

# Análisis experimental y numérico del flujo rotatorio en un medio finito

A. Lizardi-R.  
A. Díaz-C.  
R. López-C.  
J. R. Morales-G.  
A. Lara-V.  
H. Terrés-P.  
R. de J. Portillo-V.

Departamento de Energía, Área de Termofluidos, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Del. Azcapotzalco. CP. 02200 México DF. MÉXICO.

Tel.: 52 (55) 5318-9060 Fax: 52 (55) 5318-9058

correo electrónico: arlr@correo.azc.uam.mx  
rlc@correo.azc.uam.mx

Recibido el 18 de mayo de 2006; aceptado el 26 de enero de 2007.

## 1. Resumen

Se presenta la comparación entre los resultados experimentales y numéricos del flujo generado en el interior de un cilindro vertical con tapa giratoria y el fondo y paredes fijas. El prototipo cilíndrico se construyó de acrílico transparente con un disco impulsor que se hizo girar a velocidad variable. El desarrollo experimental del flujo se realizó por Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV), con el cual se obtuvieron los campos de las componentes de velocidad radial, tangencial y axial. Se resolvieron numéricamente las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento y de continuidad para un flujo permanente con fluido viscoso e incompresible confinado en un cilindro vertical cerrado, aplicando el método de diferencias finitas. La relación del depósito alto/radio empleado fue igual a la unidad y el número de Reynolds fue de  $5 \times 10^4$ . El análisis de los resultados obtenidos refleja que es posible la simulación del flujo con el método empleado, ya que la diferencia fue inferior al 3% para la componente de velocidad radial, 0.3% para la tangencial y de 10.6% para la axial.

**Palabras clave:** flujo rotatorio, PIV.

## 2. Abstract (Experimental and Numerical Analysis of a Rotating Flow in a Finite Medium)

Experimental results of the flow driven by a rotating top coupled to a vertical cylinder are compared against the numerical results obtained by means of a finite differences numerical scheme. The tested flow was confined in a cylinder built in acrylic plastic. The cylinder was fitted with a rotating disk on top of the filler fluid. The rotating disk was rotated to different angular speeds. The experiment was performed by means of the PIV technique. The high to diameter ratio was one and the Reynolds Number to which the results were obtained was  $5 \times 10^4$ . A comparison of the experimental results shows that the numerical results are within an acceptable range, since the radial velocity component differs in less than the 3%; the tangent velocity component in 0.3% and the axial velocity component in 10.6%. As a final conclusion it can be said that the simulation of the studied phenomenon is possible with the employed method.

**Key words:** rotating flow, PIV.

## 3. Introducción

El flujo rotatorio en sistemas cilindro-disco es importante por las aplicaciones prácticas que tiene en el campo de la ingeniería y por el análisis teórico que presenta al resolver las ecuaciones de movimiento. Entre las aplicaciones prácticas se puede mencionar el flujo en viscosímetros rotatorios, cámaras de combustión, maquinaria centrífuga, etc. El análisis experimental de éstas y otras aplicaciones es de gran interés pues con ello se puede obtener información que permita mejorar el diseño de dichos equipos. Veera et al. [1], construyeron un modelo de una bomba de agua para validar los resultados numéricos que simulan el flujo turbulento tridimensional en la succión de una bomba en un canal rectangular. Los experimentos involucraron visualizaciones de flujo con tinte y mediciones del campo de flujo con la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV). Wei et al. [2] construyeron un cilindro de vidrio con superficie abierta a la atmósfera, sumergido en agua en un recipiente cúbico transparente. En el fondo del cilindro se colocó un disco giratorio y se utilizó un sistema Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) de doble pulso para el análisis. Se

obtuvieron el flujo secundario en el plano meridional del cilindro y la distribución radial de la velocidad tangencial para analizar el movimiento primario del vórtice.

Por otro lado, las expresiones matemáticas que describen el comportamiento dinámico del flujo rotatorio parte de las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas polares cilíndricas. La no linealidad y el acoplamiento de sus términos hacen que su solución sea compleja. Por ello la simulación numérica, al paso del tiempo, se ha desarrollado ampliamente. Hsien-Ping Pao [3] propuso un método numérico para analizar un fluido viscoso incompresible confinado en una cámara cilíndrica donde la tapa superior está rotando a una velocidad angular constante y las paredes y fondo del recipiente permanecen fijos. Se analiza la función corriente y circulación, la distribución de velocidades y el coeficiente de par para un rango del número de Reynolds de 1 a 400. Bertelá y Gori [4] presentaron un método numérico que permite resolver el flujo estable y transitorio de un fluido dentro de una cámara cilíndrica con la cubierta rotando. En el estudio se analizan 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. Lang et al. [5] estudiaron numéricamente el flujo laminar estable en un cilindro fijo con un disco rotando en la tapa superior. El trabajo resalta el análisis del coeficiente de torque y de los flujos volumétricos primario y secundario para un rango del número de Reynolds de 1 a  $10^5$  y para una relación geométrica de 0.02 a 3.

