento de agua es de unos 160 km³ (Banco Mundial, 2006). La superficie potencial regada es de 6,3 millones de hectáreas, de las cuales 2,5 millones podrían tener riego durante todo el año. Actualmente hay 1,75 millones de hectáreas bajo riego completo y con condiciones económicas favorables, se podrían sumar 750.000 hectáreas.

Uno de los problemas de la producción agropecuaria en la región centro sur de Córdoba es la mala distribución temporal de las lluvias y la ocurrencia de escasez de las mismas. El riego complementario es una práctica disponible que puede salvar esta adversidad y estabilizar los rendimientos de cultivos extensivos característicos de la región. El área bajo riego por aspersión, en Argentina, está muy por debajo del área total cultivada que puede ser regada, y si bien creció a un ritmo considerable hasta el año 2000, ahora se estabilizó. (Salinas et al., 2006). La provincia de Córdoba tiene un buen potencial para el riego, definido por la gran extensión de terrenos aptos, que coinciden con zonas donde es posible obtener agua subterránea en cantidad y calidad suficiente, complementada con importantes fuentes de agua superficial.

La sostenibilidad en el tiempo de este sistema depende del uso racional de los recursos hídricos (acuíferos) y del manejo de suelos y cultivos. Hay aspectos que no se conocen, sobre el rendimiento y la recarga de los acuíferos subterráneos que se aprovechan y la magnitud del peligro de salinización del suelo cuando se incorpora agua con algo de sal.

Por lo tanto, la correcta aplicación de una tecnología de riego está condicionada por la disponibilidad de agua de calidad y caudal suficiente en combinación con suelos adecuados y su correcta implementación, operación, uso y mantenimiento, que justifiquen inversiones con buen rendimiento. (Agencia Córdoba Ambiente – INTA, 2006).

Es notable la importancia de la innovación tecnológica para la producción primaria en la provincia de Córdoba. En el bombeo de aguas subterráneas es común el uso de bombas sumergibles, normalmente conocidas como bombas de pozo profundo, diseñadas principalmente para aplicaciones en alturas importantes y caudales relativamente bajos (Turton, 1995). No existen diseños específicos para el bombeo de aguas poco profundas para riego.

Qifeng Jiang et al. (2019) revisa las consideraciones de diseño de bombas centrífugas capaces de manipular flujo bifásico gas-líquido.

Estos autores afirman que la mayoría de las bombas que funcionan en condiciones de flujo bifásico se utilizan en la industria del petróleo, en la química, en la industria nuclear y en la agricultura con fines de riego. Destacan que el flujo bifásico siempre deteriora el rendimiento general de la bomba en comparación con uno monofásico. En su revisión encuentran que los principales mecanismos que gobiernan la formación de bolsas de gas y fenómenos de oleaje dependen del tipo de bomba, la geometría del impulsor, la velocidad de rotación, las condiciones de caudal de líquido de diseño y fuera de diseño, las condiciones volumétricas de fracción de gas, las propiedades del fluido y la presión de entrada.

El flujo bifásico horizontal es común en muchas aplicaciones prácticas de ingeniería. Sin embargo, ha habido poca investigación sobre los flujos horizontales en comparación con los flujos verticales (Kong R., Kim S., 2017). El flujo de dos fases se clasifica en varios regímenes de flujo, y es importante desde el punto de vista del diseñador poder predecir con precisión qué patrón de flujo ocurrirá para tasas de flujo de entrada dadas, tamaño de tubería y propiedades del fluido. Solo entonces se puede seleccionar el modelo de flujo adecuado (Mandhane et al., 1974).

La predicción del régimen de flujo para el flujo simultáneo de gas y líquido en tuberías ha sido un problema central no resuelto en el flujo de dos fases. El enfoque habitual ha sido recopilar datos de caudales y propiedades de fluidos y visualizar el patrón de flujo a través de una ventana de sección de prueba transparente. Luego, se realiza una búsqueda de la forma de mapear los datos en un gráfico bidimensional, ubicando los límites de transición entre los regímenes (Taitel y Dukler, 1976).

