Artículo **Revista de Aplicaciones de la Ingenieria**
Septiembre 2017 Vol.4 No.12 44-53

Flujo y numéros de Nusselt en cavidades con multi-obstrucciones

LIZARDI, Arturo†*, LÓPEZ, Raymundo, TERRES, Hilario y VACA,Mabel

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

Recibido Julio 8, 2017; Aceptado Septiembre 16, 2017

Resumen

Se presenta el análisis numérico del flujo en convección natural generado en el interior de una cavidad rectangular cerrada llena de agua, con obstrucciones en su interior. La cavidad, con relación geométrica alto/ancho = 1/2, se compone de paredes verticales isotérmicas y horizontales adiabáticas. La pared vertical izquierda se encuentra a una temperatura alta y la pared opuesta a una temperatura baja; y se manejan tres casos: cavidad sin obstrucciones en el interior y con tres obstrucciones, rectangulares y semicirculares, en la parte inferior del sistema. Se modelan y resuelven numéricamente las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía para flujo permanente, bidimensional, junto con las condiciones de frontera apropiadas, empleando el método numérico del elemento finito, a través del software COMSOL MULTIPHYSICS. Al comparar los resultados de los sistemas con obstrucciones rectangulares y semicirculares contra el que no tiene obstrucciones, se encontró que: a) el valor máximo positivo de la componente de velocidad vertical se redujo: 18.41 y 9.72%, respectivamente; b) el valor máximo positivo de la componente de velocidad horizontal disminuyó: 12.84 y 5.83%, respectivamente; y c) el número del Nusselt promedio se redujo: 5.70 y 2.65%, respectivamente.

Cavidad, convección natural, obstrucciones

Abstract

The numerical analysis of the flow in natural convection, generated in the interior of a closed rectangular cavity, full of water, with blockages in its interior, is presented. The cavity, with height/wide = 1/2 geometric ratio, is composed of isothermal vertical walls and adiabatic horizontal ones. The left vertical wall is at a high temperature and the opposite wall, at a low temperature; three cases were studied: cavity without internal obstructions, with three rectangular obstructions, and with three semi-circular obstructions, in the bottom of the system. The equations of conservation of mass, momentum and energy for two-dimensional permanent flow are modeled and numerically solved, considering the appropriate boundary conditions. The finite element numerical method, through the COMSOL MULTIPHYSICS software was used. Comparing the outcomes for systems with rectangular and semi-circular obstructions to the one which it has no obstructions, it was found that: to) the maximum positive value of the vertical velocity component was reduced: 18.41 and 9.72%, respectively; (b) the maximum positive value of the horizontal velocity component decreased: 12.84 and 5.83%, respectively; and (c) the average Nusselt number was reduced: 5.70 and 2.65%, respectively.

Cavity, natural convection, obstructions

Citación: LIZARDI, Arturo, LÓPEZ, Raymundo, TERRES, Hilario y VACA, Mabel. Flujo y numéros de Nusselt en cavidades con multi-obstrucciones.Revista de Aplicaciones de la Ingenieria. 2017, 4-12: 44-53.

*Correspondencia al Autor: (Correo Electrónico: arlr@correo.azc.uam.mx)
† Investigador contribuyendo como primer autor.

© ECORFAN-Bolivia

Nomenclatura

C	Calor específico (J/kg C)
E	Anchura de la cavidad (m)
g	Aceleración gravitatoria (m/s^2)
H	Altura de la cavidad (m)
k	Conductividad térmica (W/m C)
$Nu_{(Y)}$	Nusselt local
Nu	Nusselt promedio
P	Presión (Pa)
Pr	Número de Prandlt
Ra	Número de Rayleigh
T	Temperatura (C)
Tc	Temperatura de pared caliente (C)
Tf	Temperatura de pared fría (C)
T_o	Temperatura de referencia del fluido (C)
$\vec{V}$	Vector velocidad (m/s)
u	Velocidad horizontal (m/s)
v	Velocidad vertical (m/s)
x	Coordenada en eje horizontal (m)
X	Coordenada horizontal adimensional
y	Coordenada en eje vertical (m)
Y	Coordenada vertical adimensional
β	Coeficiente expansión volumétrico (1/K)
θ	Temperatura adimensional
ρ	Densidad (kg/m^3)
ρ_o	Densidad a temperatura de referencia (kg/m^3)
μ	Viscosidad dinámica (kg/m s)
ν	Viscosidad cinemática (m^2/s)

Introducción

El movimiento de un fluido en general es promovido por fuerzas que se dividen en fuerzas de superficie y/o fuerzas de cuerpo. Como ejemplo de flujos que resultan de las fuerzas que actúan sobre la superficie de un volumen de control, están los flujos a través de tubos, flujos del tipo capa límite, etc. La característica más relevante de este flujo es el hecho de que el campo de fuerzas que genera el flujo es independiente del flujo mismo.