El objetivo de este trabajo es analizar experimental y numéricamente el campo de las componentes de velocidad radial, azimutal y axial para el flujo rotatorio en el interior de un cilindro vertical con la tapa rotatoria y paredes y fondo fijos. Lo anterior para una relación geométrica alto/radio del depósito unitaria y para un número de Reynolds de  $5 \times 10^4$ . El análisis experimental se hará sobre un cilindro de acrílico transparente con el fondo y paredes fijas provisto de un disco impulsor en la tapa, que gira por medio de un motor de velocidad variable. El flujo se analizará con un sistema de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV). El análisis numérico resolverá las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento expresadas en función de la vorticidad ( $\zeta$ ), circulación ( $\gamma$ ) y función corriente meridional ( $\psi$ ) con las condiciones de frontera apropiadas.

#### 4. Equipo experimental

Para determinar las propiedades del flujo en el interior de un cilindro, con tapa rotatoria y paredes y fondo fijos, se diseñó y construyó un banco de pruebas, Fig. 1, que consta de los siguientes elementos:

- Un cilindro de acrílico transparente de 0.142 m de diámetro interior, 0.225 m de altura y 0.009 m de espesor en la pared y fondo.
- Un disco de acrílico transparente de 0.141 m de diámetro por 0.009 m de espesor. El disco tiene acoplado un buje de 0.030 m de longitud, 0.020 m de anchura y 0.009 m de espesor. La función del buje es acoplar el eje de transmisión con el disco. El buje cuenta con un barreno central de 0.012 m de diámetro para alojar el eje de transmisión y un barreno lateral donde se introduce un tornillo prisionero que evita el deslizamiento de dicho eje.
- Un eje de transmisión de aluminio de 0.05 m de largo por 0.012 m de diámetro. Uno de los lados del eje se introduce al buje del disco rotatorio y el otro lado se acopla, por medio de un barreno, al eje del motor.
- Un motor de C.D. de 50 Watts provisto de un variador de velocidad. Con este último es posible ajustar una velocidad angular constante respecto a la velocidad máxima del motor eléctrico, que es de 1800 rpm.
- Un rodamiento construido de hierro colado y acero, de 0.1 m de largo, 0.1 m de ancho, 0.025 m de altura y con un diámetro para acoplamiento de eje de 0.012 m. El rodamiento se fija a una base de acrílico para acoplar el motor y el cilindro de acrílico.
- Un tanque de acrílico transparente de 0.4 m ancho, 0.6 m de largo y 0.5 m de altura por 0.009 m de espesor. El tanque tiene como función contener el cilindro de pruebas en su interior de tal manera que éste quede sumergido en agua con el objeto de reducir los reflejos de rayo láser debido a la curvatura del cilindro.
- Un tacómetro digital Extech Instruments modelo 461501 con un rango de 10-99999 rpm, resolución máxima de 0.001 rpm y exactitud de  $\pm 0.1 \%$ . Con él se mide la velocidad angular que se requiere para obtener un número de Reynolds constante.
- Un equipo de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) Dantec Dynamics que consta de una fuente láser SOLO PIV-15 de 50 MJ, cámara 2M con interfase, mecanismo posicionador con barrido de 0.61x0.61x0.61 m y computadora workstation.

#### 5. Procedimiento experimental

La metodología empleada en la realización de la experimentación fue la siguiente:

- El interior del recipiente cilíndrico se llenó con agua y partículas de 20 micras. Se introdujo el disco impulsor y

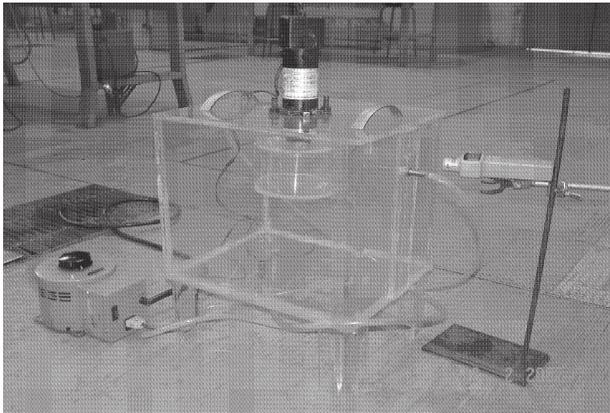


Fig. 1. Banco de pruebas para flujo rotatorio

se fijó el conjunto en la base que tiene montado el motor, el eje de transmisión y el rodamiento.