Los métodos que se han mostrado en la literatura para este propósito, han sido generalmente en forma de mapas bidimensionales en los que las ubicaciones de los límites entre las regiones del patrón de flujo se basan en observaciones empíricas (Mandhane et al., 1974). Los mapas de régimen de flujo comunes para el flujo bifásico horizontal incluyen el desarrollado por Mandhane et al. (1974) mediante trabajo experimental y desarrollado por Taitel y Dukler (1976) mediante modelación teórica (Kong R., Kim S., 2017), como se muestra en la Figura 1 elaborada por Taitel y Dukler (1976).

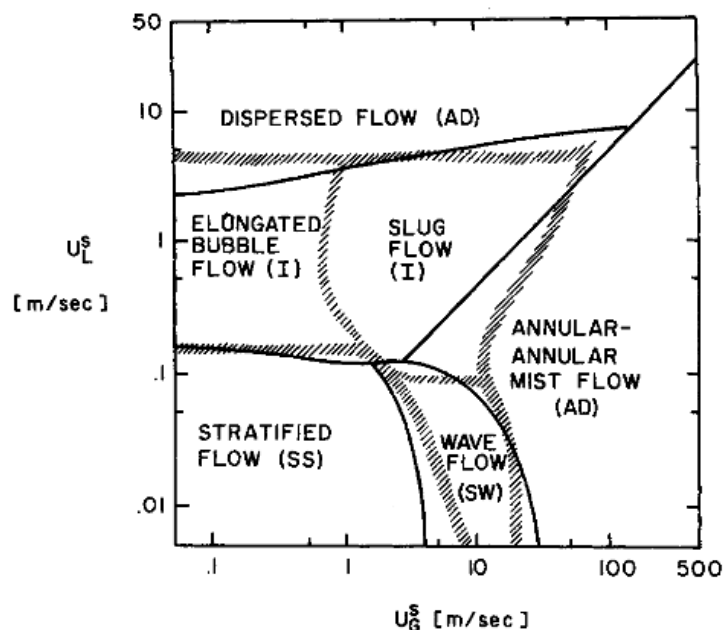


Figura 1: Comparación de teoría (Taitel y Dukler, 1976) y experimento (Mandhane et al., 1974). Agua-aire, 25°C, 1 atm, 2,5 cm. diámetro

En nuestra investigación, el problema de la interfaz libre ocurre con dos fluidos inmiscibles e incompresibles como el aire y el agua a números de Mach bajos.

A partir de la simulación numérica, se presenta el avance en el desarrollo de la modelación del sistema de bombeo de riego para aguas superficiales poco profundas (≤ 40 cm) de ríos, lagos y canales, para poder lograr una geometría en la entrada de la bomba con el mínimo arrastre de aire y partículas, por lo que es necesario describir adecuadamente el flujo antes de la entrada al impulsor. Se presentan resultados numéricos para un flujo bifásico en la entrada de la bomba, diseñado con una forma tridimensional envuelta, que debe optimizarse. Los resultados numéricos se han obtenido utilizando técnicas CFD junto con el método level-set.

MÉTODO NUMÉRICO

Las técnicas numéricas para interfaces de fluidos se pueden dividir en dos categorías: métodos lagrangianos y eulerianos. La primera categoría de métodos resuelve con precisión la forma de la interfaz y es adecuada para capturar la película lubricante delgada alrededor de burbujas o

gotas que se mueven constantemente. Los ejemplos de métodos lagrangianos incluyen malla móvil o seguimiento frontal. Es complicado aplicar métodos lagrangianos a problemas con grandes movimientos de interfaz y cambios topológicos. Dichos problemas se modelan mediante métodos eulerianos que manejan cambios topológicos complejos. Los ejemplos de la última categoría incluyen el método de interfaz difusa, el método level set (LS), el método de volumen de fluido (VOF) y el método Lattice-Boltzmann (Duong A. Hoang et al., 2013).