Las expresiones para describir el campo de fuerzas que actúan en la frontera del flujo, están desacopladas de las ecuaciones del flujo de fluido. Matemáticamente el campo de fuerzas puede obtenerse sin resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, lo cual se presenta por un sistema desacoplado, facilitando simplificaciones importantes de aplicación práctica.

Entre los flujos motivados por fuerzas de cuerpo, se tienen los fluidos que caen y el vaciado de depósitos, donde la fuerza de cuerpo es proporcionada por la gravedad. En convección natural, la fuerza generadora del flujo es proporcionada por una fuerza de cuerpo debida a una diferencia de densidad dentro del fluido, causada por un gradiente de temperatura o por un gradiente de concentración dentro del sistema.

El flujo promovido por convección natural es consecuencia de un proceso físico o químico que ocurre en el fluido, tal como, la transferencia convectiva de calor o masa. Se deduce que la definición de estos problemas de flujo de fluidos ha de comprenderse junto con el estudio de otros procesos de transferencia.

La fuerza que causa el flujo se encuentra acoplada entre el flujo y otros procesos de transporte. Este acoplamiento entre los procesos de transporte hace que el estudio de este tipo de flujo sea altamente complicado [1].

El propósito de este trabajo es analizar el campo de flujo, por convección natural, que se genera en una cavidad rectangular, llena de agua, sin protuberancias en su interior y con tres protuberancias semicirculares y rectangulares, ubicadas simétricamente en la parte inferior del sistema.

ISSN-2410-3454
ECORFAN® Todos los derechos reservados

Para hallar la solución, se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa, momentum y energía, para flujo permanente, bidimensional, junto con las condiciones de frontera, usando un algoritmo con base en el método numérico de elementos finitos, a través del software COMSOL MULTIPHYSICS, método que ha demostrado ser efectivo y rápido en problemas de transferencia de calor por convección libre.

El tema ha sido abordado al paso del tiempo por varios investigadores, cada uno con algunas variantes en cuanto a la geometría de la cavidad, rango del número de Rayleigh o el método de solución empleado. Algunos trabajos referentes a este tópico, desde el punto de vista numérico son: Kaviany [2], analizó numéricamente los campos de temperatura y líneas de corriente en una cavidad cuadrada, llena de aire, con una protuberancia semicircular localizada simétricamente en el fondo.

Las paredes verticales se consideraron a temperatura constante, con el lado izquierdo a mayor temperatura que el derecho. Las superficies superior e inferior se trataron como adiabáticas. Se muestran resultados del número de Nusselt y de los valores máximos de la función corriente para un rango del número de Rayleigh de $10^1 < Ra < 10^4$ y para radios de la protuberancia de 0, 0.2 y 0.4.

Deng [3], analizó numéricamente la convección natural laminar en una cavidad cuadrada bidimensional, llena de aire, de longitud H, con dos y tres pares de fuentes de calor en las paredes laterales verticales. El análisis se centra en los efectos del tamaño y la disposición de las fuentes y sumideros sobre las características de flujo y la transferencia de calor.

Los resultados se presentan a través de los campos de las líneas de corriente, líneas isotérmicas y números de Nusselt promedio. Se encontró que la transferencia de calor total está estrechamente relacionada con el número de remolinos en el recinto. Cuando las fuentes y sumideros fueron dimensionados en segmentos más pequeños y/o dispuestos en un modo escalonado, el número de remolinos en el recinto aumentó y por lo tanto la transferencia de calor se incrementó. Wang y Pepper [4], analizaron la convección natural laminar en canales verticales con obstrucciones semicirculares y rectangulares en el interior.

Utilizaron un algoritmo de elementos finitos que emplea la norma L2, basado en un estimador de error a-posteriori. Los términos de advección se trataron con el método explícito de Adams Bashforth, mientras que los términos de difusión se hicieron avanzar por un esquema de Euler implícito. Los resultados muestran los campos de temperatura y líneas de corriente para diferentes parámetros (número de Rayleigh, relación geométrica y ubicación de las obstrucciones) para canales lisos y obstruidos. Liu, *et al.* [5], estudiaron experimental y numéricamente el flujo en convección natural en una cavidad rectangular, llena de agua, con aletas en las paredes laterales.