- Se llenó el tanque exterior con agua y se colocó el modelo en la parte superior del mismo. Nota: el nivel de agua debe sobrepasar el disco impulsor para asegurar que el área de estudio quede sumergida.
- Se seleccionó la velocidad de operación del motor con ayuda del variador de velocidad. Se accionó el motor y se esperó un tiempo adecuado para que el sistema se estabilizara. La velocidad se midió con un tacómetro digital. La lectura de éste se hace con el sensor ubicado en el eje de transmisión.
- Se accionó el equipo de Velocimetría y se alineó la luz del láser, con el mecanismo posicionador, de tal manera que se aseguró que ésta pasara por el eje del cilindro. Nota: En este paso se fija la posición del eje X.
- Se alineó la cámara, con el mecanismo posicionador, de tal manera que pudiera observar el flujo en el interior del cilindro. Nota: En este paso se fija la posición del eje Y y Z y se enfocó la cámara.
- Con el software del PIV se ajustó el número de pulsos del láser y de imágenes que se deseaban adquirir. Se accionó el equipo y se almacenó la información en la computadora. Finalmente se graficaron y analizaron los resultados con el software del equipo.

Cabe mencionar que para obtener un número de Reynolds de  $5 \times 10^4$  se manejó en el modelo agua como fluido de trabajo con una viscosidad cinemática que corresponde a una temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , un radio interior del cilindro de  $0.07175\text{ m}$  y una velocidad angular de  $14.9\text{ rad/seg}$ .

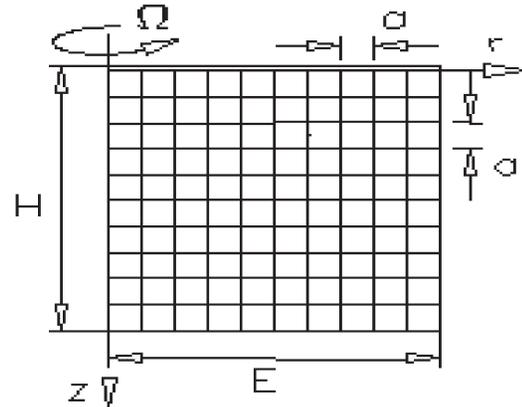


Fig. 2. Representación física del problema y malla para la solución numérica.

## 6. Planteamiento del problema y formulación matemática

El modelo físico consistió de un recipiente cilíndrico vertical de altura  $H$  y radio  $E$  que se encuentra lleno de un fluido newtoniano, viscoso e incompresible, Fig. 2. En la parte superior del depósito se ubicó al impulsor el cual se hace girar a una velocidad angular constante y que genera el movimiento del fluido.

El modelo matemático que describe el flujo axisimétrico de un fluido viscoso e incompresible, en estado permanente, rotando en el interior de un recipiente cilíndrico, esta dado por las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas polares cilíndricas  $(r, \phi, z)$ , [6].

$$\frac{\partial U}{\partial R} + \frac{U}{R} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial R} - \frac{V^2}{R} + W \frac{\partial U}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial R} + \nu \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} - \frac{U}{R^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right] \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial R} - \frac{UV}{R} + W \frac{\partial V}{\partial Z} = \nu \left[ \frac{\partial^2 V}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial V}{\partial R} - \frac{V}{R^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right] \quad (3)$$

$$U \frac{\partial W}{\partial R} + W \frac{\partial W}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Z} + \nu \left[ \frac{\partial^2 W}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial W}{\partial R} + \frac{\partial^2 W}{\partial Z^2} \right] - g \quad (4)$$

En este sistema de ecuaciones las variables dependientes son las tres componentes de velocidad (U, V, W) y la presión P. Con esto se tiene un sistema cuadrado de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas. Pero se tiene el problema de que la presión en cualquier punto del sistema depende directamente de las componentes de velocidad. Para salvar esta dificultad y reducir el término de la presión se hace una transformación de las ecuaciones en función de la vorticidad ( $\zeta$ ), circulación ( $\gamma$ ) y función corriente meridional ( $\psi$ ), posteriormente se adimensionalizan, discretizan y resuelven. La forma resultante de estas ecuaciones es, [3]

$$u \frac{\partial \Gamma}{\partial r} + w \frac{\partial \Gamma}{\partial z} = \frac{1}{\text{Re}} \left[ \nabla^2 \Gamma - \frac{2}{r} \frac{\partial \Gamma}{\partial r} \right] \quad (5)$$

$$u \frac{\partial \xi}{\partial r} + w \frac{\partial \xi}{\partial z} - \frac{u\xi}{r} - \frac{1}{r^3} \frac{\partial(\Gamma^2)}{\partial z} = \frac{1}{\text{Re}} \left[ \nabla^2 \xi - \frac{\xi}{r^2} \right] \quad (6)$$

$$\nabla^2 \Psi - \frac{2}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} = r\xi \quad (7)$$