Para el problema de interfaz de fluido actual, se utiliza el método de level set. Es particularmente útil para problemas en los que la topología de la interfaz en evolución cambia durante el curso de los eventos y para problemas en los que están presentes esquinas agudas y cúspides. Sethian y Osher (1987, 1988) proponen este método para representar interfaces implícitamente y modelar su propagación usando ecuaciones diferenciales parciales apropiadas. La interfaz viene dada por el conjunto de niveles de una función $\phi(x)$.

En el método de level set, la interfaz está representada implícitamente por el conjunto de nivel cero de una función, $\phi(x) = 0$, donde ϕ está definido para todas las x , no solo para las que están en el límite. La función ϕ se discretiza usando una malla de fondo para representarla en forma finita en una computadora.

El método de level set establecido está basado en el campo en el que una superficie fluida libre se caracteriza como una isosuperficie del nivel establecido. Los métodos de level set son técnicas computacionales para rastrear interfaces en movimiento; se basan en una representación implícita de la interfaz cuya ecuación de movimiento se aproxima numéricamente usando esquemas construidos originalmente para leyes de conservación hiperbólica (Sethian & Smereka, 2003).

Ecuaciones gobernantes

Para las simulaciones de interfaz de fluido de evolución de flujo de dos fases, las ecuaciones de Navier-Stokes se aplican a un flujo de dos fases, viscoso, incompresible y no estacionario, y se resuelven utilizando las técnicas CFD junto con el método de level set (Wang et al., 2008), (Sussman et al., 1994), (Gerlach et al., 2005).

Los métodos de level set permiten calcular la solución a problemas de interfaz de fluidos, representados a través de una ecuación diferencial parcial de valor inicial dependiente del tiempo (Sethian y Smereka, 2003).

Las interfaces de conjunto de niveles utilizan la formulación incompresible de las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de continuidad:

$$\rho_l \frac{Dv_l}{Dt} = -\nabla p_l + \rho_l F_l + \nabla \cdot \tau_{l_{ijk}} \rho_l \frac{Dv_l}{Dt} = -\nabla p_l + \rho_l F_l + \nabla \cdot \tau_{l_{ijk}} ; \nabla \cdot v_l = 0 \nabla \cdot v_l = 0 \quad (1)$$

$$\rho_g \frac{Dv_g}{Dt} = -\nabla p_g + \rho_g F_g + \nabla \cdot \tau_{g_{ijk}} \rho_g \frac{Dv_g}{Dt} = -\nabla p_g + \rho_g F_g + \nabla \cdot \tau_{g_{ijk}} ; \nabla \cdot v_g = 0 \nabla \cdot v_g = 0 \quad (2)$$

donde v es la velocidad, p es la presión, ρ es la densidad y μ es la viscosidad del fluido. Los subíndices l y g indican la fase líquida y gaseosa, respectivamente.

Si se usa el método de nivel establecido para rastrear la interfaz, se agrega la siguiente ecuación, donde ϕ es el nivel establecido función. La ecuación para la evolución de ϕ correspondiente al movimiento de la interfaz está dada por:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \phi \cdot \underline{v} = 0 \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \phi \cdot \underline{v} = 0 \quad (3)$$

Es decir, el conjunto de nivel es adelantado por el vector de velocidad, que se calcula mediante las ecuaciones de Navier-Stokes. Para el método de level set, en general, esto se ve así:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \phi \cdot \underline{v} = F \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \phi \cdot \underline{v} = F \quad (4)$$

El lado derecho de la ecuación, F, en el método de level set original, $F = 0$, lo que da una ecuación de transporte advectiva pura. Sin embargo, la solución numérica con $F = 0$ es inestable y de poca utilidad práctica en la mayoría de los casos.

En cambio, los términos con derivadas de orden superior de ϕ , diseñados para mantener la interfaz compacta, se introducen en F en el método level-set.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \phi \cdot \underline{v} = \gamma \nabla \cdot \left(\varepsilon \nabla \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \phi \cdot \underline{v} = \gamma \nabla \cdot \left(\varepsilon \nabla \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \quad (5)$$

γ es el parámetro de reinicialización (establecido en 1 de forma predeterminada) y ε es el parámetro de control del grosor de la interfaz (establecido en $h_{max}/2$ donde h_{max} es el tamaño máximo del elemento en el componente).

