

# Interferometría Holográfica: Estudio de un Fluido en Convección Natural

E. E. Alanís, G. G. Romero<sup>\*</sup>, C. C. Martínez

Facultad de Ciencias Exactas-Universidad Nacional de Salta  
Buenos Aires 177- 4400- Salta- Argentina  
e-mail:marigra @ ciunsa.edu.ar

Se planteó el uso de la Interferometría Holográfica a tiempo real para obtener información cualitativa (visualización de flujo) y cuantitativa (campo de temperaturas) de un fluido en convección natural, en modelos a escala reducida que simulan sistemas utilizados en climatización de viviendas. El proceso convectivo se estudió a tiempo real a través de la evolución temporal de los interferogramas holográficos, registrados secuencialmente en película fotográfica o en forma continua en video. También se utilizaron hologramas de doble exposición. Se determinó el gradiente de temperatura en zonas adyacentes a la placa calefactora como así también la variación de temperatura entre franjas de interferencia, utilizando la hipótesis de bidimensionalidad del flujo. Se analizó la validez de esta hipótesis y se efectuaron correcciones debido a errores de refracción.

Real time Holographic Interferometry was used in order to get qualitative (flow visualisation) and quantitative information (temperature field) of a natural convecting fluid inside scale models that simulate air-conditioned housing systems. Temporal evolution of the interferograms was registered in photographic films or recorded in video. Double exposure holograms were also utilized. Applying the hypothesis of 2-dimensional flow, temperature gradients near the heating wall and variations of temperature between interference fringes were determined. This hypothesis is analyzed and corrections of refraction errors are taken into account.

## I. Introducción

La interferometría holográfica es una técnica no perturbativa, utilizada en fenómenos de transferencia térmica en medios transparentes y se basa en la distribución no homogénea de índice de refracción<sup>(1)</sup>. Las variaciones en la velocidad de la onda objeto que atraviesa el medio en dos estados diferentes, provoca una diferencia de fase que da lugar a la formación de un patrón de franjas de interferencia cuyo análisis permite determinar propiedades físicas del medio tales como densidad y temperatura. El modelo es de geometría prismática de dimensiones  $0,10 \times 0,09 \times 0,08 \text{ m}^3$ , realizado en vidrio y contiene agua en su interior a la que se entrega calor por medio de una resistencia eléctrica devanada en una de las paredes verticales. El modelo es iluminado haciendo incidir el haz objeto en un difusor adyacente a una de sus paredes. El dispositivo para la construcción y reconstrucción del holograma se esquematiza en la figura 1. El holograma se construye estando el fluido a temperatura uniforme ( $T(x,y,z) = T_0$ ) lo que constituye el estado de referencia. Se procede a su revelado *in situ* utilizando una "liquid gate" diseñada al efecto, lo que elimina errores de reposicionamiento y minimiza los efectos de la deformación de la emulsión, con lo que se logra la eliminación de franjas de interferencia espúreas<sup>(2,3)</sup>. La imagen holográfica del objeto se reconstruye por medio del mismo haz de referencia utilizado en la construcción.

De esta manera, la onda objeto proveniente de la imagen holográfica (virtual) correspondiente al estado de referencia, se superpone espacial y temporalmente con la onda proveniente del objeto real.

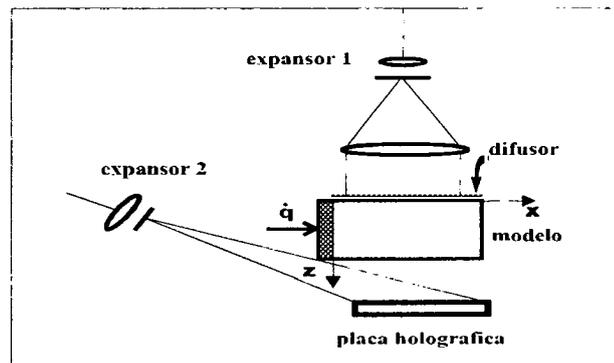


Figura 1: Dispositivo experimental (vista en planta)

