

Estudio interferométrico de la propagación del frente de onda térmico en un sólido transparente

Interferometric Measurements of thermal wave front propagation inside a transparent solid.

L. Alvarez^{1, 2}, G. G. Romero², E. E. Alanís¹, C. C. Martínez³

¹Facultad de Ciencias Exactas – ²Facultad de Ingeniería - ³Facultad de Ciencias Naturales
Consejo de Investigación - Universidad Nacional de Salta
Buenos Aires 177- 4400- Salta - Argentina
e-mail: alvarezl@unsa.edu.ar

En el campo de la metrología óptica, la interferometría speckle digital permite realizar el análisis de distintos fenómenos físicos en forma no invasiva. En este trabajo, se evalúa su utilización para la visualización y caracterización del campo de temperatura y su evolución temporal, en un sólido transparente. Para la evaluación de los interferogramas se ha empleado el método de escalonamiento de fase. El sólido forma parte de un modelo a escala reducida de un muro tipo colector - acumulador (sistema pasivo de aprovechamiento de energía solar) sometido a una carga térmica con determinadas condiciones de contorno. En forma complementaria se realiza un registro de las medidas de temperaturas correspondientes a fin de analizar el comportamiento térmico del mismo. Se realiza una correlación entre la información obtenida a partir de las técnicas ópticas y los resultados de las medidas térmicas. La importancia del estudio y caracterización de este tipo de sistemas energéticos reside en la necesidad de establecer parámetros de diseño que determinen una mejora en la eficiencia de dicho sistema.

Palabras clave: Interferometría Speckle, phase stepping, Trombe-Michell, perfiles de temperatura.

Digital speckle interferometry is a convenient technique to be applied for the analysis of several physical phenomena in a non invasive way. In this work, the performance of this technique to visualize and characterize the thermal field in a transparent solid, is evaluated. For the phase distribution measurement, phase shifting method is used. The solid is part of a scale model of a collector-storage wall (passive solar system) subjected to a thermal load with fixed boundary conditions. Complementary temperature measurements are registered in order to evaluate the thermal behaviour of the model. A correlation between both measurements was conducted. The understanding of this type of energetic system is useful to optimize design parameters in order to improve the system efficiency.

Keywords: Speckle interferometry, phase stepping, Trombe-Michell, temperature profiles.

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se describe una experiencia para evaluar la evolución del frente de onda térmico en un sólido transparente que simula un muro, Trombe-Michel, sistema pasivo de colección y acumulación de la energía solar, utilizado generalmente como elemento estructural en la construcción de viviendas. Dada su importancia en la climatización de recintos, este sistema ha sido objeto de numerosos estudios tanto experimentales como analíticos y computacionales, tendientes a determinar diversos parámetros de diseño, geométricos y térmicos^(1,2). Sin embargo, son pocos los trabajos reportados que utilicen técnicas ópticas para este propósito y no se ha encontrado referencias a métodos interferométricos.

En este sentido, las técnicas de interferometría speckle son particularmente apropiadas para estos propósitos y en diversas aplicaciones donde se requiere obtener información instantánea

del campo completo de cambios en medios transparentes, tales como flujos de fluidos, transferencia de calor, procesos difusivos, etc., resultando una herramienta no invasiva muy útil⁽³⁾. Estas técnicas simplemente consisten en la medida de cambios en la correlación de patrones de speckle⁽⁴⁾. Las franjas de interferencia obtenidas en este tipo de técnicas están relacionadas con el cambio de fase de los patrones de speckle entre dos estados diferentes del objeto. La comparación, en interferometría speckle, se ha desarrollado de diferentes maneras, sin embargo si los patrones de speckle son procesados electrónicamente (Interferometría Speckle Digital, DSPI) es posible llevar a cabo y repetir mediciones a tiempo real con relativa facilidad y efectuar el análisis computacional de las franjas de interferencia. En estas técnicas la fase de los interferogramas del objeto bajo estudio en diferentes estados está relacionada con la información de los cambios producidos en el índice de refracción del objeto por

acción de agentes externos tales como, deformaciones, campos de temperatura⁽⁵⁾, gradientes de densidad⁽⁶⁾, etc.