La densidad y la viscosidad se calculan como los promedios de las dos fases, ponderados con la función de level set $\phi(x)$, como:

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1)\phi \quad (6)$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1)\phi \quad (7)$$

Donde ρ_1 y ρ_2 son las densidades constantes del fluido 1 y el fluido 2, respectivamente, y μ_1 y μ_2 son las viscosidades dinámicas del fluido 1 y el fluido 2, respectivamente. Aquí, el fluido 1 corresponde al dominio donde $\phi < 0.5$ y el fluido 2 corresponde al dominio donde $\phi > 0.5$.

Las variables geométricas se pueden calcular a partir de ϕ , sin extracción de la interfaz. El vector normal viene dado por la ecuación (8) y la curvatura de una curva en dos dimensiones viene dada por la ecuación (9):

$$\underline{n} = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (8)$$

$$k = \nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \quad (9)$$

Las interfaces de conjunto de niveles contienen una serie de parámetros que deben ajustarse para que el método funcione de manera óptima. Los valores de estos parámetros dependen del sistema modelado y de la discretización numérica de las ecuaciones.

Modelo físico	Flujo bifásico		Marco teórico: ecuaciones de Navier-Stokes
	Flujo homogéneo		
	Flujo incompresible		

	Flujo laminar		
	Dos fluidos inmiscibles		
	Flujo viscoso		
	Flujo no estacionario		
Propiedades del fluido (Fluido 1 y Fluido 2)	Densidad	ρ^1 y ρ^2	Unidad SI: kg/m ³
	Viscosidad dinámica	μ^1 y μ^2	Unidad SI: N.s/m ²
Método numérico	Método level-set	Para realizar un seguimiento de la interfaz fluido-fluido	Ventajas: Es capaz de calcular cantidades geométricas fácilmente; muchos códigos se pueden convertir de dos a tres dimensiones rápidamente; la topología del identificador del método cambia fácilmente (Sethian y Smereca, 2003).
	Función level-set	Φ	En los métodos de conjunto de niveles, la elección de la función de conjunto de niveles es algo arbitraria (Sethian y Smereca, 2003).
Parámetros del conjunto de niveles	Parámetro de reinicialización	γ	Unidad SI: m/s
	Parámetros que controlan el grosor de la interfaz	ε	Unidad SI: m
Variables dependientes	El campo velocidad	\underline{v}	Unidad SI: m/s
	La presión	P	Unidad SI: Pa
	La variable de conjunto de niveles		Adimensional
	La distancia de interfaz inicial recíproca		Unidad SI: 1/m
Geométrico Cantidades	Interfaz	Γ	$\Gamma = \{x \phi(x, t) = 0\}$
	interfaz vectorial normal	N	$n = \frac{\nabla\phi}{ \nabla\phi }$
	curvatura de la interfaz,	K	$k = \nabla \cdot \frac{\nabla\phi}{ \nabla\phi }$

Tabla 1: Resumen del modelado.

Como criterio de diseño, el movimiento incipiente es importante en el estudio del transporte de sedimentos, la degradación del canal y el diseño de canales estables. Debido a la naturaleza estocástica del movimiento de sedimentos a lo largo de un lecho fluvial, es difícil definir con precisión en qué condición de flujo comenzará a moverse una partícula de sedimento. No existe un criterio único que indique las condiciones en las que se inicia el transporte de sedimentos. Los criterios de movimiento incipiente se derivan de un enfoque de esfuerzo de cizallamiento o enfoque de velocidad.

Uno de los criterios de movimiento incipiente más prominentes y ampliamente utilizados es el diagrama de Shields basado en la tensión cortante. Shields asumió que los factores en la determinación del movimiento incipiente son la tensión cortante, la diferencia de densidad entre sedimento y fluido, el diámetro de la partícula, la viscosidad cinemática y la aceleración gravitacional. (Ochoa García, 2018) y (Vanoni, 1975).