Si todas las condiciones han permanecido invariables durante el proceso, la diferencia de fase entre estas dos ondas es nula y se observa un campo de irradiancia uniforme. Al entregar energía al sistema se produce una distribución de índice de refracción  $n(x,y,z)$ . La diferencia con el índice de refracción uniforme  $n_0$  del estado de referencia,  $\delta n(x,y,z) = n(x,y,z) - n_0$ , genera una diferencia de fase entre las dos ondas. Si se considera que el medio transparente es un objeto de fase, es decir se desprecian los efectos de la refracción, los rayos se propagan en línea recta y la diferencia de camino óptico entre rayos correspondientes que viajan en la dirección  $z$  (dirección de observación) viene dada por la expresión:

$$\delta\phi(x,y) = \int [n(x,y) - n_0] dz \quad (1)$$

La ecuación para una franja brillante es:

$$\delta\phi(x,y) = \lambda N \quad (N = 0,1,2,\dots) \quad (2)$$

<sup>\*</sup> Becaria CONICET

donde  $N$  es el orden de la franja y  $\lambda$  la longitud de onda.

Este tipo de interferograma es denominado de franja infinita y muestra contornos de valores constantes de  $\delta\phi$ . A partir del interferograma se determina  $\delta\phi$  y se obtiene  $\delta n(x,y,z)$  por medio de la ecuación (1). Finalmente se relaciona  $n(x,y,z)$  a otra propiedad física de interés. La inversión de la ecuación (1) para obtener  $\delta n(x,y,z)$  puede ser más o menos laboriosa, dependiendo de la estructura del objeto de fase. Si se puede considerar que la distribución de índice de refracción es bidimensional,  $n = n(x,y)$ , el resultado es inmediato:

$$\begin{aligned} \delta\phi(x,y) &= \lambda N(x,y) = \\ &= \int_0^L [n(x,y) - n_0] dz = \delta n(x,y)L \end{aligned} \quad (3)$$

donde  $L$  es la longitud del objeto en la dirección de observación (eje  $z$ ). De (3), se tiene:

$$\delta n(x,y) = \lambda N(x,y)/L \quad (4)$$

## II. Resultados experimentales

### Descripción

La evolución temporal de los interferogramas puede apreciarse en la figura 2, donde se muestran tres de ellos correspondientes a distintos tiempos en una experiencia típica. Como se vio anteriormente, cada franja corresponde a un contorno de  $\delta\phi = \text{cte}$ , que en la aproximación bidimensional representa una isoterma. Las sucesivas isotermas indicarían un incremento de temperatura de  $\sim 0,09$  K, de acuerdo al cálculo que se efectúa más adelante. La ambigüedad en el signo de la fase, inherente a un interferograma de franja infinita, es removida si se tiene en cuenta que la temperatura aumenta en dirección a la placa calefactora ubicada a la derecha de la figura.

La observación a tiempo real permite la visualización de la evolución del campo de temperaturas en el transcurso de la experiencia.

Para justificar el uso de la ecuación (4) debe analizarse el cumplimiento de las hipótesis que se utilizaron anteriormente. En una experiencia previa en que se aplicó la técnica PIV<sup>(4)</sup> (Particle Image Velocimetry) pudo comprobarse que, en condiciones similares a la presente experiencia, la componente de la velocidad de las partículas sembradas, en la dirección  $z$  de observación, era despreciable, por lo que cabe admitir la bidimensionalidad del flujo en primera aproximación.

A fin de comprobar la efectividad del revelado "in situ" en experiencias efectuadas a tiempo real, se realizó una experiencia de doble exposición. Para ello y con el mismo dispositivo experimental, se tomó un holograma del estado de referencia y luego de 6 minutos de calentamiento, se realizó sobre la misma placa holográfica la segunda exposición. De esta manera se evitan los problemas de reposicionamiento y de las posibles deformaciones del material sensible, ya que las dos exposiciones se efectúan en las mismas condiciones. Una fotografía del holograma de doble exposición se muestra en la figura 3.

