

Análisis del flujo transitorio en convección natural sobre una placa vertical empleando PIV y un método numérico

A. Lizardi R.*
R. de J. Portillo V.
R. López C.**
J. R. Morales G.
H. Terrés P.
A. Lara V.
H. F. Baez L.

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco
Departamento de Energía, Área de Termofluidos
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 19 de marzo de 2008; aceptado el 25 de septiembre de 2008.

1. Resumen

Se presenta la comparación entre los resultados experimentales y numéricos del flujo transitorio en convección natural generado por una placa vertical caliente. El prototipo construido consta de un depósito rectangular de lámina de cobre que se encuentra aislado térmicamente por todos sus lados, excepto en una cara vertical y en la oquedad superior. El interior del depósito de cobre se encuentra lleno de aceite térmico y éste se agita por medio de un impulsor que se mueve a través de un motor eléctrico. El desarrollo experimental del flujo se realiza con un equipo de velocimetría por imágenes de partículas (PIV), con el cual se determinaron, de forma adimensional, los campos de las componentes de velocidad vertical U , horizontal V , y del vector velocidad \mathbf{V} . Se resolvieron numéricamente las ecuaciones de continuidad, momentum y energía para flujo transitorio con las condiciones iniciales y de frontera apropiadas, aplicando el método numérico de diferencias finitas. El análisis de los

resultados obtenidos refleja que el equipo experimental diseñado y la metodología propuesta es adecuada ya que al comparar los resultados experimentales con los numéricos para un tiempo adimensional de $\tau = 13$ y $\tau = 130$ se encontró que para la componente de velocidad vertical U , hay una diferencia de 7.1% y 4.5%, y para la componente de velocidad horizontal V , hay una diferencia de 1.7% y 1.8%.

Palabras clave: convección natural, placa vertical caliente, PIV.

2. Abstract (Analysis of a Natural Convection Transient Flow over a Heated Vertical Plate Using PIV and a Numerical Method)

Experimental results of the transient natural convection flow produced by a heated vertical plate are compared against numerical results. The prototype of the heated plate is taken as the non insulated face of a copper container with an open top. The container is filled with thermal oil which is kept at a uniform temperature by an electric agitator. The experimental results are obtained by the PIV technique that gives the dimensionless horizontal and the vertical components of the velocity field. The numerical results are obtained by solving the equations for momentum, energy and continuity under boundary and initial conditions for transient flow by a finite differences scheme. The comparison of the obtained results shows that the experimental equipment and the proposed methodology are adequate since the differences between the experimental and the numerical results are: for a dimensionless time $\tau = 13$; the difference for the dimensionless vertical component is 7.1 % whereas for the dimensionless horizontal component the difference is 1.7%. For a dimensionless time $\tau = 130$ the vertical dimensionless component shows a difference of 4.5%, whereas for the horizontal dimensionless component the difference is 1.8%.

Key words: natural convection, vertical heated plate, PIV.

3. Introducción

El problema de transmisión de calor se presenta, casi sin excepción, en todas las industrias, existiendo incontables diferencias de detalle a causa de la gran diversidad de sus

campos de aplicación. Equipos tales como hornos, colectores solares, intercambiadores de calor, etc., pueden ser analizados tanto de manera experimental como analítica. El procedimiento experimental tiene la ventaja de trabajar con el sistema físico real y la cantidad deseada se determina por medición directa, dentro de los límites del error experimental. Sin embargo, este procedimiento es caro y lleva tiempo. Por otro lado, el procedimiento analítico (incluyendo el numérico) tiene la ventaja de que es relativamente rápido y barato, pero los resultados obtenidos están sujetos a la exactitud de las hipótesis e idealizaciones establecidas en el análisis. El estudio del efecto transitorio en convección natural debido a una placa vertical caliente 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 rectoras. Entre las aplicaciones prácticas se puede mencionar el calentamiento de aire en edificios habitacionales, en circuitos electrónicos, en recuperadores de calor, etcétera.

Desde el punto de vista experimental este fenómeno se ha estudiado con diferentes métodos. Linthorst *et al.* [1] estudiaron la convección natural en recintos cerrados inclinados por medio de visualización de flujo y anemometría láser doopler para un rango de números de Rayleigh de 10^4 a 2.5×10^5 . Ángulo de inclinación ϕ de $0^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ y relación geométrica $Ax=H/D$ de $0.25 \leq Ax \leq 7$. López *et al.* [2] presentan un equipo experimental para visualizar el flujo que provoca el fenómeno de la estratificación térmica en una cavidad cerrada. El equipo empleado consiste de un recinto cerrado hecho de cristal, con las paredes inferior y superior de aluminio, y lleno con un fluido incompresible al cual se le agrega polvo de aluminio. El gradiente de temperatura que genera dicho fenómeno se obtiene al proporcionar a la cavidad una transferencia de energía en dirección vertical descendente. Se utiliza una cámara fotográfica digital marca *Epson*, modelo Photo PC500 con una resolución de 640×480 para obtener la visualización impresa del fenómeno. Kitagawa *et al.* [3] estudiaron los efectos de la inyección de burbujas milimétricas en la convección natural en agua sobre una placa vertical caliente. Se utilizaron termocoples y partículas trazadoras para medir la temperatura y la velocidad, respectivamente. Las mediciones de temperatura mostraron que la relación entre el coeficiente de transferencia de calor inyectando burbujas milimétricas y sin inyectarlas se incrementó de 1.35 a 1.85.

Por otro lado, las expresiones matemáticas que describen el comportamiento del flujo transitorio en convección natural parten de las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía en coordenadas rectangulares. La no linealidad y el acoplamiento de sus términos hacen que su solución sea compleja, por ello la simulación numérica ha sido una buena alternativa al paso del tiempo. J. D. Hellums y S. W. Churchill

[4] resolvieron las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía, en estado transitorio, utilizando el método numérico de diferencias finitas y una computadora. En el trabajo se presentan los campos de velocidad, de temperatura y el coeficiente de transferencia de calor local. Y. Jaluria y B. Gebhart [5] estudiaron el flujo en convección natural laminar proveniente de una fuente térmica colocada en el borde principal de una superficie vertical adiabática. En el trabajo se analizaron los resultados del flujo bidimensional en la capa límite y se resolvieron numéricamente las ecuaciones gobernantes para un rango del número de Prandtl de 0.001 a 100. Se determinó la dependencia del número de Prandtl sobre la temperatura de la superficie, el rango de velocidad y el espesor de la capa límite. D. B. Ingham [6] resolvió las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía, con las condiciones de inicial y de frontera correspondientes, para una placa vertical isotérmica en convección natural y en régimen transitorio. En el trabajo se discute el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor por convección para distintos valores de la variable de similitud ($\tau = t/\lambda^{1/2}$) y para diferente número de nodos de la malla a lo largo de la placa. Finalmente se hace un análisis de estabilidad.