El método de elementos finitos se utilizó para resolver el modelo con un software apropiado para aplicaciones físicas y de ingeniería. El modelo geométrico se muestra en la Fig. 2.

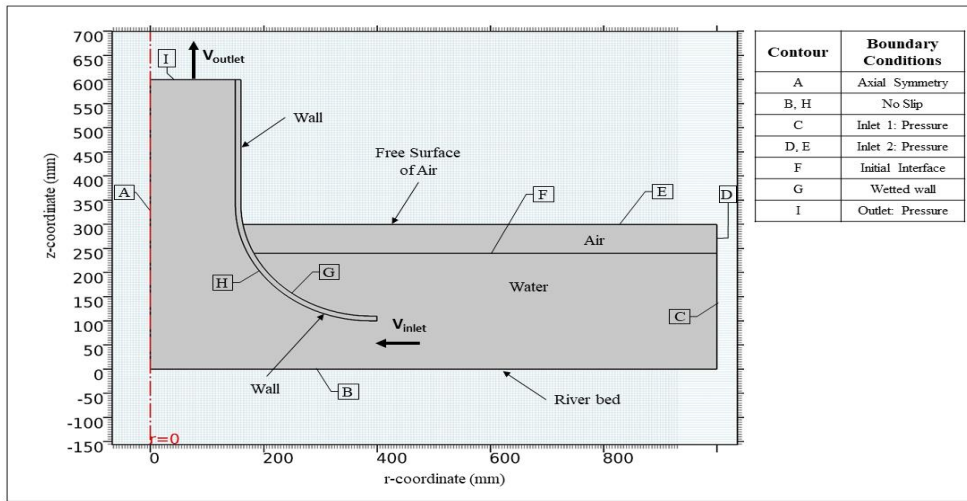


Figura 2. Modelo geométrico y condiciones de contorno.

La [Tabla 2](#) presenta los diferentes tipos de condiciones de contorno y la [Fig. 2](#) muestra los contornos del modelo.

Configuración numérica y discretización

Se realizaron simulaciones numéricas con el método level set. Se utilizó un tipo de malla cuádruple libre no estructurada y se calibró para la dinámica de fluidos. La malla consta de 23.490 elementos de dominio y 1.176 elementos límite, con un tamaño máximo de elemento de 4,02 mm y un tamaño mínimo de elemento de 0,012 mm.

Condiciones de contorno			
Tipo y condición	Valor	Ecuación	Unidades
Pared 1: Sin deslizamiento		$\underline{v} = \underline{0}$	m/s
Pared 2: Pared mojada		$\underline{v} \cdot \underline{n} = 0, \underline{v}_t \cdot \underline{n} = 0^{(1)}$ $-\nabla \cdot \underline{N}_\phi = 0$ $\sigma \left(n - n \cos(w_{int}) Q_{fr} \frac{\mu}{\beta} \underline{v} \right)$ $\sigma \left(n - n \cos(w_{int}) Q_{fr} \frac{\mu}{\beta} \underline{v} \right)^{(2)(3)(4)}$	
Entrada 1: Presión	0	$\underline{n}^T [-p \underline{I} + \mu(\nabla \underline{v} + (\nabla \underline{v})^T)] \underline{n} = -p_0$ $\underline{v} \cdot \underline{t} = 0$	Pa
Entrada 2: Presión	0	$\underline{n}^T [-p \underline{I} + \mu(\nabla \underline{v} + (\nabla \underline{v})^T)] \underline{n} = -p_0$ $\underline{v} \cdot \underline{t} = 0$	Pa