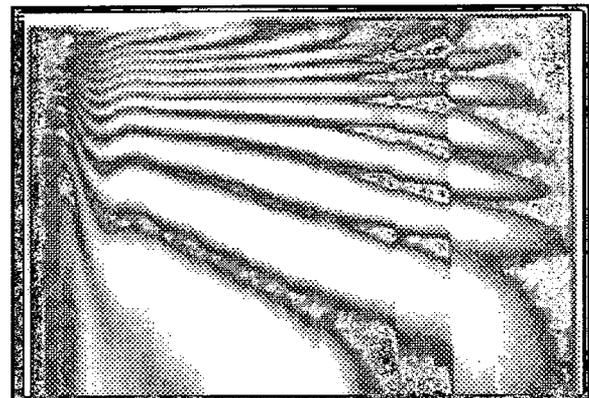
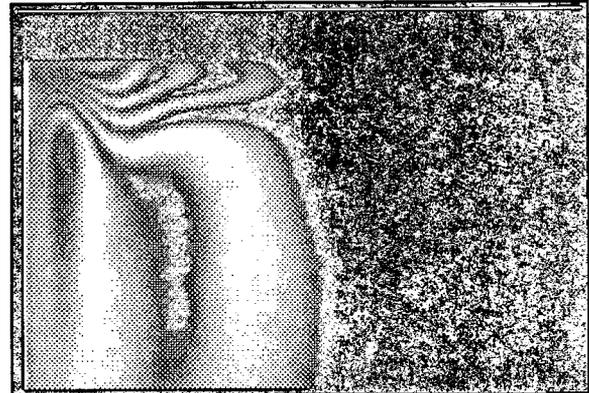
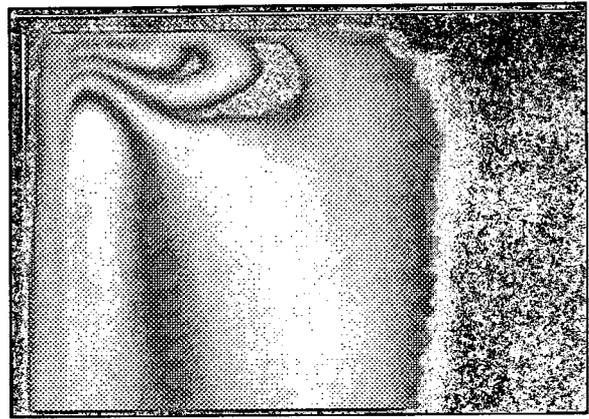


Figura 2: Evolución temporal de los interferogramas.

Se realizaron varias experiencias a tiempo real, las cuales fueron debidamente documentadas mediante registro fotográfico y en algunos de los casos en video. Se observa que en igualdad de condiciones, el fenómeno en estudio muestra una evolución de los patrones de interferencia similar al obtenido para el caso de doble exposición, como se visualiza al comparar las figuras 3 y 2c), ambas tomadas a los 6 minutos de iniciado el calentamiento.

### Comparación con medición convencional de temperatura

Con el propósito de calibrar este método de medición de temperaturas, se colocaron en el modelo una serie de termocuplas para medir temperaturas, según el esquema de la figura 4.

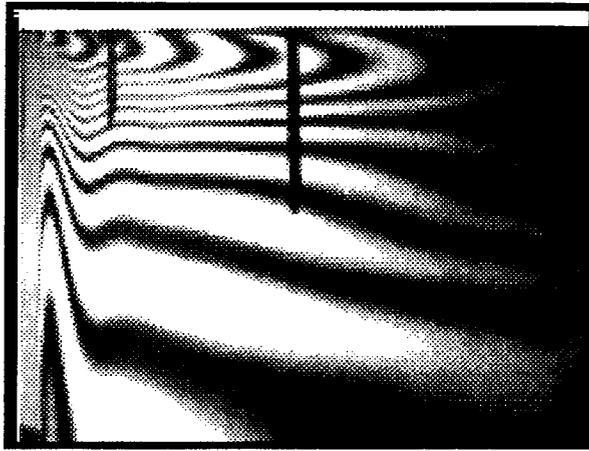


Figura 3: Holograma de doble exposición.