En este trabajo se analizan experimental y numéricamente los campos de las componentes adimensionales de la velocidad horizontal V , velocidad vertical U , y del vector velocidad \mathbf{V} , para el flujo transitorio en convección natural en una placa vertical caliente. Lo anterior para un número de Prandtl de 6.14. El análisis experimental se hace sobre la cara vertical de un depósito rectangular de cobre que contiene en su interior aceite térmico, una resistencia eléctrica y un impulsor que se hace rotar por medio de un motor eléctrico. El depósito de cobre está sumergido en un recipiente con agua y está aislado térmicamente en todas sus caras, excepto la que es objeto de estudio. El flujo se analiza con un sistema de velocimetría por imágenes de partículas (PIV). El análisis numérico resuelve las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía en estado transitorio con las condiciones iniciales y de frontera apropiadas.

4. Equipo experimental

Para determinar las propiedades cinemáticas del flujo transitorio en las cercanías de una placa plana vertical caliente, se diseñó y construyó un banco de pruebas, figura 1, que consta de los siguientes elementos:

- Un depósito rectangular de lámina de cobre calibre 18 de $0.15 \times 0.24 \times 0.035$ m. Todos los lados del recipiente se encuentran aislados con madera de 0.019 m de espesor, excepto una cara vertical de 0.15×0.24 m y la oquedad superior. El depósito se encuentra lleno de aceite térmico.

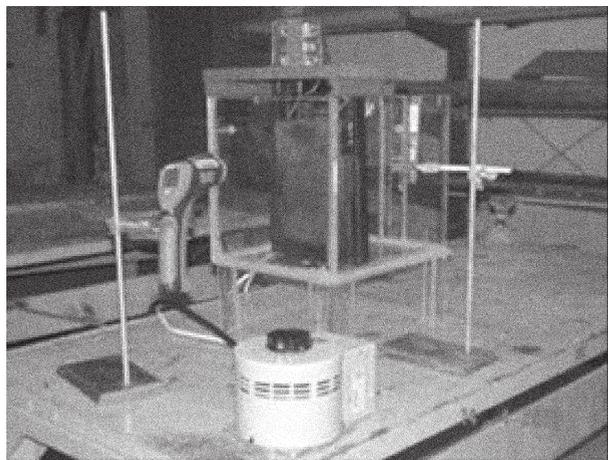


Fig. 1. Banco de pruebas para convección natural.

- Una resistencia eléctrica de espiral con una potencia de 25 W. La resistencia eléctrica dará la energía necesaria al aceite térmico para incrementar su temperatura de manera gradual.
- Un variador de voltaje de 120 V de entrada, 0-140 V de salida y 10 A. El equipo cuenta con una perilla que permite regular el voltaje de 0 a 140 V. La resistencia eléctrica se conecta al variador de voltaje con el fin de regular la potencia de ella y con esto permitir un control más adecuado de la temperatura del aceite.
- Un motor de corriente alterna con una potencia de 93.3 W provisto de un eje de 0.00635 m de diámetro. Al eje del motor se le acopló una flecha del mismo diámetro con una longitud de 0.25 m. A lo largo de la longitud de la flecha se colocaron tres impulsores con tres álabes radiales cada uno. La función de los impulsores es agitar el aceite térmico para que su temperatura permanezca uniforme durante el proceso. Tanto el depósito de cobre como el motor, con sus accesorios, se instalaron sobre una base de madera para manejar el conjunto con mayor facilidad.
- 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 depósito de pruebas en su interior de tal manera que éste quede sumergido en agua.
- Un termómetro láser *Extech Instruments* modelo 42540 con un rango de -50°C a 760°C y una resolución de 0.1°C . Con él se mide la temperatura de la superficie de la placa de cobre.
- Un termómetro de inmersión digital *Extech Instruments* modelo 39240 con un rango de -40°C a 200°C y una resolución de 0.1°C . Con él se mide la temperatura del agua del tanque de acrílico.
- 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 $0.61 \times 0.61 \times 0.61$ m y computadora *workstation*.

5. Procedimiento experimental

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

- Se llenó el interior del recipiente de cobre con aceite térmico, se colocó en su interior la resistencia eléctrica y se introdujo la flecha con los agitadores.
- Se llenó el tanque de acrílico con agua, se vertieron partículas de 20 micras y se colocó el modelo en la parte superior del mismo. Cabe señalar que el nivel de agua debe cubrir el depósito de cobre hasta dejar que sobresalgan dos centímetros de él. Con esto se asegura que el área de estudio quede sumergida.
- Se accionó el equipo de velocimetría y se alineó la luz del láser con el mecanismo posicionador, de tal manera que se asegure que el área de estudio quede iluminada. En este paso se fija la posición del eje x .
- Se alineó la cámara con el mecanismo posicionador, de tal manera que se pudiera observar el borde de la placa de cobre y las partículas de fluido aledañas a ella. En este paso se enfoca la cámara y se fija la posición del eje y .
- Con el programa de cómputo que tiene el PIV se ajustó el número de pulsos del láser, el intervalo de tiempo y el número de imágenes que se deseaban adquirir.
- Se dejó reposar el agua del tanque para asegurar que su velocidad fuera cero y así cumplir las condiciones iniciales y de frontera del método numérico.
- Se accionó simultáneamente la resistencia eléctrica, el motor con los impulsores y el equipo de velocimetría y se almacenó la información en la computadora. Finalmente se graficaron y analizaron los resultados con el programa de cómputo del equipo.