Salida 1: Presión	-10000	$[-p_l + \mu(\nabla v + (\nabla v)^T)]\underline{n} = -\hat{p}_0 \underline{n}$ $[-p_l + \mu(\nabla v + (\nabla v)^T)]\underline{n} = -\hat{p}_0 \underline{n} ; \hat{p}_0 \leq p_0$ $\hat{p}_0 \leq p_0$	Pa
Simetría axial		$v_r = 0$	
En la interfaz, Γ , entre las fases se encuentran:		$(2\mu_l \underline{D} - 2\mu_g \underline{D}) \cdot \underline{n} = (p_l - p_g + \sigma k) \underline{n}$ $\underline{y}_l = \underline{y}_g$ $\underline{x} \in \Gamma,$	
⁽¹⁾ \underline{n} es un vector normal a esa superficie, ⁽²⁾ θ_w es un ángulo de contacto, ⁽³⁾ β es una longitud de deslizamiento, ⁽⁴⁾ \underline{F}_{fr} es fuerza de fricción.			

Tabla 2. Modelo de condiciones de contorno.

RESULTADOS

La simulación numérica permite establecer el comportamiento de la superficie libre y la admisión o no de aire a la bomba de entrada. La entrada de aire en el sistema de succión no es deseada. La [Figura 3](#) muestra el resultado de la magnitud de la velocidad para el tiempo 0,47 s.

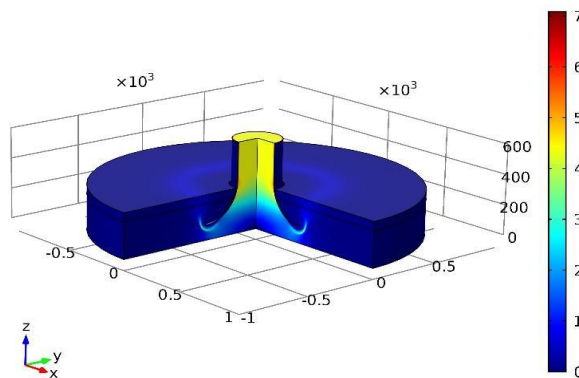


Figura 3: Magnitud de la velocidad (aire y agua) para el tiempo 0,47s

La [Figura 4](#) muestra la posición de la interfaz aire-agua en geometría 3D para el tiempo 0,47s. No es necesario simular tiempos más largos, ya que con las condiciones iniciales y de contorno utilizadas, es posible identificar que la fase de aire ya ingresa en la entrada de la bomba.

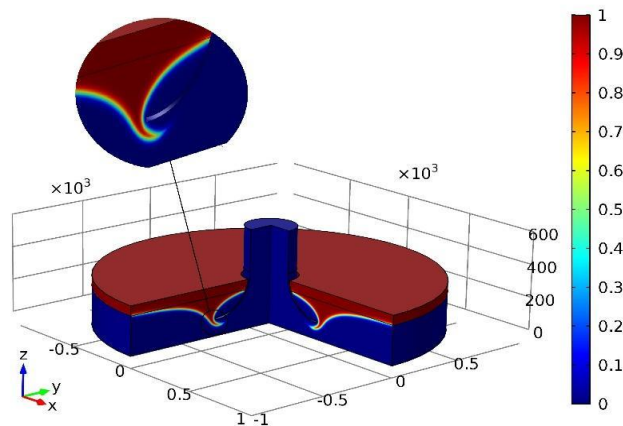
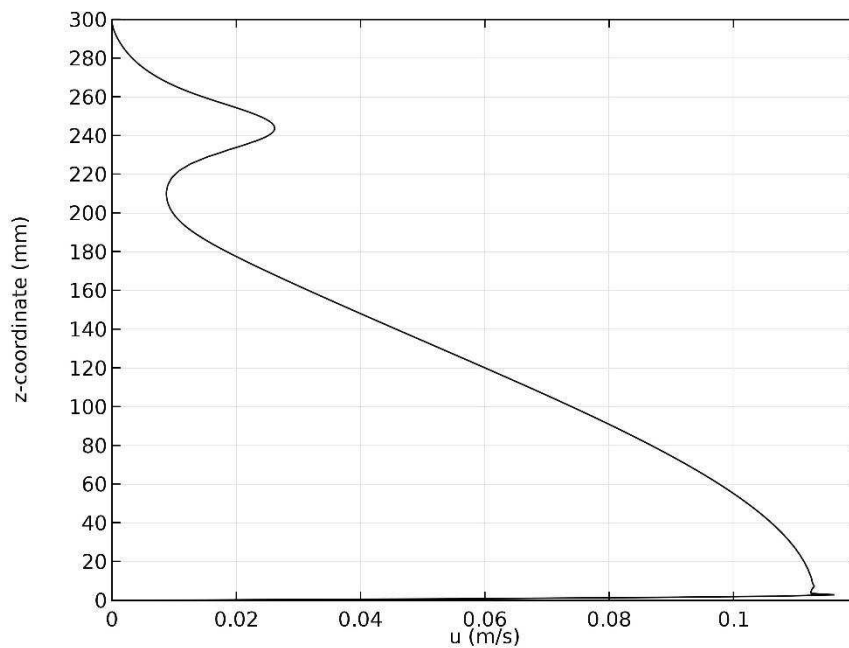