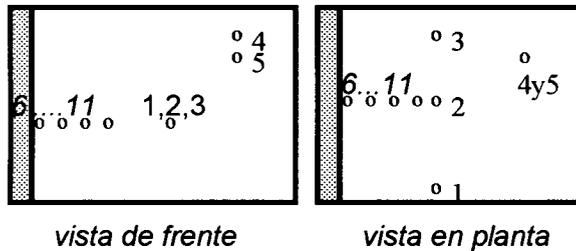


Figura 4: Posición de las termocuplas en el modelo

Los sensores 6 a 11, permiten tener información sobre el gradiente de temperaturas en la capa límite térmica y compararlo con el que se obtiene a partir de los patrones de franjas de la secuencia fotográfica, obtenida durante las experiencias. Los sensores 1, 2 y 3 dan información sobre la distribución de temperatura en la dirección z. El sensor 2 es el utilizado para correlacionar la variación de temperatura con el orden de franja de interferencia que pasa por ese punto (ver figura 3) en tiempo real. Las indicaciones de cada termocupla se registraron durante 20 a 30 minutos de calentamiento a intervalos de aproximadamente 1 minuto.

A partir del holograma de doble exposición se calculó la distribución de temperaturas en zonas adyacentes a la placa calefactora. A tal efecto se registró una fotografía del holograma reconstruido y en el negativo correspondiente se midieron las distancias de las franjas de interferencia respecto de la placa calefactora, con un microscopio dotado de un micrómetro ocular. Teniendo en cuenta el factor de escala correspondiente al tamaño del negativo y el tamaño real del modelo, que en este caso es de 6.6, se obtuvieron tablas donde se consignan el orden asignado a cada franja y la distancia a la placa. Por medio de la ecuación  $n(x) - n_0 = N(x)\lambda / L$ , se calculó el índice de refracción. La temperatura correspondiente se obtuvo a partir de la ecuación propuesta por Dobbinson y Peck<sup>(1)</sup>, expresada por:

$$n - 1.3332 = -(1.936T + 1.699T^2) \times 10^{-5} \quad (5)$$

donde T está medido en °C.

En la figura 5 se muestra una de las curvas de temperatura en función de la distancia a la placa, calculada de

esta forma, y se incluye también la curva obtenida con las mediciones de las termocuplas.

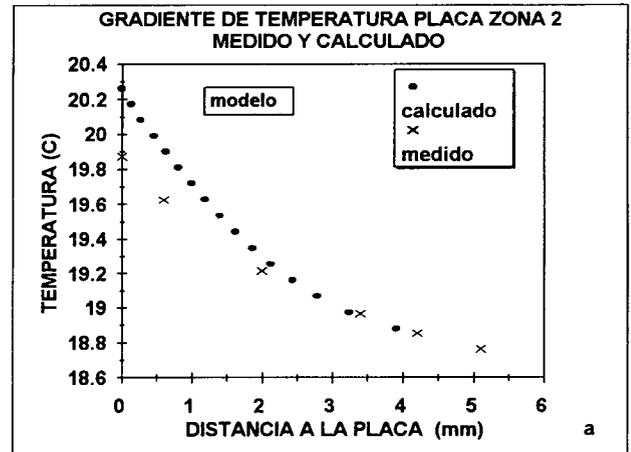


Figura 5: Distribución de temperatura normal a la placa.