Cabe mencionar que las propiedades termofísicas del agua se tomaron a una temperatura de película de 21°C .

6. Planteamiento y formulación matemática del problema

En la formulación de los problemas de transferencia de calor por convección natural la energía térmica es transportada por el fluido en movimiento, dicho movimiento es originado por las fuerzas másicas que son resultado de la inestabilidad causada por la diferencia de densidades que es consecuencia del gradiente de temperatura.

La figura 2 muestra esquemáticamente el modelo físico y el sistema de coordenadas usado durante el análisis del problema. Una placa finita sometida a un flujo de calor constante y

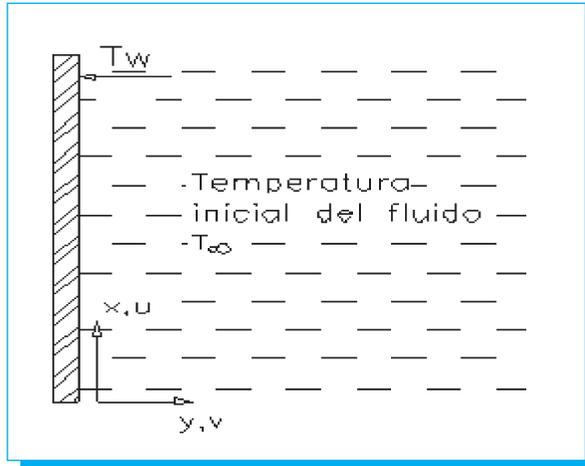


Fig. 2. Placa vertical caliente y sistema de coordenadas.

sumergida inicialmente en un fluido en reposo y a temperatura ambiente.

En la figura 2 se puede apreciar que u y v son las componentes escalares de la velocidad, en m/s, en las direcciones vertical x , y horizontal y , respectivamente. T_w y T_∞ son las temperaturas de la superficie de la placa y del fluido, en °C, las cuales se consideran como constantes. El planteamiento matemático del problema de flujo transitorio promovido por convección natural se define por las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía térmica, así como las condiciones iniciales y de frontera correspondientes.

En el estudio se desprecian los términos de presión y disipación viscosa de la ecuación de energía y se emplea la aproximación de Oberbeck-Boussinesq que considera que las propiedades físicas del fluido, tal como conductividad térmica, κ (W/m°C); viscosidad dinámica, μ (kg/m s); viscosidad cinemática, ν (m²/s) y el calor específico, C_p (J/kg °C), son independientes de la temperatura. La densidad (kg/m³) del fluido se presume constante, excepto en el término de fuerza de empuje. En este último término la densidad se considera como una función lineal de la temperatura.

Bajo las condiciones anteriormente mencionadas, las ecuaciones rectoras, en forma adimensional, para flujo laminar transitorio convectivo, dentro de la capa límite son [6]:

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = \theta + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pr} \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (3)$$

Donde U y V son las componentes escalares adimensionales de la velocidad en la dirección vertical x , y horizontal y , respectivamente. θ y τ son la temperatura y el tiempo adimensionales y el número de Prandtl está definido por $Pr = \nu/\alpha$. Las variables adimensionales usadas para adimensionalizar las ecuaciones son

$$\begin{aligned} X &= x \left(\frac{g\beta\Delta T}{\nu^2} \right)^{1/3} & Y &= y \left(\frac{g\beta\Delta T}{\nu^2} \right)^{1/3} \\ U &= \frac{u}{(g\nu\beta\Delta T)^{1/3}} & V &= \frac{v}{(g\nu\beta\Delta T)^{1/3}} \\ \theta &= \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty} & \tau &= \frac{t(g\beta\Delta T)^{2/3}}{\nu^{1/3}} \end{aligned} \quad (4)$$

En estas ecuaciones g y β son la aceleración gravitatoria, en m/s², y el coeficiente de expansión volumétrico, en 1/K. Las condiciones iniciales y de frontera más apropiadas para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales, no lineal y acoplado son

$$\begin{aligned} X=0 & & U=V=\theta=0 \\ Y=0 & & U=V=0; \theta=1 \\ Y \rightarrow \infty & & U=V=\theta=0 \\ \tau=0 & & U=V=\theta=0 \end{aligned} \quad (5)$$

La solución del sistema de ecuaciones diferenciales parciales, no lineal y acoplado, junto con las condiciones iniciales y de frontera, se ha obtenido usando el método de diferencias finitas.

7. Tratamiento numérico

La solución de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales acoplados, usando el método numérico de diferencias finitas es de uso común para tratar problemas de ingeniería donde la región de estudio tiene una geometría sencilla. Sin embargo, este problema presenta algunas complicaciones debido a que la región que interesa analizar es bidimensional y las variables son función de la posición y el tiempo.

La sustitución de las derivadas parciales por diferencias finitas significa expresar las variables dependientes en función de un desarrollo truncado de serie de Taylor. Los subíndices (i, j) denotan la variación de los ejes coordenados en el espacio estudiado. Para un valor dado de (i, j) el espacio coordenado está definido por: $X = i \Delta X$, $Y = j \Delta Y$, donde ΔX , ΔY constituyen el tamaño de la malla seleccionado.

Cada derivada parcial en el sistema de ecuaciones (1), (2), (3), es representada directamente por una expresión de diferencias finitas.

Sean U^{n+1} , V^{n+1} y θ^{n+1} los valores correspondientes de U^n , V^n y θ^n que definen los extremos de un intervalo temporal. El sistema de ecuaciones en diferencias finitas apropiado al planteamiento de este problema se muestra a continuación:

$$U_{ij}^{n+1} = U_{ij}^n - \frac{\Delta\tau}{\Delta X} U_{ij}^n (U_{ij}^n - U_{i-1,j}^n) - \frac{\Delta\tau}{\Delta Y} V_{ij}^n (U_{ij+1}^n - U_{ij}^n) + \Delta\tau \theta_{ij}^{n+1} + \frac{\Delta\tau}{(\Delta Y)^2} (U_{ij+1}^n - 2U_{ij}^n + U_{i,j-1}^n) \quad (6)$$

$$\theta_{ij}^{n+1} = \theta_{ij}^n - \frac{\Delta\tau}{\Delta X} U_{ij}^n (\theta_{ij}^n - \theta_{i-1,j}^n) - \frac{\Delta\tau}{\Delta Y} V_{ij}^n (\theta_{ij+1}^n - \theta_{ij}^n) + \frac{1}{Pr} \frac{\Delta\tau}{(\Delta Y)^2} (\theta_{ij+1}^n - 2\theta_{ij}^n + \theta_{i,j-1}^n) \quad (7)$$

$$V_{ij}^n = V_{i,j-1}^n - \frac{\Delta Y}{\Delta X} (U_{ij}^{n+1} - U_{i-1,j}^{n+1}) \quad (8)$$