Se colocaron dos aletas horizontales de diferentes longitudes a diferentes alturas a lo largo de cada una de las paredes laterales de la cavidad. En la etapa de estado permanente se observaron oscilaciones regulares por encima de la aleta inferior. La oscilación en el flujo térmico horizontal por encima de la aleta inferior genera una mezcla fuerte en la capa límite térmica entre las dos aletas. Como consecuencia, la transferencia de calor a través de la capa límite térmica es mayor. La simulación numérica correspondiente logró una buena concordancia con el experimento.

ISSN-2410-3454
ECORFAN® Todos los derechos reservados

Además, se reveló numéricamente que el flujo convectivo a través de la cavidad se mejora significativamente debido a la presencia de las aletas. La transferencia de calor se mejora hasta en un 17.1% sobre el rango de número de Rayleigh investigado. Malekshah y Salari [6], analizaron experimental y numéricamente la convección natural tridimensional en un prisma rectangular lleno de dos fluidos inmiscibles, agua y aire, a diferentes relaciones de altura.

En una de las paredes laterales se coloca un calentador de flujo constante y en otras paredes se coloca material aislante. Las paredes superior e inferior se fijan a una temperatura fría constante.

Las mediciones se realizan para diferentes relaciones de altura líquida AR=0.5, 0.625, 0.75 y 0.875 y números de Rayleigh de Ra=$1.4x10^8$, $2.79x10^8$, $6.98x10^8$ y $8.37x10^8$. Se presentan las mediciones y los resultados numéricos de las distribuciones de temperatura entre las paredes verticales y horizontales para diferentes relaciones de altura de interfaz de fluido y números de Rayleigh, presentándose concordancia.

Modelo a analizar

El sistema físico consiste en una cavidad rectangular de altura H=8 cm y anchura E=16 cm. La pared vertical izquierda se encuentra a una temperatura alta, Tc, y la derecha a una temperatura baja, Tf. Las paredes superior e inferior se consideran adiabáticas.

En el estudio se manejan tres casos: cavidad sin obstrucciones en su interior y con tres obstrucciones rectangulares (0.75 cm de alto por 1.25 cm de ancho) y semicirculares (0.625 cm de radio), repartidas simétricamente en el fondo, Fig. 1.

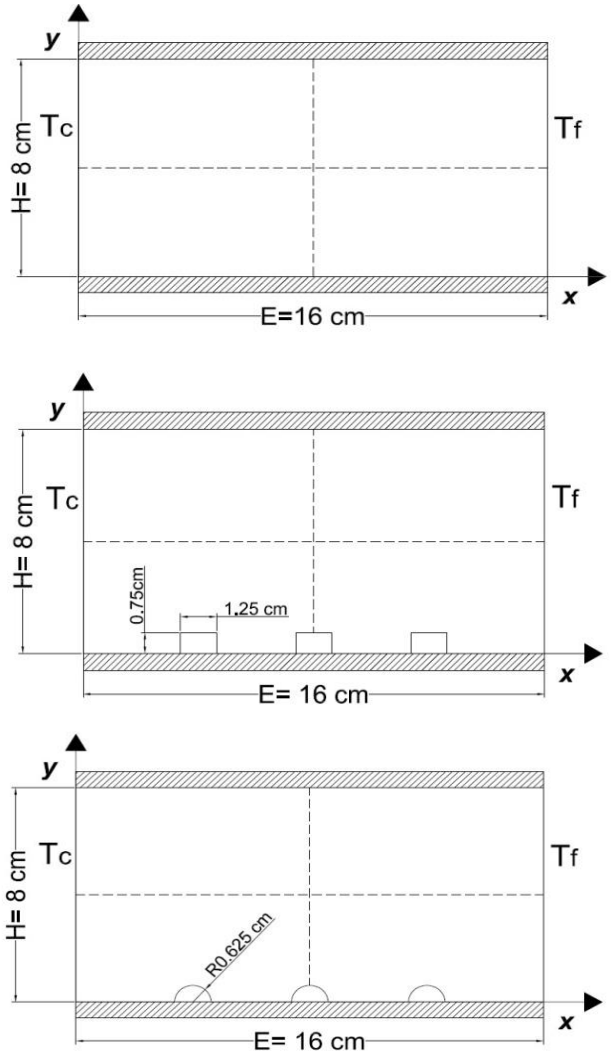

Figura 1 Representación del problema y ejes de referencia para el análisis (líneas discontinuas)
Fuente: Elaboración propia