Puede verse que ambas difieren a medida que nos acercamos a la placa. Posibles causas del desacuerdo podrían ser algunas de las hipótesis de simplificación realizadas inicialmente, como se puntualizó más arriba. Para ello se consideraron las posibilidades que: 1) los errores de refracción no resulten despreciables y 2) el modelo no pueda ser analizado como bidimensional. Estos problemas se discuten con más detalle a continuación.

#### Errores debido a refracción

En cuanto a la refracción producida por un gradiente de índice de refracción, el error en el cálculo del camino óptico sería menor que  $\lambda/10$ <sup>(1)</sup>, si se cumple la desigualdad:

$$e = \left[ \lambda L / (n_0 d_f^2) \right] < 0.3 \quad (6)$$

donde  $d_f$  es la distancia entre las franjas. Sobre la base de las mediciones realizadas se evaluó el primer término de la desigualdad anterior para distintas posiciones, obteniéndose un valor de aproximadamente 2 en la zona cercana a la placa y 0,09 a una distancia de 4mm de la misma, lo que indica que los errores de refracción afectan los cálculos en las regiones muy cercanas a la placa calefactora. En consecuencia, se procedió a la corrección de las curvas de acuerdo a la ecuación obtenida de la Referencia 1:

$$n(x_i) - n_0 = N(x_i) \frac{\lambda}{L} - n_0 L \left( \frac{n'}{n_0} \right)^2 \left( \frac{L}{3} - \frac{z_f}{2} \right) \quad (7)$$

para reemplazar a la ecuación (4), donde  $z_f$  es la distancia focal de lente y L la longitud del modelo en la dirección de observación, z.

Una estimación inicial del campo de índice de refracción se computó a partir de la expresión  $n(x) - n_0 = N(x)\lambda / L$ . El índice de refracción así calculado se modificó por la ecuación (7) y el procedimiento se repitió hasta que el resultado de las iteraciones no variaba apreciablemente. Las curvas de temperatura corregidas

das por este método para una experiencia, en el cuarto y octavo paso de iteración, se muestran en la figura 6 y puede observarse un comportamiento asintótico. Estas curvas se comparan con la obtenida experimentalmente. Posteriores iteraciones no modificaban notablemente los resultados.

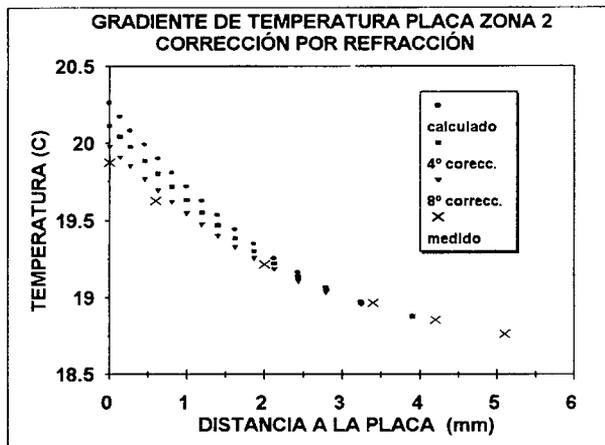


Figura 6: corrección errores de refracción

### Diferencia de temperatura entre franjas de interferencia

En las distintas experiencias a tiempo real, se registraron fotográficamente o en video el paso de sucesivas franjas por un sensor de temperatura (en este caso un termistor calibrado, ver figura 3) durante la evolución temporal de los patrones de interferencia.

En la figura 7 se muestran los gráficos de temperatura en función del orden de la franja asignado, para una de las experiencias. Se efectuó una regresión lineal de los datos de cuya pendiente se obtuvo el valor medio de la variación de temperatura por franja (ver la tabla 1).