Durante el ciclo de un intervalo temporal se consideran como constantes los coeficientes adimensionales U_{ij}^n y V_{ij}^n que aparecen en las ecuaciones. Por tanto, al final de cualquier incremento de tiempo adimensional $\Delta\tau$, los nuevos valores adimensionales de las temperaturas θ^{n+1} y componentes de velocidad U^{n+1} y V^{n+1} en todos los puntos interiores de la malla pueden encontrarse mediante aplicaciones sucesivas de las ecuaciones. Este proceso se repite hasta encontrar una solución con el método numérico, que sea estable y convergente además de consistente.

8. Resultados y discusión

Los campos adimensionales de las componentes de velocidad U y V y del vector velocidad, \mathbf{V} , para los tiempos adimensionales, τ , de 13 y 130, se muestran en las figuras 3 a 14. Es importante señalar que los resultados experimentales se adimensionalizaron de acuerdo a los parámetros de la ecuación (4). Lo anterior con el objeto de hacer una comparación con los resultados numéricos.

En la componente de velocidad vertical adimensional, U , para un tiempo adimensional de $\tau = 13$, figura 3, se observan dos zonas, una positiva cerca de la placa caliente y otra de magnitud despreciable lejos de la misma. La magnitud de la componente de velocidad va aumentando desde la frontera inferior, donde toma un valor de cero, hasta tomar la máxima magnitud, en la parte superior del sistema, que es de 0.888. El flujo vertical es grande cerca de frontera con mayor temperatura, se dirige hacia arriba debido al efecto convectivo, y genera una capa límite intensa en las cercanías de la placa. Para el caso experimental, figura 4, se nota la división del sistema en las mismas zonas pero con valores distintos. El valor máximo

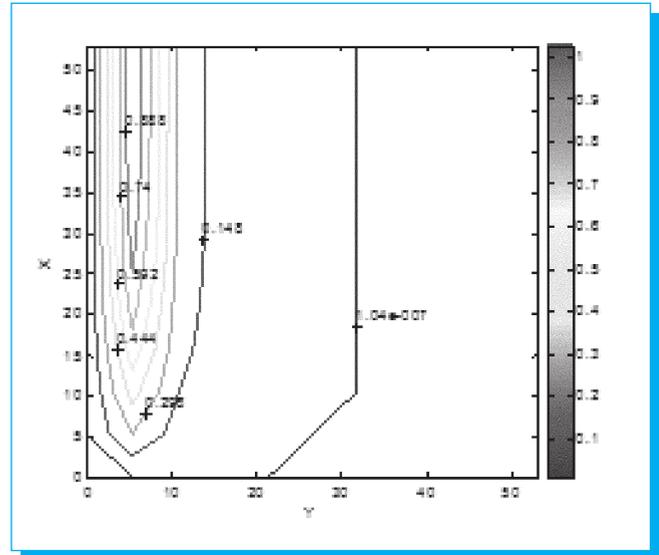


Fig. 3. Componente vertical de velocidad adimensional, U , para un tiempo $\tau=13$ (numérico).

positivo, ubicado en la parte superior del sistema, es de 0.829. Al hacer una comparación entre los valores máximos, experimentales y numéricos, se observa que hay una diferencia de 0.059.

En la componente de velocidad horizontal adimensional, V , para un tiempo adimensional de $\tau=13$, figura 5, se observan

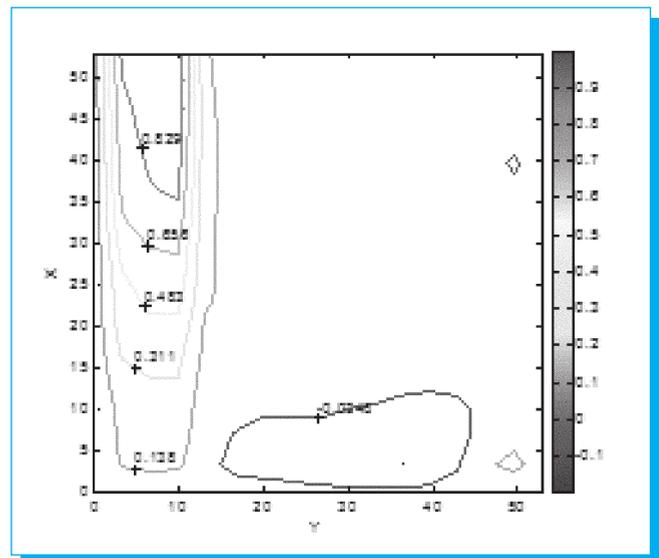


Fig. 4. Componente vertical de velocidad adimensional, U , para un tiempo $\tau=13$ (experimental).

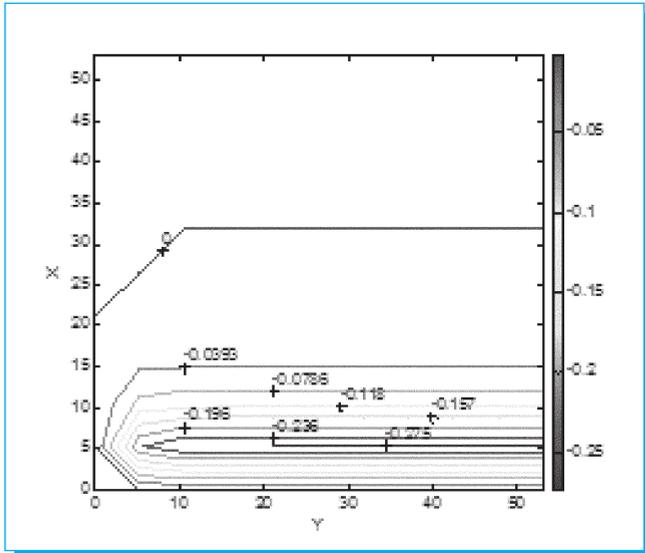


Fig. 5. Componente horizontal de velocidad adimensional, V , para un tiempo $\tau=13$ (numérico).