Figura 4: Fracción de volumen de aire para el tiempo 0,47s

La Figura 5 muestra la variación de la velocidad radial en función de la altura para el tiempo 0,47s. La sección transversal se encuentra en $r = 600$ mm. Es posible observar a partir de los resultados que el patrón de flujo es concordante con el presentado en la Figura 1. De acuerdo con uno de tipo estratificado.

Figura 5: Campo de velocidad, componente r para $r=600$ mm y tiempo 0,47s

La Figura 6 muestra la variación de la velocidad radial en función de la altura para el tiempo 0,3s y el tiempo 0,47s. La sección transversal se encuentra en $r = 400$ mm. La comparación entre los resultados, cuando el aire entra en la bomba, muestra un aumento significativo en la velocidad del aire.

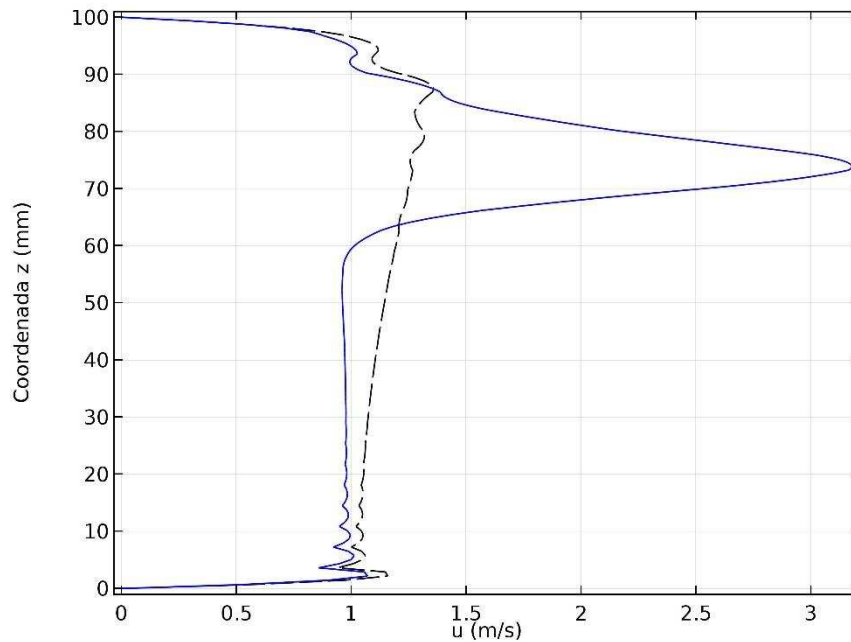


Figura 6. Campo de velocidad, componente r para $r = 400$ mm y multiplicado por 0,30s (línea discontinua negra) y 0,47s (línea sólida azul)

CONCLUSIÓN

Los resultados de la simulación numérica para el flujo de entrada de bombas, modelado como flujo laminar bifásico, dan una herramienta de diseño que permitirá disminuir el paso de sedimentos, evitando la avería de la bomba.