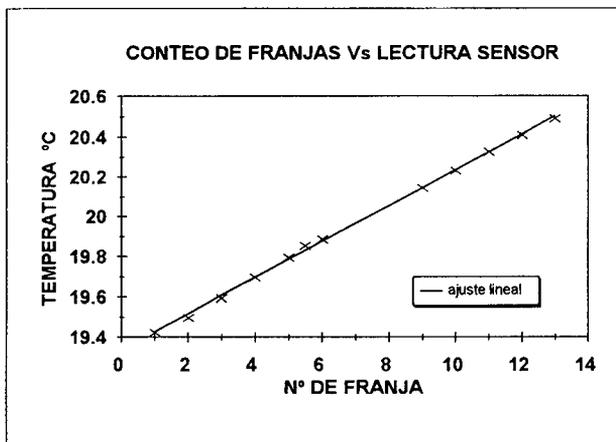


Figura 7: Variación de T por franja de interferencia.

La variación de temperatura por franja se puede calcular a partir de la ecuación:

$$\delta T / \text{franja} = \frac{\delta T}{\delta n} \times \frac{\lambda}{L} \quad (8)$$

donde  $\lambda/L$  es la variación de índice de refracción por franja de interferencia. Además, derivando la ecuación (5) respecto de  $T$  se obtiene:

$$\frac{dn}{dT} = -(1.936 + 0.3398T) \times 10^{-5} \quad (9)$$

En la tabla 1 se indica para tres de las experiencias, el valor de  $\Delta T$  por franja medido y el valor teórico calculado mediante la expresión (8).

TABLA 1  
Comparación de  $\Delta T$  por franja, teórico y medido, para tres experiencias.

Experiencia	valor teórico	valor medido
1	0,09	0,09
2	0,12	0,15
3	0,11	0,16

### Estudio de la bidimensionalidad del flujo

Hasta ahora se supuso que el flujo es bidimensional. Esta hipótesis se apoya, por un lado, en los resultados de la experiencia PIV, donde no se apreciaron desplazamientos de las partículas en la dirección  $z$  de observación. Además, en mediciones de temperatura para distintos valores de  $z$  manteniendo  $x$  e  $y$  constantes tampoco se observaron diferencias apreciables. Teniendo en cuenta que los datos de estas dos experiencias son limitados, es decir, no se hizo un sondeo en todo el volumen del modelo, se creyó conveniente registrar un holograma de doble exposición en una dirección perpendicular a la anterior. Por razones constructivas, sólo se pudo realizar en la dirección  $y$  (vertical). La primera exposición tiene lugar con el fluido en equilibrio térmico con el ambiente, de tal manera que  $n(x,y,z) = n_0 = \text{cte}$ . La segunda exposición tiene lugar 6 minutos después de iniciada la entrega de potencia, de manera que pueda compararse con la experiencia de la figura 3.

La diferencia de recorrido de rayos correspondientes, que atraviesan el modelo en la dirección  $y$  en la primera y segunda exposición respectivamente, viene dada, en la hipótesis bidimensional, por la expresión:

$$\delta\phi = \int_0^H [n(x,y) - n_0] dy = f(x) \quad (10)$$

donde  $H$  es la dimensión del modelo en la dirección  $y$ .

Para  $\delta\phi = M\lambda$  ( $M$  entero) se observará una franja brillante. Si esta condición es solo función de  $x$ , el interferograma mostrará un patrón de franjas paralelas a la placa calefactora (dirección  $z$ ).

Una fotografía del holograma resultante se muestra en la figura 8, estando ubicada la placa calefactora en la parte superior de la foto ( $y$ : dirección de observación, vertical;  $x$ : dirección normal a la placa;  $z$ : dirección paralela a la placa). Primero se observa una simetría respecto del plano medio ( $x,y$ ), en  $z \cong L/2$ . Resulta evidente, además, que el flujo no es bidimensional. Sin embargo, en la zona cercana a la placa donde se midió el gradiente