La cavidad se encuentra llena de un fluido newtoniano, incompresible y de propiedades físicas constantes, excepto la densidad en el término de flotación (aproximación de Boussinesq). En estas condiciones la densidad se considera como una función lineal de la temperatura, esto es, Incropera y DeWitt [7].

$$\rho = \rho_o \left[1 - \beta \left(T - T_o\right)\right] \quad (1)$$

ISSN-2410-3454
ECORFAN® Todos los derechos reservados

Donde β es el coeficiente de expansión volumétrico y ρ_o es la densidad a la temperatura de referencia T_o.

Formulación matemática

En los problemas de transferencia de calor por convección libre la energía térmica es transportada tanto por conducción de calor como por el movimiento del fluido. El planteamiento matemático está definido por las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía.

En el estudio se emplea la aproximación de Boussinesq que considera que las propiedades físicas del fluido son independientes de la temperatura. La densidad del fluido, ρ, se toma como constante, excepto en el término de fuerza de flotación. En este último término la densidad se considera como una función lineal de la temperatura. Bajo las condiciones anteriormente mencionadas, las ecuaciones de movimiento para flujo laminar convectivo, considerando capa límite son, Bejan [8]

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \tag{2}$$

$$\rho_o\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \tag{3}$$

$$\rho_o\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\rho_o\, g\,\beta\,(T-T_o)+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \tag{4}$$

$$\rho_o\, C\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}\right)=k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \tag{6}$$

Las condiciones de frontera para los sistemas, Fig. 1, se muestran en la siguiente tabla.

x=0	u=v=0	T=Tc	(6)
x=E	u=v=0	T=Tf	(7)
y=0	u=v=0	$\partial T/\partial y=0$	(8)
y=H	u=v=0	$\partial T/\partial y=0$	(9)

Tabla 1 Condiciones de frontera
Fuente: Elaboración propia

Solución numérica

Para resolver las ecuaciones que rigen en el interior del sistema (2), (3), (4) y (5), junto con las condiciones de frontera (6), se empleó el método numérico del elemento finito, a través del software COMSOL MULTIPHYSICS. Para ello se utilizó la siguiente metodología [9]:

Se selecciona en el software el tipo de análisis, en este caso modelo en 2D.

Se dibuja la geometría a analizar y se generan los elementos en el sistema. En este caso la cavidad se dimensionó con un alto de H=8 cm y de ancho E=16 cm. En el sistema sin obstrucciones se generaron 2756 elementos; en las protuberancias rectangulares, de base 1.25 cm y altura 0.75 cm, se generaron 4659 elementos; en la protuberancia semicircular, de radio 0.625 cm, se generaron 3609 elementos. Con el número de nodos y elementos propuestos se satisfacen los criterios de estabilidad y de orden de precisión para el alcance del trabajo.

Se introduce el valor de las propiedades del fluido, en este caso agua, que permanecen constantes: calor específico (C), viscosidad dinámica (μ), viscosidad cinemática (ν), coeficiente de expansión volumétrico (β) y conductividad térmica (k). La densidad se maneja como variable y la presión se modela con el algoritmo de relajación (TDMA).

ECORFAN® Todos los derechos reservados

Se introduce el valor y la dirección de la aceleración gravitatoria.

Se introducen las condiciones de frontera y se dan los valores de las temperaturas de las paredes verticales, en este caso Tc=50°C y Tf=20°C. La interface resuelta por el programa fue de transferencia de calor en fluidos en flujo laminar.

Se exportan los valores de los campos de velocidad ($\vec{V}$) y de las componentes de velocidad vertical (v) y horizontal (u); para realizar las gráficas.

Cabe mencionar que al introducir los valores de las propiedades termofísicas del agua y las condiciones de las cavidades, se obtuvieron un número de Prandt de 4.83 y Rayleigh de $3.74x10^9$.

Resultados y discusión

En las Figs. 2, 3 y 4 se muestran los resultados de los campos de velocidad ($\vec{V}$), en m/s, para las cavidades: sin obstrucción y con obstrucción rectangular y semicircular, respectivamente. En ellas se aprecia que en la inmediación de las paredes con alta y baja temperatura el fluido se mueve verticalmente hacia la frontera superior e inferior, respectivamente.