Los parámetros que relacionan las variables adimensionales ( $r, z, u, v, w, \Psi, \Gamma, \xi$ ) con las dimensionales ( $R, Z, U, V, W, \psi, \gamma, \zeta$ ) se definen como

$$\frac{R}{E} = r, \quad \frac{Z}{H} = z, \quad \frac{U}{\Omega E} = u, \quad \frac{V}{\Omega E} = v, \quad \frac{W}{\Omega E} = w, \quad (8)$$

$$\frac{\Psi}{\Omega E^3} = \Psi, \quad \frac{\gamma}{\Omega E^2} = \Gamma, \quad \frac{\zeta}{\Omega} = \xi, \quad \text{Re} = \frac{\Omega E^2}{\nu}$$

La función corriente, circulación y vorticidad están definidas por

$$\begin{aligned} \gamma &= 2\pi VR, & \zeta &= \frac{\partial U}{\partial Z} - \frac{\partial W}{\partial R}, \\ U &= \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial Z}, & W &= -\frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R}, \end{aligned} \quad (9)$$

Donde E es el radio del depósito y  $\Omega$  es la velocidad angular del impulsor y Re es el número de Reynolds definido para este sistema. La ecuación de transporte de la circulación (5) y de transporte de la vorticidad tangencial (6) son ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden no lineales de tipo parabólico. La ecuación de Poisson para la función corriente meridional (7) es una ecuación diferencial parcial de segundo orden de tipo elíptico, [7].

Las condiciones de frontera para el caso del fondo rígido [8], son

$$\begin{aligned} r=0, & \quad \Psi = 0, & \Gamma = 0, & \quad \xi = 0 \\ r=1, & \quad \Psi = 0, & \Gamma = 0, & \quad \xi = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} \\ z=1, & \quad \Psi = 0, & \Gamma = r^2, & \quad \xi = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \\ z=0, & \quad \Psi = 0, & \Gamma = 0, & \quad \xi = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (10)$$

## 7. Tratamiento numérico

Para resolver las ecuaciones (5), (6) y (7), junto con las condiciones de frontera (10), es necesario transformarlas a un espacio discreto, el cual es el espacio manejado por las computadoras. En el método numérico se aplica un esquema de diferencias finitas para reemplazar las ecuaciones diferenciales parciales por expresiones algebraicas aproximadas, que se obtienen de un desarrollo truncado de la serie de Taylor. La aproximación empleada en el método numérico para las ecuaciones que rigen en el sistema estudiado y las fronteras del mismo son de segundo y cuarto orden, respectivamente.

En la Fig. 2 se representa la malla en el plano meridional continuo ( $r, z$ ) para el flujo axisimétrico considerado. Así, las ecuaciones en diferencias finitas que rigen el movimiento del fluido en el interior del sistema son:

$$\begin{aligned} \Gamma_{i,j} &= \frac{1}{4} \left\{ \left[ \left( 1 - \frac{1}{2i} - \frac{\text{Re}}{4ai} (\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}) \right) \Gamma_{i+1,j} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left[ \left( 1 + \frac{1}{2i} \right) + \frac{\text{Re}}{4ai} (\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}) \right] \Gamma_{i-1,j} \right. \\ &\quad \left. + \left[ 1 + \frac{\text{Re}}{4ai} (\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}) \right] \Gamma_{i+1,j} + \right. \\ &\quad \left. + \left[ 1 - \frac{\text{Re}}{4ai} (\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}) \right] \Gamma_{i-1,j} \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \xi_{i,j} &= i^2 \left\{ \left[ \left( 1 + \frac{1}{2i} \right) - \frac{\text{Re}}{4ai} (\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}) \right] \xi_{i+1,j} + \right. \\ &\quad \left[ \left( 1 - \frac{1}{2i} \right) + \frac{\text{Re}}{4ai} (\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}) \right] \xi_{i-1,j} \right. \\ &\quad \left. + \left[ 1 + \frac{\text{Re}}{4ai} (\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}) \right] \xi_{i+1,j} + \right. \\ &\quad \left. + \left[ 1 - \frac{\text{Re}}{4ai} (\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i-1,j}) \right] \xi_{i-1,j} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\text{Re} \Gamma_{i,j}}{a^2 i^3} (\Gamma_{i+1,j} - \Gamma_{i-1,j}) \right\} \quad (12) \end{aligned}$$

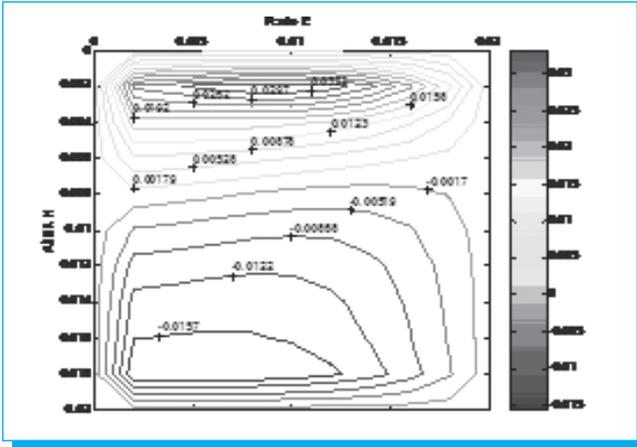


Fig. 3. Componente de velocidad U, Re = 5x10<sup>4</sup> (numérico).