Existen diferentes técnicas para codificar y extraer la información de la fase en los interferogramas⁽⁷⁾. En particular, en este trabajo se utiliza el método de escalonamiento de fase (Phase Stepping Technique), que consiste en codificar, la fase de la luz en cada punto de la imagen en una portadora. En cada punto (x,y) de un patrón de franjas la intensidad de la luz vendrá expresada por:

$$I(x, y, \xi) = I_0(x, y) + \sum_{n=1}^{n=\infty} I_n(x, y) \cos[\phi(x, y) + \alpha] \quad (1)$$

donde, $\alpha = 2n\pi\xi$, es la fase relativa entre los haces objeto y referencia, $I_0(x,y)$ es la intensidad de umbral, $I_n(x,y)$ es la amplitud de la franja asociada al n^{avo} armónico de f (frecuencia de la portadora), $\phi_n(x,y)$ es la fase asociada con el armónico n de f y ξ es un parámetro que depende de la forma en que se produce la variación de camino ópticos de uno de los haces que interfieren. En interferometría speckle, si consideramos un patrón de speckle de un estado perturbado o no, la ec. (1) se reduce a :

$$I(x, y, 0) = I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos[\phi(x, y) + 2n\pi\xi] \quad (2)$$

por simplicidad, en un sistema de procesamiento de imágenes, son convenientes saltos de fase de $\pi/2$. Los interferogramas en este caso vienen dados por:

$$\begin{aligned} I(x, y, 0) &= I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos[\phi(x, y)] \\ I(x, y, 0) &= I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi/2] \\ I(x, y, 0) &= I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos[\phi(x, y) + \pi] \\ I(x, y, 0) &= I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos[\phi(x, y) + 3\pi/2] \end{aligned} \quad (3)$$

de donde, se puede obtener la fase usando la relación:

$$\phi(x, y) = \arctg \left[\frac{I(x, y, 3\pi/2) - I(x, y, \pi/2)}{I(x, y, 0) - I(x, y, \pi)} \right] \quad (4)$$

Ahora bien, si

$$\begin{aligned} I(x, y, 0) &= I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos[\phi(x, y) + \alpha] \\ e \\ I'(x, y, 0) &= I'_0(x, y) + I'_1(x, y) \cos[\phi(x, y) + \Delta\phi(x, y)] \end{aligned} \quad (5)$$

son las intensidades en el punto (x,y) del iterferograma antes y después de la perturbación, donde $\phi(x, y)$ es la fase relativa entre las ondas que interfieren antes de la perturbación, y $\Delta\phi(x, y)$ es el cambio de fase debido a la perturbación.

Los mapas de fase de los patrones de speckle antes de producir la perturbación en el objeto, vienen dados por la ec. (4) y después de producida la perturbación serán:

$$\begin{aligned} \phi(x, y) + \Delta\phi(x, y) = \\ \arctg \left[\frac{I'(x, y, 3\pi/2) - I'(x, y, \pi/2)}{I'(x, y, 0) - I'(x, y, \pi)} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

De esta expresión se pueden obtener los cambios de fase $\Delta\phi(x,y)$ producidos por la perturbación introducida.

En nuestro caso, la perturbación corresponde a las variaciones de temperatura en el interior del sólido transparente por la propagación de un frente de onda térmico.

Para introducir los saltos de fase, se desplaza una caña convenientemente calibrada, en el camino de haz de referencia.

II. DESCRIPCION DEL MODELO TÉRMICO

El modelo térmico bajo estudio es un sistema de aprovechamiento solar pasivo, formado por muro colector – acumulador y un ambiente o habitación que se desea calefaccionar. Para la construcción de este modelo a escala reducida se utiliza un bloque de material transparente, metacrílico de metilo (acrílico comercial), de 0,1000 x 0,0800 m² de sección transversal y de 0,0316 m de espesor. Este bloque simula el muro colector-acumulador del sistema energético y se le suministra un determinado flujo de calor constante a través de una de sus caras laterales mediante una placa calefactora. La cara lateral opuesta del bloque forma parte de un recinto de paredes de vidrio, que contiene agua, y que simula el ambiente a climatizar. Al otro lado de la placa calefactora se adosa un sistema idéntico al descrito. De esta manera, por simetría, el flujo de calor en el muro bajo estudio es la mitad del flujo total entregado por la placa calefactora. Un esquema del modelo descrito se muestra en la Figura 1.

El conjunto se aísla térmicamente con poliestireno expandido de 20 mm de espesor, salvo dos pequeñas ventanas en las caras laterales opuestas de los bloques, para permitir el pasaje de la luz láser, que permitirá el análisis del sistema a partir de técnicas ópticas.