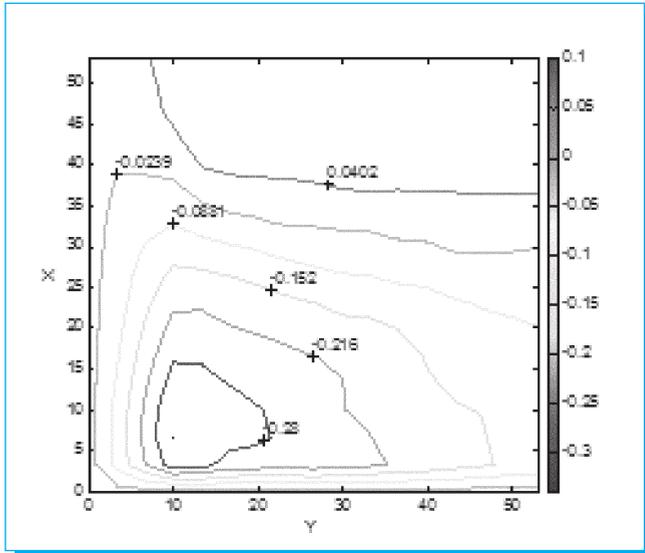


Fig. 6. Componente horizontal de velocidad adimensional, V , para un tiempo $\tau=13$ (experimental).

también dos zonas, una negativa en la parte inferior del sistema y otra de magnitud despreciable en el resto del mismo. El signo negativo de esta componente de velocidad indica que el flujo se dirige hacia la izquierda, generando una capa límite de fluido que alimenta al flujo vertical. Su valor máximo se ubica en la parte inferior del sistema, -0.275 , y de allí su magnitud va disminuyendo hasta hacerse cero en la parte superior. Para el caso experimental, figura 6, se nota la división del sistema en las mismas zonas, pero en este caso la velocidad horizontal abarca un área mayor. Lo anterior es debido a la influencia que tiene el tamaño del depósito de acrílico, el cual no permite que haya una disipación térmica adecuada. El valor máximo negativo se encuentra en la parte inferior del sistema y tiene una magnitud de -0.28 . Haciendo una comparación entre los valores máximos, experimentales y numéricos, se observa que hay una diferencia de 0.005 .

Al analizar los vectores de velocidad adimensionales, \mathbf{V} , para un tiempo adimensional de $\tau=13$, figura 7, se observa que el flujo viene de la parte inferior derecha del sistema, se dirige hacia la placa caliente y de allí su dirección cambia, generándose un flujo vertical ascendente. En la gráfica se aprecian claramente dos capas límite, una horizontal que se dirige hacia la izquierda, y que va reduciendo su valor mientras se va acercando a la pared caliente, y una vertical que se dirige hacia arriba, y que va aumentando su magnitud conforme se va acercando a la parte superior del sistema. Finalmente se observa que hay una zona en la parte superior derecha del sistema que no está influenciada por el flujo convectivo pues la magnitud del vector velocidad

es despreciable. Para el caso experimental, figura 8, se puede apreciar el mismo fenómeno, es decir, que el flujo viene de parte inferior derecha del sistema, se dirige hacia la placa caliente y de allí cambia su dirección de manera vertical ascendente. En este caso la zona sin movimiento es menor a la de la solución numérica debido a que la componente de velocidad horizontal abarca un área mayor.

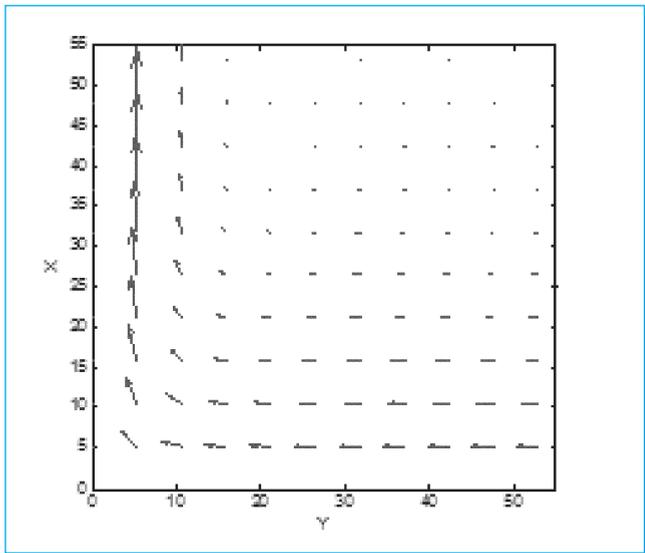


Fig. 7. Vector velocidad adimensional, \mathbf{V} , para un tiempo $\tau=13$ (numérico).

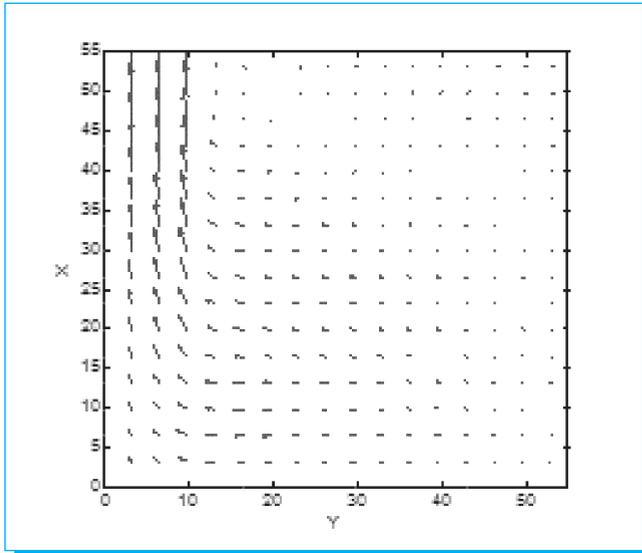


Fig. 8. Vector velocidad adimensional, V , para un tiempo $\tau=13$ (experimental).