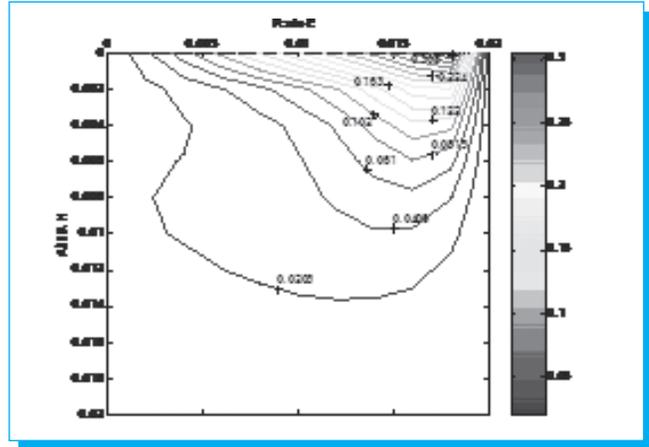


Fig. 5. Componente de velocidad V, Re = 5x10<sup>4</sup> (numérico).

$$[4i^2 + 1 + \frac{Re}{2a}(\Psi_{i,j-1} - \Psi_{i,j+1})]^{-1} \quad (12)$$

$$\Psi_{ij} = \frac{1}{4}[(1 - \frac{1}{2i})\Psi_{i+1,j} + (1 + \frac{1}{2i})\Psi_{i-1,j} + \Psi_{i,j+1} + \Psi_{i,j-1} + ia^3\xi_{ij}] \quad (13)$$

Los subíndices i y j denotan los puntos en el espacio de la malla, en las direcciones r y z, respectivamente, Fig. 2. Para valores dados de i y j, las coordenadas en el espacio son r=ia, z=ja. En donde a es el espaciado de la malla. Para obtener los campos de la vorticidad, circulación y función corriente meridional se generó un programa de cómputo en lenguaje de programación C++. Dicho programa realiza el mallado

del sistema, aplica las ecuaciones (11), (12) y (13) a cada nodo interno del sistema y la ecuación (10), previamente discretizada, a cada nodo ubicado en la frontera del mismo. Posteriormente, por medio de una subrutina, resuelve el sistema de ecuaciones en forma iterativa hasta encontrar la convergencia. El criterio de convergencia utilizado es del tipo de error relativo, de la forma,

$$\max \left[ \frac{\Psi^{\sigma+1} - \Psi^{\sigma}}{\Psi^{\sigma}} \right] < \epsilon$$

El orden de precisión de  $\epsilon$ , para este trabajo, fue de 0.0001.

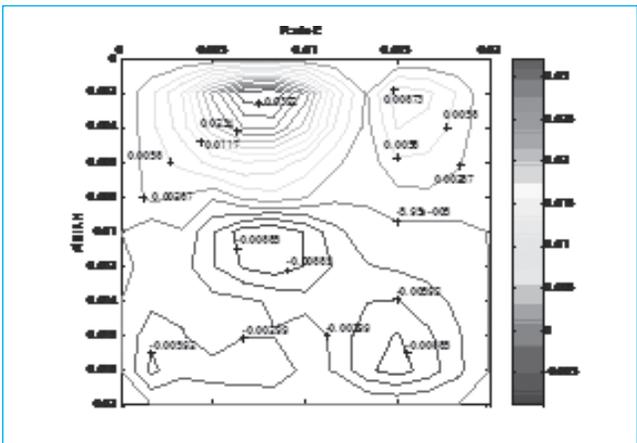


Fig. 4. Componente de velocidad U, Re = 5x10<sup>4</sup> (experimental).

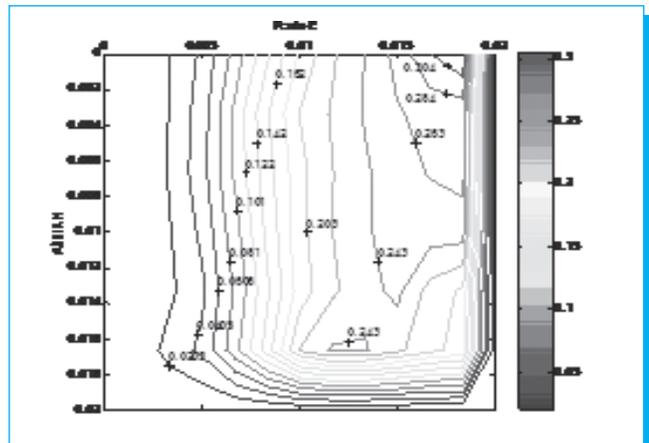


Fig. 6. Componente de velocidad V, Re = 5x10<sup>4</sup> (experimental).