En las paredes adiabáticas superior e inferior el movimiento del fluido es hacia la derecha y hacia la izquierda, respectivamente. La combinación de estos flujos genera un movimiento en sentido horario. En la cavidad con obstrucciones rectangulares, Fig. 3, se observa que el fluido va bordeando a las mismas de derecha a izquierda, esto en concordancia con el gradiente de temperatura.

El fluido se mueve lentamente en la zona derecha de las obstrucciones, llega a la parte superior de las mismas, y de allí se presenta un incremento en su velocidad, que es en parte generado por el efecto gravitatorio. En la obstrucción rectangular de lado izquierdo se presentan los valores más altos de la velocidad del flujo, debido a la cercanía con la pared con alta temperatura.

En la Fig. 4 se aprecia el sistema con obstrucciones semicirculares. Al igual que en el caso anterior, el fluido se mueve de derecha a izquierda, bordeando los contornos de las semicircunferencias. A comparación de las obstrucciones rectangulares, en este caso se presentan velocidades más altas del flujo debido a la poca resistencia que presenta la curvatura de las semicircunferencias a su paso.

También en este caso se observa que el fluido cercano a la obstrucción de lado izquierdo adquiere valores mayores de velocidad, esto es a causa del flujo convectivo que genera la pared caliente.

Finalmente, en la Fig. 5, se muestra en detalle la distribución de velocidades en las cercanías de las obstrucciones que están a un lado de la pared caliente. En la obstrucción rectangular se aprecian dos vórtices secundarios que giran en sentido anti horario y que se ubican en las esquinas inferiores.

En estas esquinas se estanca el fluido y se generan bajas velocidades debido a que el flujo que pasa por allí emplea parte de su cantidad de movimiento para hacerlo girar. En la obstrucción semicircular se carece de estos vórtices secundarios, lo cual favorece al paso del flujo y por consiguiente a la magnitud de la velocidad.

ISSN-2410-3454
ECORFAN® Todos los derechos reservados

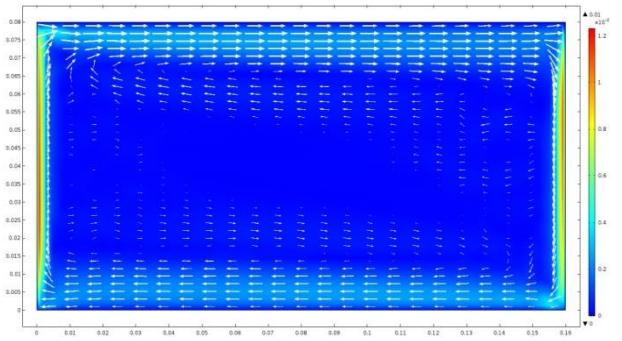

Figura 2 Campo de velocidades, $\vec{\nabla}$, para cavidad sin obstrucciones
Fuente: Elaboración propia

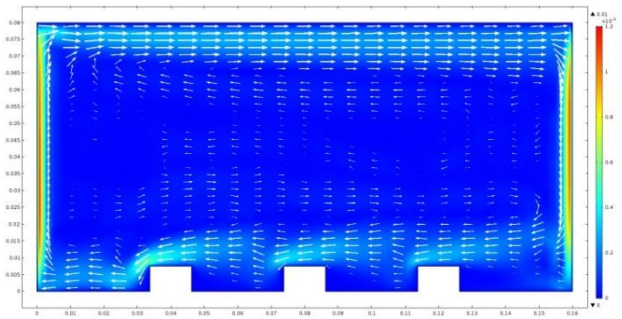

Figura 3 Campo de velocidades, $\vec{\nabla}$, para cavidad con obstrucción rectangular
Fuente: Elaboración propia

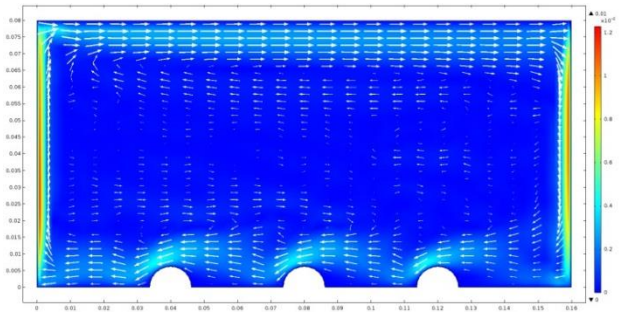

Figura 4 Campo de velocidades, $\vec{\nabla}$, para cavidad con obstrucción semicircular
Fuente: Elaboración propia