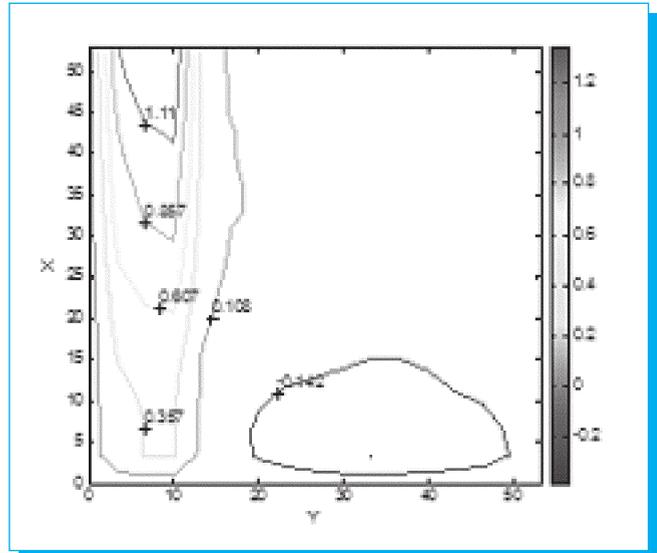


Fig. 10. Componente vertical de velocidad adimensional, U , para un tiempo $\tau=130$ (experimental).

El comportamiento de la componente de velocidad vertical adimensional U , para un tiempo adimensional de $\tau=130$, figura 9, es el mismo que el descrito con anterioridad, es decir, que se genera un flujo vertical ascendente que va incrementando su valor conforme se acerca a la parte superior del sistema. Para este tiempo se puede apreciar que la zona convectiva aumenta y que el valor máximo que alcanza dicha velocidad es de 1.16. Para el caso experimental, figura 10, la magnitud máxima que

alcanza la velocidad vertical es de 1.11. Al hacer una comparación entre los valores máximos, experimentales y numéricos, se observa que hay una diferencia de 0.05. El comportamiento de la componente de velocidad horizontal adimensional, V , para un tiempo adimensional de $\tau=130$, figura 11, es el mismo que el descrito con anterioridad, es decir, que se genera un flujo horizontal que tiene su valor máximo en la parte inferior del sistema. Para este tiempo se puede apreciar

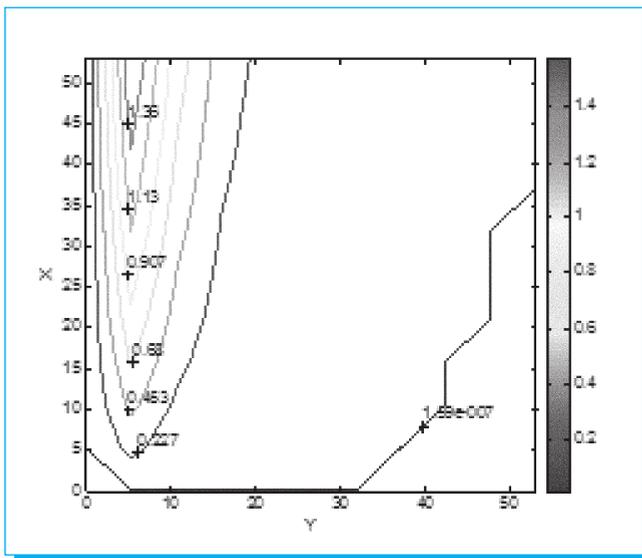


Fig. 9. Componente vertical de velocidad adimensional, U , para un tiempo $\tau=130$ (numérico).

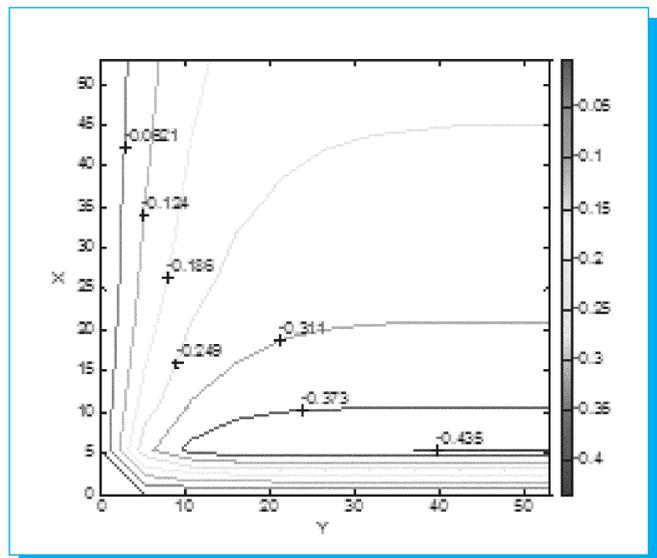


Fig. 11. Componente horizontal de velocidad adimensional, V , para un tiempo $\tau=130$ (numérico).

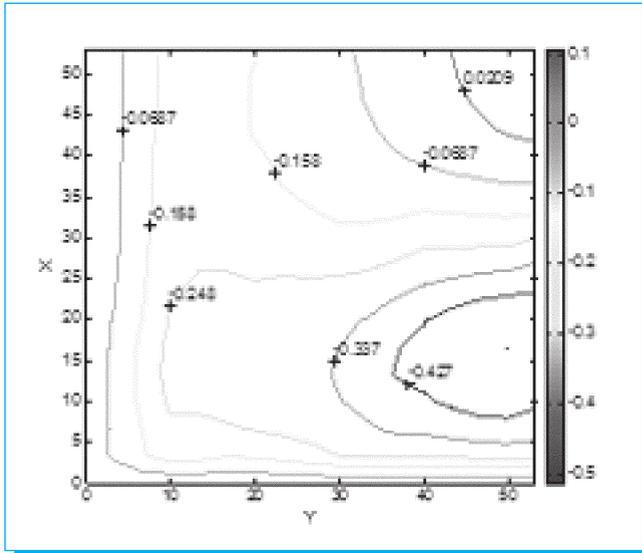


Fig. 12. Componente horizontal de velocidad adimensional, V , para un tiempo $\tau=130$ (experimental).