El modelo y la técnica numérica utilizada, permitieron simular de forma no estacionaria el flujo de aire, agua y el seguimiento de la interfaz en una geometría bidimensional. Esta metodología se puede utilizar como una poderosa herramienta de diseño. Permite detectar la evolución de la interfaz aire-agua en la entrada de la bomba.

Esta herramienta de diseño permite analizar diferentes formas geométricas de entrada de bomba que minimizan el arrastre de partículas en aplicaciones de aguas poco profundas.

Con el modelo y la técnica empleada, se espera que en un futuro próximo se avance en simulaciones que permitan un análisis paramétrico del arrastre de sedimentos para diversos caudales requeridos para el riego.

REFERENCIAS

- Agencia Córdoba Ambiente – INTA, 2006. “Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba. Los Suelos”. EEA Manfredi. Córdoba. Argentina.
- Degiovanni, S., et al., 2013. “Análisis de la carga de fondo y dinámica de transporte en el río 4°, provincia de Córdoba, como base para una minería de áridos sustentable”. Revista de la Asociación Geológica Argentina, Vol. 70 pp. 238-248.
- Duong A. Hoang, et al., 2013, Benchmark numerical simulations of segmented two-phase flow in microchannels using the Volume of Fluid method, Computers & Fluids 86 (2013) 28–36
- Food and Agriculture Organization (FAO), 2002. Report: “Agricultura Mundial hacia los años 2015/2030”, ISBN 92-5-304761-5.
- Food and Agriculture Organization (FAO), 2015, “Estudio del potencial de ampliación del riego en Argentina”, ISBN 978-92-5-308995-6.
- Gerlach D., Tomar G., Biswas G., Durst F., 2005. "Comparison of volume-of-fluid methods for surface tension-dominant two-phase flow". International Journal of Heat and Mass Transfer,

Vol. 49, pp. 740-754.

Kong R., Kim S., 2017, "Characterization of horizontal air–water two-phase flow", *Nuclear Engineering and Design* 312, 266–276

Mandhane, J.M., Gregory, G.A., Aziz, K., 1974. A flow pattern map for gas—liquid flow in horizontal pipes. *Int. J. Multiphase Flow* 1 (4), 537–553.

Ochoa García, S. A., 2018. Simulación Hidrodinámica Tridimensional con Procesos de Transporte de Sedimentos en un Cauce Natural. M. Sc. thesis, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

Osher S. and Sethian J.A. 1987. Fronts propagating with curvature dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations. (NASA –CR- 178382) ICASE REPORT No. 87-66.

Osher SJ, Sethian JA. 1988. Fronts propagating with curvature dependent speed: algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations. *J.Comput. Phys.* 79:12–49

Qifeng Jiang et al., 2019, "A Review of Design Considerations of Centrifugal Pump Capability for Handling Inlet Gas-Liquid Two-phase flow", *Energies*, 1078; doi:10.3390/en12061078w

Salinas A., et al., 2006. "Riego Suplementario en Cultivos Extensivos en la Provincia de Córdoba Situación Actual". EEA Manfredi. INTA. Manfredi. Córdoba.

Sussman M, Smereka P, Osher S., 1994. A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow. *J Comput Phys* 1994; 114:146–59.

Sethian J.A., Smereka P., 2003. Level set methods for fluid interfaces. *Annu Rev Fluid Mech* 2003; 35:341–72.

Turton R. K., 1995. "Principles of Turbomachinery", 2 ed, Chapman & Hall, ISBN 0 412 60210 5, London, UK.

Taitel, Y., Dukler, A.E., 1976. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE J.* 22 (1), 47–55.

Vanoni, V.A., 1975. "Sedimentation Engineering: American Society of Civil Engineers", *Manuals and Reports on Engineering Practice*, Vol. 54, p. 745.

Wang, Z., Yang, J., Koo, B. and Stern, F. 2008. "A coupled level set and volume-of-fluid method for sharp interface simulation of plunging breaking waves". *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 35, pp. 227–246.

World Bank, 2006. Report N° 32763-AR, "Agricultura y Desarrollo Rural en Argentina: Temas Claves".