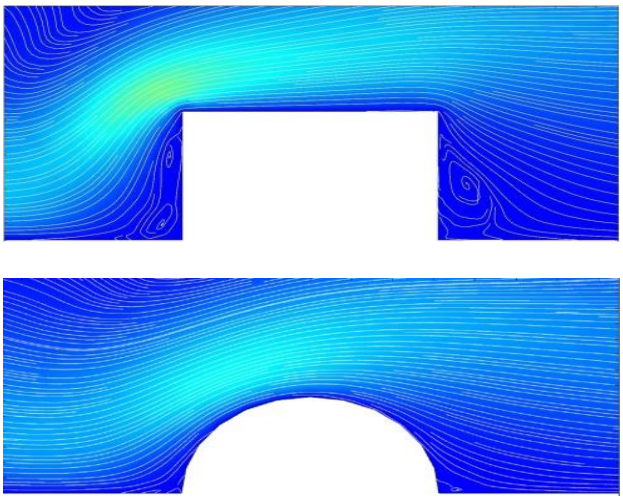

Figura 5 Campo de velocidades, $\vec{\nabla}$, en las obstrucciones cercanas a la pared caliente
Fuente: Elaboración propia

Para hacer una comparación del desempeño del flujo en las cavidades estudiadas, se analizaron las componentes de velocidad horizontal (u) y vertical (v) en la posición E/2 y H/2, respectivamente (ver Fig. 1).

En la Fig. 6, se muestran los resultados de la componente de velocidad vertical (v), en m/s, para distintas posiciones en el eje "x" y para los tres casos. Para la cavidad sin obstrucciones se aprecia que la velocidad vertical comienza en cero, debido a la condición de frontera de no deslizamiento sobre la pared del depósito. Posteriormente se observa una zona donde el flujo se dirige verticalmente hacia la frontera superior, esto se indica por el signo positivo de la velocidad.

Se aprecia que la magnitud de la velocidad vertical va aumentando hasta un máximo positivo de $+6.79 \times 10^{-4}$ m/s y de allí comienza a disminuir hasta un valor cercano a cero. A partir de ese punto se presentan pequeñas variaciones de la componente de velocidad a lo largo de la parte central de la cavidad.

ISSN-2410-3454
ECORFAN® Todos los derechos reservados

Finalmente se observa la zona donde el flujo se dirige hacia la frontera inferior, esto se indica por el signo negativo de la velocidad. En esta región se aprecia que la velocidad vertical va aumentando hasta un máximo negativo de -11.81x10^{-4} m/s, y de allí nuevamente disminuye su magnitud hasta llegar a cero sobre la pared del depósito.

Para las cavidades con obstrucciones rectangulares y semicirculares se observa el mismo comportamiento pero con valores distintos, en estos casos las magnitudes máximas positivas y negativas son de +5.54x10^{-4} y +6.13x10^{-4}, -10.40x10^{-4} y -10.16x10^{-4} m/s, respectivamente. Comparando los resultados de las cavidades con obstrucciones rectangulares y semicirculares con la que no tiene obstrucciones, se encontró que el valor máximo positivo de la velocidad vertical se redujo: 18.41 y 9.72%, respectivamente.

Esto muestra que la velocidad vertical se ve disminuida al colocar las obstrucciones, encontrándose el valor más alto en la cavidad sin obstrucciones y el más bajo en la rectangular. Al no haber obstrucciones, el flujo se mueve libremente por el efecto convectivo que generan las paredes isotérmicas.