de temperatura, las franjas son aproximadamente paralelas. Este resultado hace suponer que la hipótesis bidimensional es razonable para dicho cálculo. Para tener una idea aproximada del error cometido en las zonas de mayor variación, por ejemplo en la parte central donde se observan las franjas circulares, se realiza la siguiente estimación. Partiendo de la franja circular central brillante y desplazándose en la dirección  $z$ , hasta una de las paredes laterales del modelo, se aprecia una variación de orden de interferencia de 2,5 aproximadamente. La variación de la diferencia de caminos ópticos entre los rayos centrales ( $z_1 = L/2$ ) y los laterales ( $z_2 = 0$ , ó  $L$ ), viene dado por:

$$\delta\phi_1 - \delta\phi_2 = 2,5\lambda = \int_0^H \left\{ \left[ n(x, y, z_1) - n_0 \right] - \left[ n(x, y, z_2) - n_0 \right] \right\} dy$$

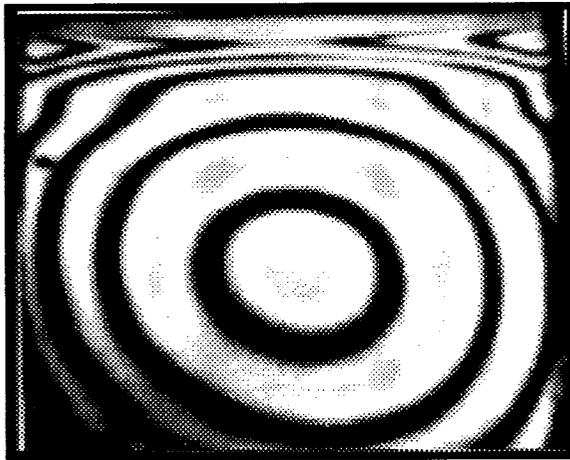


Figura 8: Holograma de doble exposición, vista en planta.

Llamando  $\bar{n}_1$  y  $\bar{n}_2$  al índice de refracción promedio en la dirección  $y$ , correspondiente a las coordenadas  $(x, z_1)$  y  $(x, z_2)$  respectivamente, se tiene:

$$\delta\phi_1 - \delta\phi_2 \cong (\bar{n}_1 - \bar{n}_2) \int_0^H dy = \delta\bar{n} \times 0,095 = \delta M \times \lambda$$

con  $\delta M \approx 2,5$  resulta:

$$\delta\bar{n} = \frac{2,5\lambda}{0,095} = 0,16631 \times 10^{-9} = 0,17 \times 10^{-4}$$

para agua a 20 °C,  $dn/dT = 1 \times 10^{-4}$  y

$$\delta\bar{T} = \frac{\delta\bar{n}}{1 \times 10^{-4}} = 0,17^\circ \text{C}$$

Esta diferencia es del orden de la precisión de las mediciones realizadas con termocuplas. Como es de esperar se advierte que la falta de bidimensionalidad del modelo proviene de los efectos de borde y podría ser minimizada aumentando su dimensión en la dirección  $z$ . En la zona adyacente a la placa calefactora, las franjas de interferencia muestran una tendencia más parecida a la predicción teórica (modelo bidimensional), pero se observa una perturbación en las esquinas debida seguramente a vórtices que se generan en la intersección de las paredes.

### Conclusiones

Desde el punto de vistas cualitativo, la interferometría holográfica ha mostrado ser útil para la visualización de la evolución del campo de temperaturas en el proceso de modelización de recintos climatizados. Se demuestra que resulta posible obtener información cuantitativa de la variación de temperatura en los casos en que sea válida la aproximación de flujo bidimensional, con una precisión comparable a la que se determina con sensores convencionales evitando las perturbaciones que estos producen.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Facultad de Ciencias Exactas y el Consejo de Investigaciones de la Universidad de Salta (CIUNSA).

### Referencias

- 1 - Vest, C. "Holographic Interferometry", Wiley (1976).
- 2 - Smith, H. M. "Holographic Recording Materials", Springer Verlag (1977).
- 3 - Erf, R. "Holographic Nondestructive Testing", Academic Press (1974).
- 4 - Romero G., De Paul I., Alanis E. Anales AFA, 4, 305-307 (1992).