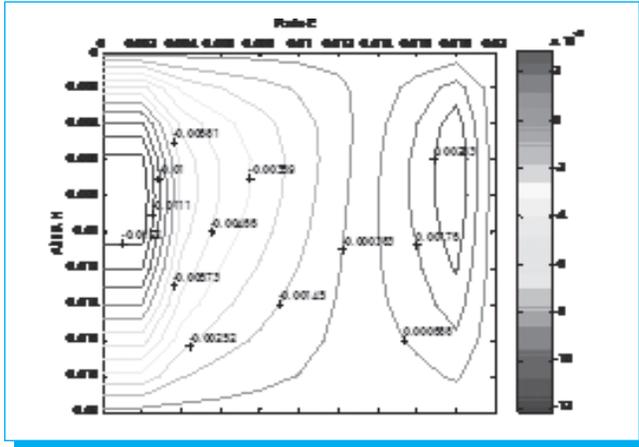


Fig. 7. Componente de velocidad  $W$ ,  $Re = 5 \times 10^4$  (numérico).

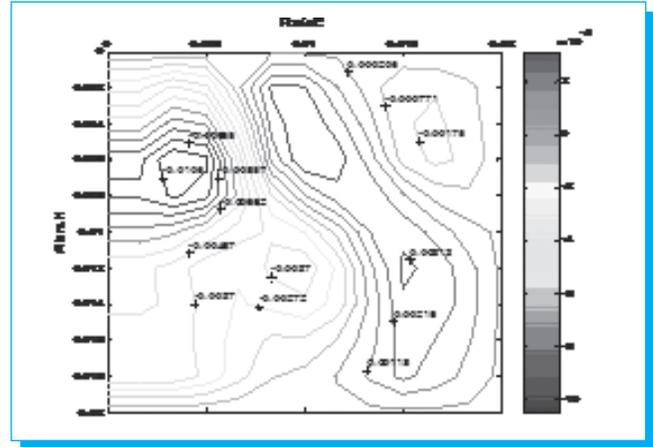


Fig. 8. Componente de velocidad  $W$ ,  $Re = 5 \times 10^4$  (experimental).

## 8. Resultados y discusión

Los campos de las componentes de velocidad para un número de Reynolds de  $5 \times 10^4$ , un factor de forma  $H/E$  igual a 1 y usando la condición de frontera cerrada, se muestran en las Figs. 3 a 8. Es importante resaltar que los resultados experimentales se adimensionalizaron de acuerdo a los parámetros de la ecuación (8). Lo anterior con objeto de hacer una comparación con los resultados numéricos.

En la componente de velocidad radial, para un  $Re=5 \times 10^4$ , Fig. 3, se observan dos zonas, una positiva cerca del disco impulsor y otra negativa sobre el fondo rígido. Los valores máximos se ubican en el centro de los flujos y sus magnitudes son 0.0332 y -0.0157. El flujo radial es grande cerca de frontera en movimiento y genera una capa límite intensa sobre el disco giratorio. Algo similar, pero con un flujo en dirección contraria se nota en el fondo del cilindro. Ambos flujos hacen que entre las capas límite formadas aparezca una zona donde no existe flujo radial, teniéndose como flujo principal las componentes azimutal y axial. Para el caso experimental, Fig. 4, se nota la división del sistema en las mismas zonas positiva y negativa pero con valores distintos. El valor máximo positivo, ubicado en la parte superior del sistema, es de 0.0322 y la magnitud máxima negativa, ubicada cerca del fondo rígido, es de -0.00885. Tanto en el flujo radial positivo como en el negativo se aprecian algunas zonas de baja velocidad, lo anterior es por la influencia que tiene la pared y fondo rígidos sin movimiento. Al hacer una comparación entre los resultados experimentales y numéricos se observa que hay una diferencia de -0.001.

En la componente de velocidad tangencial, para un Reynolds de  $5 \times 10^4$ , Fig. 5, se observa que el valor máximo, 0.305, se

ubica en la parte superior derecha del sistema. De allí, su magnitud va disminuyendo desde el disco impulsor hacia el fondo rígido, eje del sistema y pared del recipiente. La distribución de velocidad azimutal del fluido, tiene un valor grande sobre el disco rotatorio y depende de la coordenada radial y axial. Respecto a la coordenada radial, la velocidad tangencial comienza en el eje de rotación con un valor de cero, empieza a crecer su magnitud hasta un máximo, cerca de la frontera rígida, y disminuye nuevamente su valor hasta hacerse cero sobre la pared del recipiente. La variación en la coordenada axial también tiene una tendencia a disminuir desde el impulsor en movimiento, donde toma su valor máximo, hasta el fondo del recipiente, donde su magnitud disminuye. En general, el flujo azimutal se reduce debido a las paredes sólidas, excepto cerca del disco giratorio, donde se tiene un flujo tipo capa límite de Ekman en la dirección radial. Para el caso experimental, Fig. 6, se observa la misma tendencia pero con valores distintos. El valor máximo, ubicado en la parte superior derecha del sistema, es de 0.304. Haciendo una comparación entre los resultados experimentales y los numéricos se observa que hay una diferencia de -0.001.