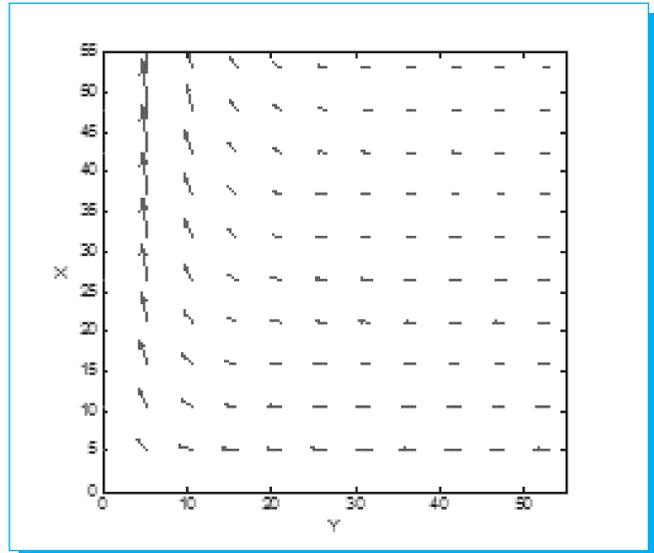


Fig. 13. Vector velocidad adimensional, V , para un tiempo $\tau=130$ (numérico).

que el flujo horizontal cubre en su totalidad la zona de estudio. El valor máximo que alcanza esta componente es de -0.435 . Para el caso experimental, figura 12, la magnitud máxima que alcanza la velocidad horizontal es de -0.427 . Al hacer una comparación entre los valores máximos, experimentales y numéricos, se observa que hay una diferencia de 0.008 . El comportamiento del vector velocidad adimensional, V , para un tiempo adimensional de $\tau=130$, figuras 13 y 14, es el mismo que el descrito con anterioridad pero para este tiempo la región de análisis se ha cubierto por completo.

Otro análisis importante se obtiene al observar la figura 15, en ella se muestra el comportamiento de la componente de velocidad vertical adimensional U , para una posición fija en el eje X de 27.5 y para distintos tiempos adimensionales τ . Se puede apreciar que en el caso numérico, línea continua, la velocidad comienza en cero pues se impone la condición de frontera de no deslizamiento en la pared caliente, posteriormente empieza a aumentar su valor hasta llegar a la velocidad máxima y finalmente comienza a disminuir su magnitud hasta hacerse cero en el borde de la capa límite en la posición X de 15.6 . Al observar los diferentes tiempos del caso numérico se aprecia que el valor de esta componente de velocidad va en aumento y que muestra el mismo comportamiento. Algo parecido sucede con el caso experimental (línea discontinua) pero con valores distintos. Se aprecia, en todos los tiempos, que la magnitud de la velocidad vertical es ligeramente menor al caso numérico y que los valores máximos están desplazados a la derecha. Otra característica importante es que aunque el borde de la capa

límite se puede considerar en el mismo sitio del caso numérico, la velocidad después de este punto no es cero, sino que va disminuyendo muy lentamente durante el resto del sistema. Es decir, que el efecto convectivo también se presenta después de la capa límite, aunque con magnitudes muy bajas.

Como pudo observarse en el análisis de resultados, la distribución de las componentes adimensionales de la velocidad vertical U , horizontal V , y del vector velocidad, V , se

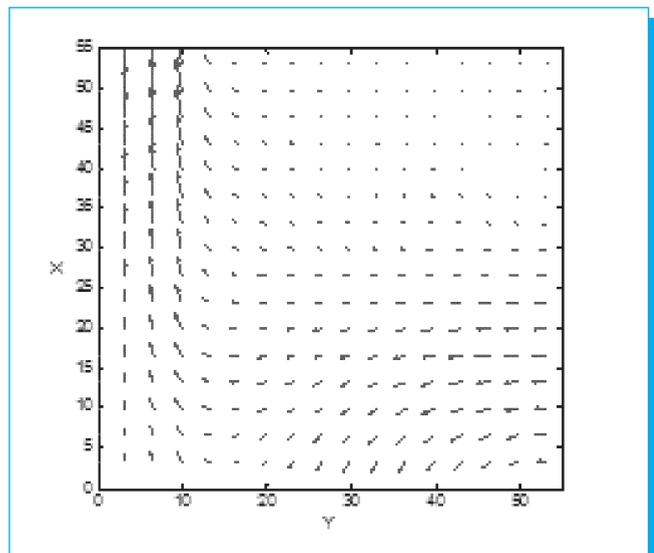


Fig. 14. Vector velocidad adimensional, V , para un tiempo $\tau=130$ (experimental).