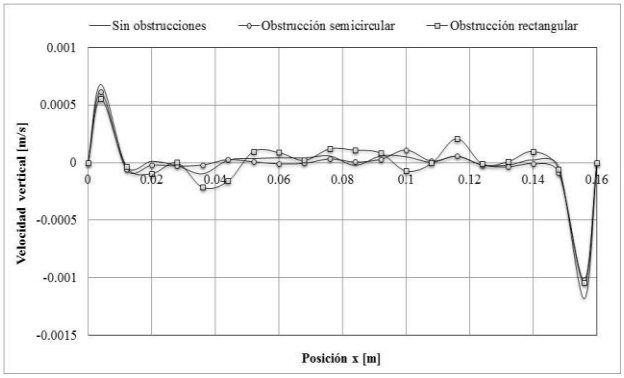

Figura 6 Distribución de velocidad vertical (m/s) parala posición y=0.04 m y para los tres casos
Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 7 se muestran los resultados de la componente de velocidad horizontal (u), en m/s, para distintas posiciones en el eje "y" y para los tres casos. Para el sistema sin obstrucciones se aprecia que la componente de velocidad comienza en cero, debido a la condición de frontera de no deslizamiento sobre el fondo rígido. Posteriormente se observa la zona donde el flujo se dirige horizontalmente hacia la pared caliente, esto se indica por el signo negativo de la velocidad.

Se aprecia que la magnitud de la velocidad horizontal va aumentando hasta un máximo negativo de -3.93x10^{-3} m/s, y de allí comienza a disminuir hasta un valor cercano a cero. A partir de ese punto se presentan pequeñas fluctuaciones de la componente de velocidad a lo largo de la parte central de la cavidad. Finalmente se observa la zona donde el flujo se dirige hacia la pared fría, esto se indica por el signo positivo de la velocidad.

En esta parte se aprecia que la velocidad horizontal va aumentando hasta un máximo positivo de +2.57x10^{-3} m/s, y de allí nuevamente disminuye su magnitud hasta llegar a cero sobre la tapa rígida. Para los sistemas con obstrucciones rectangulares y semicirculares se observa el mismo comportamiento pero con valores distintos, en estos casos las magnitudes máximas negativas y positivas son de -3.13x10^{-3} y -3.48x10^{-3} m/s, +2.24x10^{-3} y +2.42x10^{-3} m/s, respectivamente.

Comparando los resultados de las cavidades con obstrucciones rectangulares y semicirculares con la que no tiene obstrucciones, se encontró que los valores máximos positivos de la velocidad horizontal disminuyeron: 12.84 y 5.83%, respectivamente.

ISSN-2410-3454
ECORFAN® Todos los derechos reservados

Al igual que en el caso de la velocidad vertical, los resultados muestran que la velocidad horizontal disminuye al colocar las protuberancias en la cavidad, presentándose el valor más alto de esta componente en la cavidad sin protuberancia y el más bajo en la cavidad rectangular.

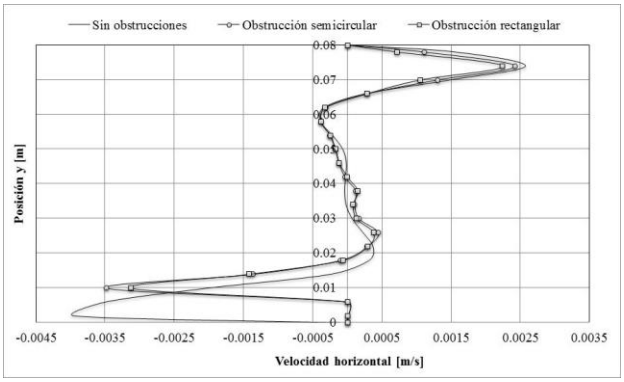

Figura 7 Distribución de velocidad horizontal (m/s) para la posición x=0.08 m y para los tres casos
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, para el cálculo del número de Rayleigh y número de Nusselt promedio se emplearon las siguientes ecuaciones [10]:

$$\mathrm{Ra} = \frac{g\,\beta\,(\mathrm{Tc}-\mathrm{Tf})\,\mathrm{E}^3\,\mathrm{Pr}}{\nu^2} \tag{7}$$

$$\mathrm{Nu}_{(\mathrm{Y})} = -\left.\frac{\partial\theta}{\partial \mathrm{X}}\right|_{\mathrm{X}=0} \tag{8}$$

$$\mathrm{Nu} = \int_0^1 -\left(\frac{\partial\theta}{\partial \mathrm{X}}\right)_{\mathrm{X}=0} \mathrm{dY} \tag{9}$$

Los parámetros utilizados en estas expresiones son:

$$\mathrm{X} = \frac{\mathrm{x}}{\mathrm{E}};\ \mathrm{Y} = \frac{\mathrm{y}}{\mathrm{H}};\ \theta = \frac{(\mathrm{T}-\mathrm{Tf})}{(\mathrm{Tc}-\mathrm{Tf})} \tag{10}$$

Con las ecuaciones anteriores se obtiene un número de Rayleigh de $3.74\text{x}10^9$ y Prandtl de 4.83. Los números de Nusselt promedio para los tres casos se muestran en la tabla siguiente.

	Sinobstrucc.	Obstrucc.semicircular	Obstrucc.rectangular
Nu	**32.46**	**31.64**	**30.61**

Tabla 2 Números de Nusselt promedio
Fuente: Elaboración propia

La presencia de las obstrucciones genera que en la convección térmica se presente una disminución del número de Nusselt promedio. Lo anterior muestra que hay una correspondencia entre el flujo convectivo y éste parámetro adimensional. Comparando los resultados de las cavidades con obstrucciones rectangulares y semicirculares con la que no tiene obstrucciones, se encontró que los valores del número del Nusselt promedio disminuyeron: 5.70 y 2.62%, respectivamente. Estos resultados son acordes con los reportados por Kaviany [2] y Lizardi, *et al.* [11], donde se muestra que el número de Nusselt promedio disminuye al colocar protuberancias en el interior de las cavidades. La importancia de este trabajo se centra en el análisis del flujo, en el interior de la cavidad, al contemplar tres casos (cavidad rectangular sin obstrucciones y con 3 obstrucciones rectangulares y semicirculares). Todo ello para entender en detalle el desarrollo del campo de velocidades ($\vec{\mathrm{V}}$), de las componentes de velocidad vertical (v) y horizontal (u), y del número de Nusselt.

Conclusiones

En este trabajo se han presentado los resultados numéricos del flujo en convección natural generado en el interior de una cavidad rectangular, llena de agua, sin obstrucciones en su interior y con obstrucciones rectangulares y semicirculares ubicadas simétricamente en el fondo.

ISSN-2410-3454
ECORFAN® Todos los derechos reservados

La solución numérica se hizo con el método del elemento finito, a través del software COMSOL MULTIPHYSICS. Se encontró que en la cavidad sin obstrucciones el flujo se mueve libremente por el efecto convectivo que generan las paredes isotérmicas; pero al colocar las obstrucciones, el flujo disminuye por las protuberancias impuestas, presentándose mayor resistencia en las obstrucciones rectangulares y después en las semicirculares.

Los valores tanto de la componente de velocidad vertical como de la horizontal se ven disminuidos al colocar las obstrucciones, encontrándose el valor más alto en la cavidad sin obstrucciones y el más bajo en las obstrucciones rectangulares. Al analizar el número de Nusselt promedio se encontró una correspondencia con el flujo dentro de la cavidad, es decir, se encontró el valor más alto en la cavidad sin obstrucciones y el valor más bajo en la cavidad con obstrucciones rectangulares.

Referencias

[1] Ozisik, M. N, (1979), Transferencia de calor, Bogotá, Colombia, McGraw-Hill.

[1] [2] Kaviany, M., (1984), Effect of a Protuberance on Thermal Convection in a Square Cavity, Journal of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 830-834.

[3] Deng, Q.-H., (2008), Fluid flow and heat transfer characteristics of natural convection in square cavities due to discrete source–sink pairs, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, pp. 5949–5957.

[2] [4] Wang, X., Pepper, D. W., (2009), Numerical simulation for natural convection in vertical channels, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 4095–4102.

[5] Liu, Y., Lei, C., and Patterson, J. C., (2014), Natural convection in a differentially heated cavity with two horizontal adiabatic fins on the sidewalls, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 72, pp. 23–36.

[6] Malekshah, E. H., Salari, M., (2017), Experimental and numerical investigation of natural convection in a rectangular cuboid filled by two immiscible fluids, Journal of Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 85, pp. 388–398.

[7] Incropera, F. P., DeWitt, D. P, (1999), Fundamentos de Transferencia de Calor, México, Prentice Hall.

[3] [8] Bejan, A., (1995), Convection Heat Transfer, New York, Wiley, Chap. 4.

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

[4] [10] Shiralkar, G. S., Tien, C. L., (1981), A Numerical Study of Laminar Natural Convection in Shallow Cavities, Journal of Heat Transfer, Vol. 103, pp. 226-231.

[5] [11] Lizardi, A., Terres, H., López, R., Vaca, M., Chávez, S., Lara, A., y Morales, J. R., (2017), Experimental and numerical analysis of convective flow in a square cavity with internal protuberances, Journal of Physics: Conference Series (Vol. 792, No. 1, p. 012022), IOP publishing.

ISSN-2410-3454
ECORFAN® Todos los derechos reservados