La componente de velocidad axial, para un  $Re=5 \times 10^4$ , Fig. 7, también se forma de dos zonas, una positiva cerca de la pared del recipiente y otra negativa sobre el eje de rotación. Los valores máximos se ubican en el centro de los flujos y sus magnitudes son 0.00283 y -0.0122. La distribución de velocidad vertical del fluido, tiene un valor grande sobre la pared del depósito y disminuye su magnitud en la región central del sistema. Cerca de la pared del recipiente se forma una capa límite, similar a la formada sobre el disco impulsor

y fondo rígido, caso de flujo radial. Estos dos flujos hacen que entre las capas límite formadas aparezca una zona donde no hay flujo axial, teniéndose como flujo principal las componentes de velocidad radial y tangencial. Para el caso experimental, Fig. 8, se nota la división del sistema en las mismas zonas positiva y negativa pero con valores distintos. El valor máximo positivo, ubicado cerca de la pared del recipiente, es de 0.00313 y la magnitud máxima negativa, ubicada cerca de eje del sistema, es de -0.0105. Tanto en el flujo radial positivo como en el negativo se aprecian algunas zonas de baja velocidad, lo anterior es por la influencia que tiene la pared y fondo rígidos sin movimiento. Al hacer una comparación entre los resultados experimentales y numéricos se observa que hay una diferencia de 0.0003.

Como puede observarse, la distribución de las componentes de velocidad radial, azimutal y vertical, tanto experimentales como numéricas, se componen de las mismas regiones de flujo, tienen las mismas direcciones y sus valores están en el mismo orden de magnitud. Por lo anterior se puede decir que, para este número de Reynolds, se tiene una buena aproximación entre ambos análisis. Esto motiva a generar mayor investigación experimental y numérica, que permita analizar nuevos números de Reynolds, factores de forma o geométricos H/E y distintos tipos de impulsor, con la intención de conocer las importantes propiedades cinemáticas que se generan en los sistemas cilindro-impulsor.

## 9. Conclusiones

En este trabajo, que analiza experimental y numéricamente el flujo rotatorio en un medio finito con fondo rígido, se encontró que los campos de la componente de velocidad radial están descritos por dos flujos, uno positivo, ubicado cerca del disco impulsor, y otro negativo, ubicado en el fondo del depósito. Al comparar los resultados experimentales con los numéricos se encontró una diferencia de -3.012%. Se encontró que la componente de velocidad tangencial está descrita por un núcleo que se ubica en la parte superior derecha del sistema. En dicha zona se observa el máximo valor y de allí su magnitud va disminuyendo desde el disco

impulsor hacia el fondo rígido, eje del sistema y pared del recipiente. Al hacer una comparación de los resultados experimentales con los numéricos se encontró una diferencia de -0.328%. Finalmente se encontró que los campos de la componente de velocidad axial están descritos por dos flujos, uno positivo, ubicado cerca de la pared del recipiente, y otro negativo, ubicado en el eje del sistema. Al comparar los resultados experimentales con los numéricos se encontró una diferencia de 10.60%. Aunque el porcentaje de desviación en la componente de velocidad vertical no es despreciable, los resultados muestran buena concordancia entre el método numérico propuesto y los resultados experimentales obtenidos.

## 10. Referencias

- [1] Veera P. Rajendran, G. S. Constantinescu, V. C. Patel. "Experiments on flow in a model water-pump intake sump to validate a numerical model". Proceedings of FEDSM'98. 1998 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. June 21-25, 1998, Washington, DC.
- [2] Wei J., Li F., Yu B., Kawaguchi Y. "Swirling flow of a viscoelastic fluid with free surface-part 1. Experimental analysis of vortex by PIV". Journal Fluids Engineering. Vol. 128, January 2006.
- [3] Hsien-Ping Pao. "Numerical solution of the Navier Stokes equations for flows in the disk-cylinder system". The physics of fluids. Vol. 15, Num. 1. January 1972.
- [4] Manlio Bertelá, Fabio Gori. "Laminar flow in a cylindrical container with a rotating cover". Journal of fluids engineering. Vol. 104. March 1982.
- [5] E. Lang, K. Sridhar, N. W. Wilson. "Computational study of disk driven rotating flow in a cylindrical enclosure". Journal of fluids engineering. Vol. 116. December 1994.
- [6] Landau y Lifshitz. "Fluids Mechanics". Vol. 6, Pergamon Press. 1982.
- [7] Tijonov, A. N., Samarsky A. "Ecuaciones de la física matemática". Edit. MIR, Moscú, pp 1-29. 1980.
- [8] N. Gerber. "Properties of rigidly rotating liquids in closed partially filled cylinders". ASME Journal of Applied Mechanics. Vol. 97. 1975