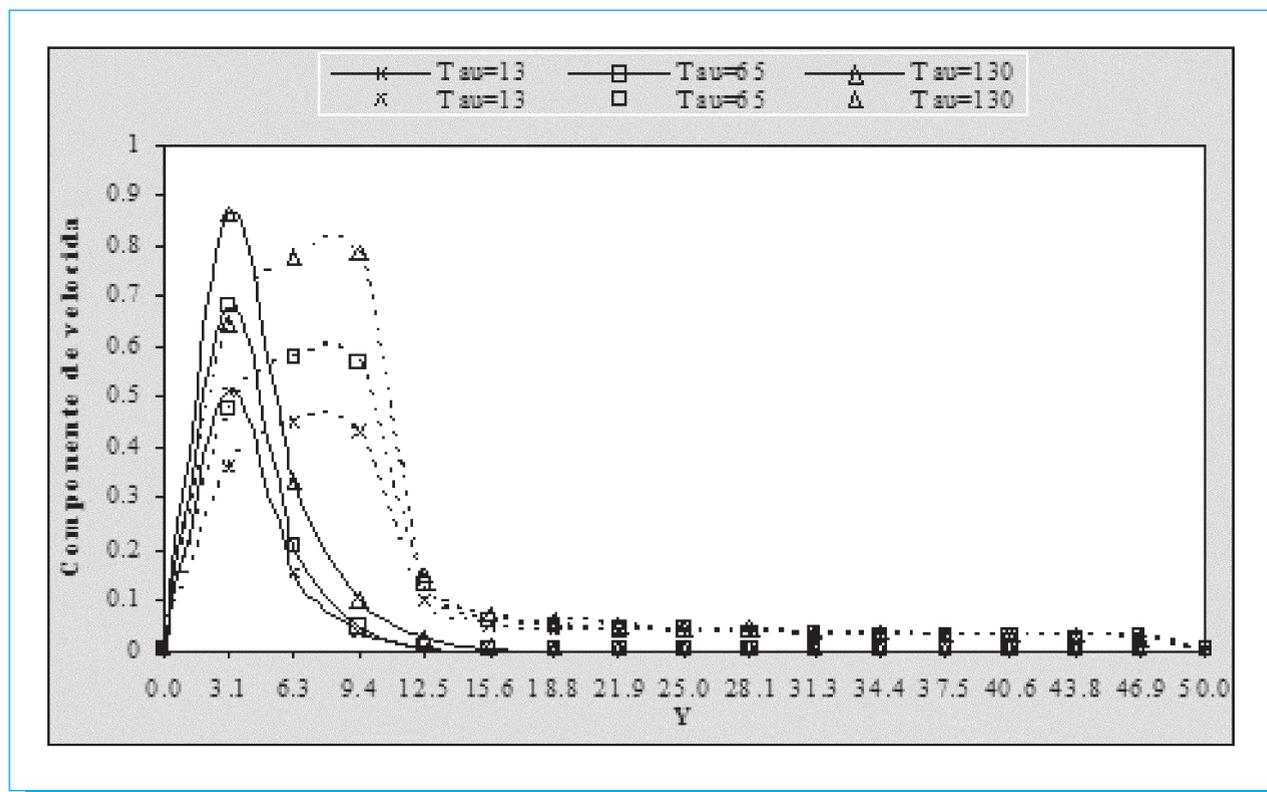


Fig. 15. Componente de velocidad vertical adimensional U , para la posición $X=27.5$ y diferentes tiempos τ numérico (línea continua) y experimental (línea punteada).

componentes de las mismas regiones de flujo, tienen las mismas direcciones y sus valores están dentro del mismo orden de magnitud. Por lo anterior se puede decir que para las condiciones propuestas en este estudio se tiene una buena aproximación entre el análisis experimental y el numérico. Los resultados obtenidos ofrecen información de gran interés para el desarrollo de diferentes procesos industriales. Permite por ejemplo conocer el intervalo de tiempo transitorio de un fenómeno en el cual la convección natural es importante. Esto motiva a generar mayor investigación experimental y numérica que permita analizar nuevos fluidos con diferentes rangos de temperatura, con la intención de conocer las propiedades cinemáticas que se generan en los sistemas convectivos transitorios de pared vertical.

9. Conclusiones

En este trabajo, se analizan experimental y numéricamente las componentes adimensionales de la velocidad horizontal V , vertical, U , y del vector velocidad, \mathbf{V} , del flujo en convección natural transitorio promovido por una pared vertical caliente. Se encontró que el campo de la componente de velocidad vertical

adimensional U , está descrito por un flujo vertical ascendente ubicado en las cercanías de la pared caliente, encontrándose que en el resto del sistema su magnitud es despreciable. Al comparar los resultados experimentales con los numéricos se encontró una diferencia de 7.1% para un tiempo adimensional de $\tau=13$ y 4.5% para un tiempo de $\tau=130$. Se encontró que la componente de velocidad horizontal adimensional V , está descrita por un flujo horizontal que se ubica en la parte inferior del sistema y que se dirige hacia la pared caliente. Al hacer una comparación de los resultados experimentales con los numéricos se encontró una diferencia de 1.7% para un tiempo adimensional de $\tau=13$ y 1.8% para un tiempo de $\tau=130$. Finalmente se encontró que los campos del vector velocidad adimensional, \mathbf{V} , están descritos por dos flujos, uno negativo, ubicado en la parte inferior del sistema que se dirige hacia la pared caliente, y otro positivo ubicado cerca de la pared caliente que se dirige hacia la parte superior del sistema. En dichas gráficas se aprecia claramente que el flujo horizontal cambia de dirección debido al efecto convectivo que genera la placa caliente. Finalmente, los resultados muestran que el equipo diseñado y la metodología experimental propuesta son adecuados pues se tiene una buena concordancia con los resultados del método numérico. Lo

anterior pone de manifiesto que al utilizar equipos de medición de alta tecnología, tal como el PIV, se pueden analizar fenómenos complejos, como los de convección natural, de manera confiable.

10. Referencias

- [1] Linthorst S., J. M., Schinkel W., M. M. y Hoogendoorn C. J. "Natural convection flow in inclined air-filled enclosures of small and moderate aspect ratio". *Proceedings of the second international symposium on flow visualization*. September 9-12, 1980. Bochum, West Germany.
- [2] López, C., Morales, G., Díaz, C., Lara, V., Vaca, M., y Lizardi R. "Análisis Experimental de la Estratificación del Flujo un una Cavity Cerrada". *9o Congreso Chileno Nacional de Ingeniería Mecánica*. Chile, Santiago. 2000.
- [3] Kitagawa, A., Kosuge, K., Uchida, K. y Hagiwara Y. "Heat transfer enhancement for laminar natural convection along a vertical plate due to sub-millimeter-bubble injection". *Experiments in fluids*. Springer. vol 45, No. 3, pp. 473-484. 2008.
- [4] J. D. Hellums y S. W. Churchill. "Transient and steady state, free and natural convection, numerical solutions Part.1 The isothermal, vertical plate". *A. I. Ch. E. Journal*. vol. 8, No. 5, pp. 690-692. 1962.
- [5] Y. Jaluria y B. Gebhart. "Buoyancy-induced flow arising from a line thermal source on an adiabatic vertical surface". *Int. Journal Heat Mass Transfer*. vol 20, pp. 153-157. 1977.
- [6] D. B. Ingham. "Transient free convection on an isothermal vertical flat plate". *Int. Journal Heat Mass Transfer*. vol 21, pp. 67-69, 1978.

DIGITAL DOT

SERVICIOS

DIGITALES

ELECTRÓNICOS

INTEGRALES

Producción y posproducción en audio y video

Centenario 3, Col. Del Carmen, Coyoacán, México, DF.

5339 5880, 5339 5474