## MAGNO CONGRESO INTERNACIONAL DE COMPUTACIÓN CIC IPN 2007

del 6 al 8 de noviembre

<http://magno-congreso.cic.ipn.mx>    [magno@cic.ipn.mx](mailto:magno@cic.ipn.mx)    [relpub@cic.ipn.mx](mailto:relpub@cic.ipn.mx)



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



## CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN COMPUTACIÓN

### II MAGNO CONGRESO INTERNACIONAL DE COMPUTACIÓN CIC-IPN

Microsoft

Sun  
microsystems

hp

CISCO SYSTEMS

"La Técnica al Servicio de la Patria"

www.ipn.mx

www.sep.gob.mx

# MAGNO CONGRESO INTERNACIONAL DE COMPUTACIÓN 2007

DEL 6 AL 8 DE NOVIEMBRE DE 2007

El Segundo Magno Congreso del CIC-IPN (MAGNO CIC 2007) tiene como objetivos: 1) reunir a investigadores, profesores, estudiantes y profesionales interesados en alguna de las líneas de investigación de la Ciencia de la Computación y la Ingeniería de Cómputo para que expongan e intercambien sus más recientes ideas y logros, 2) invitar a reconocidos científicos para que presenten ante los asistentes sus puntos de vista, así como los problemas abiertos donde se deba continuar haciendo investigación, 3) reconocer los mejores trabajos de estudiantes desarrollando sus trabajos de tesis en algunas de las referidas líneas de investigación, y 4) premiar los mejores prototipos de software y hardware desarrollados durante el presente año. En esta segunda edición, el MAGNO CIC 2007 se divide en los siguientes congresos: XVI Congreso Internacional en Computación (CIC 2007), el VIII Congreso Internacional en Control, Instrumentación Virtual y Sistemas Digitales (CICINDI 2007), II Congreso Internacional sobre Redes Neuronales y Memorias Asociativas (NNAM 2007), II Congreso Internacional sobre Metodologías y Desarrollo de Materiales para la Educación a Distancia (METODOLOGÍA 2007) y el I Congreso Internacional sobre Informática Industrial (CICINDIN 2007).

#### CONFERENCIAS MAGISTRALES



(CIC'2007)  
Édgar Sánchez Sinencio  
Universidad de Texas A&M, E.U.  
"Wireless Communications Circuits and Systems"



(CIC'2007)  
Cipriano A. Santos  
Principal Scientist HP Labs CA, E.U.  
"Workforce Planning for the IT Services Industry"



(CIC'2007)  
Issac D. Scherson  
University of California, Irvine - USA  
"Harnessing the Idle Computing Power of Very Large Distributed Systems"



(CIC'2007)  
Juan Eduardo Vargas  
MICROSOFT Co. USA  
"Connecting Dots in a Flat World"

(CICINDI'2007)

Adrian Cristal  
Universidad Politécnica de Catalunya,  
Barcelona, Spain  
"Transactional Memory on Chips Multiprocessors (many-cores)"



(CICINDIN'2007)

Pedro Albertos Pérez  
Universidad Politécnica de Valencia, España  
"Virtual Sensors. An Overview."



(NNAM'2007)

Martin Hagan  
Universidad del Estado de Oklahoma, E.U.  
"Training Dynamic Neural Networks: A Unified View"



(METODOLOGÍA'2007)

Julio Cabero Almendara  
Universidad de Sevilla, España  
"Nuevas Tecnologías y Enseñanza en la Era de Internet"



- CONFERENCIAS SOBRE TECNOLOGÍAS AVANZADAS DE LA INFORMACIÓN
- PONENCIAS TÉCNICAS
- SESIONES DE CARTELES
- CONFERENCIAS EMPRESARIALES
- EXPOSICIÓN DE EQUIPO DE CÓMPUTO Y SOFTWARE



#### SEDES:

Centro Cultural "Jaime Torres Bodet" Auditorio B "Manuel Moreno Torres"  
Av. Wilfrido Massieu s/n U.P. "Adolfo López Mateos" México, D.F.

Biblioteca Nacional de Ciencia y Tecnología  
Unidad Profesional "Adolfo López Mateos" Col. Zacatenco  
Delegación Gustavo A. Madero México, 07738, D.F.

Centro de Investigación en Computación "Sala de Usos Múltiples"  
Av. Juan de Dios Bátiz s/n, Esq. Miguel Othón de Mendizábal  
U. P. "Adolfo López Mateos", Col. Nva. Industrial Vallejo  
México, D.F., C.P. 07738

#### INFORMES:

<http://magno-congreso.cic.ipn.mx>, [magno@cic.ipn.mx](mailto:magno@cic.ipn.mx), [relpub@cic.ipn.mx](mailto:relpub@cic.ipn.mx)  
Tel. 5729 - 6000 Exts. 56608, 56609, 56610

ENTRADA LIBRE

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP