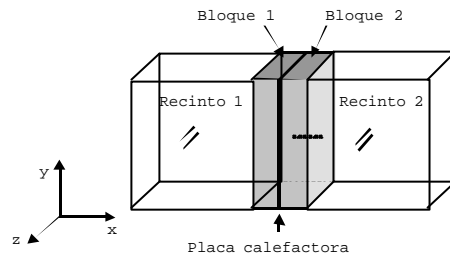


Figura 1. Esquema del modelo térmico analizado

A fin de disponer de datos para contrastar los resultados obtenidos por la técnica óptica, en uno de los muros se colocaron una serie de termocuplas equidistantes a lo largo del espesor del muro, para registrar las variaciones de temperatura en ambas caras del muro y en su interior.

Se simula la entrega de calor al muro colector acumulador con un pulso térmico, y se procura determinar el retardo térmico que tiene el sistema antes de entregar calor al recinto. La medida de este tiempo de retardo, es una información muy importante a la hora de establecer los parámetros de diseño del muro colector-acumulador, ya que en situación real de funcionamiento de este sistema de acumulación se desea que la entrega de calor se efectivice durante las horas de ausencia de energía solar, o sea durante la noche.

III. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El dispositivo experimental utilizado es un interferómetro de Mach Zehnder, como el que se muestra en la Figura 2. Un haz láser de He – Ne (632,8 nm) se divide en amplitud mediante el divisor de haz DH₁. De esta manera se obtienen los dos brazos del interferómetro: uno de ellos corresponde al haz de referencia y el otro al haz objeto, en el cual se coloca el modelo térmico descrito en la sección anterior. Cada uno de estos haces se hacen pasar por los filtros espaciales FE₁ y FE₂ y las lentes colimadoras L₁ y L₂, a fin de obtener haces paralelos. A la salida del modelo se coloca el difusor D₂, a partir del cual se obtiene un patrón

de speckle que se correlaciona con el patrón de speckle generado por el difusor D_1 , colocado en el haz de referencia. Estos patrones de speckle se reúnen nuevamente, mediante un segundo divisor de haz DH_2 , e interfieren en un sensor CCD (768×572 píxeles²) que captura los interferogramas correspondientes a los diferentes estados del sistema. Se utiliza un objetivo diafragmado a $f/4$ lo que produce un tamaño de grano de speckle adecuado. La relación de haces referencia/objeto es aproximadamente 3:1, con lo que se logra buena definición y contraste de las franjas de correlación de speckle.

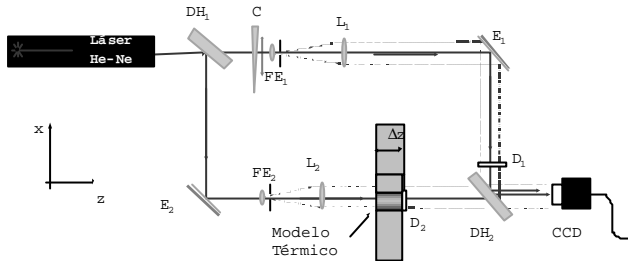


Figura 2. dispositivo experimental.

Corrimientos de fase

Para introducir los saltos de fase constante se coloca en el brazo del haz de referencia una cuña construida con vidrios de calidad holográfica rellena con aceite de bálsamo de Canadá. La misma se encuentra montada en un sistema microposicionador controlado por computadora que se desplaza en forma perpendicular al haz de referencia. Un esquema de este montaje se muestra en la Figura 3.

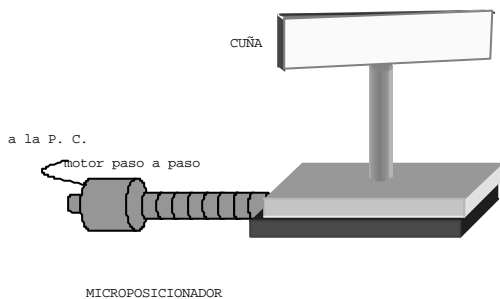


Figura 3. Esquema del sistema utilizado para producir los corrimientos de fase correspondientes.

La calibración de este sistema se realiza en el interferómetro. Para ello, se registran los cambios de fase que introduce la cuña en función de la posición del punto de incidencia del haz de referencia, mediante un fotomultiplicador colocado a la salida del interferómetro. La señales obtenidas son procesadas desarrollando la fase por el método de la Transformada de Fourier. La curva de calibración utilizada en esta experiencia se muestra en la Figura 4. Esta curva es un promedio de la fase de cinco señales, registradas para la misma región de la cuña y corresponde a un ciclo de las variaciones de fase introducidas.

El desplazamiento de la cuña se sincroniza con el registro de las imágenes en los distintos estados del sistema, para producir saltos de fase constantes de $\pi/2$, desplazando automáticamente la cuña, a determinadas posiciones con un error de $\pm 1 \mu\text{m}$, dado

por el microposicionador. Una vez posicionada la cuña, la fluctuaciones aleatorias de la fase introducen un error que ha sido estimado en un 0,5%.

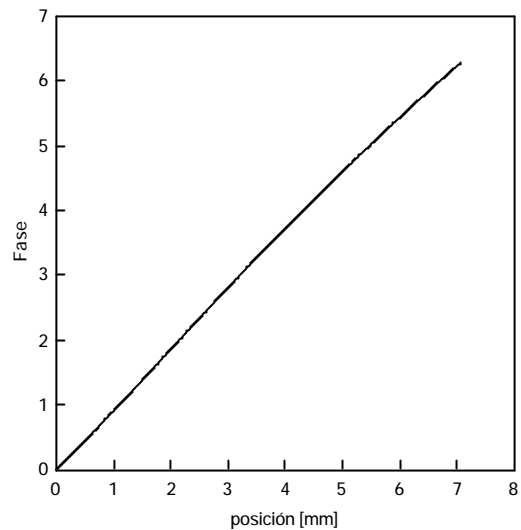


Figura 4. Curva de calibración de la cuña.

V. MEDIDAS TÉRMICAS

Para analizar térmicamente el comportamiento del sistema, se entrega un pulso de calor al sistema (10 minutos de duración) y se registran las variaciones de temperatura de las caras caliente y fría del muro como así también en el interior del mismo mediante una serie de termocuplas introducidas en el muro testigo (bloque 2 de la Figura1). La evolución temporal de las temperaturas registradas por las termocuplas se muestra en la Figura 5.

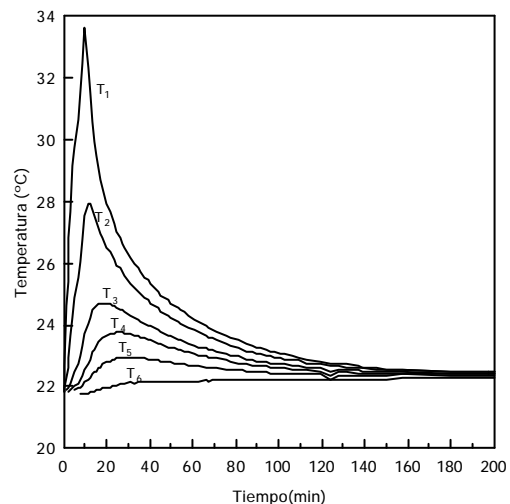


Figura 5. Variaciones de temperatura en interior del modelo de muro.

De estas curvas puede observarse que el frente térmico alcanza la cara fría en un tiempo aproximado de 12 minutos, comenzando a elevar su temperatura. Al final del tiempo de registro el interior del muro y las caras del mismo alcanzan una temperatura uniforme.

La distribución de temperaturas en el muro, para cuatro instantes de tiempo diferentes se muestra en la Figura 6. La línea de

puntos corresponde a la distribución de temperatura al momento de corte de suministro de energía a la placa calefactora.

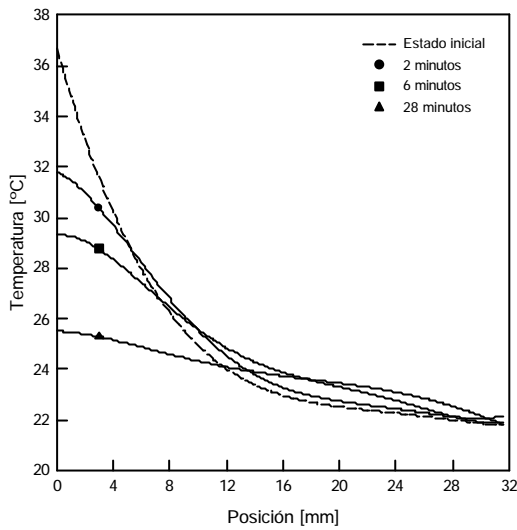


Figura 6. Distribución de temperatura en el muro en función de la posición.

Las diferencias de temperaturas en el interior del muro respecto del estado de referencia (línea punteada de la Figura 6), se muestran en la Figura 7.

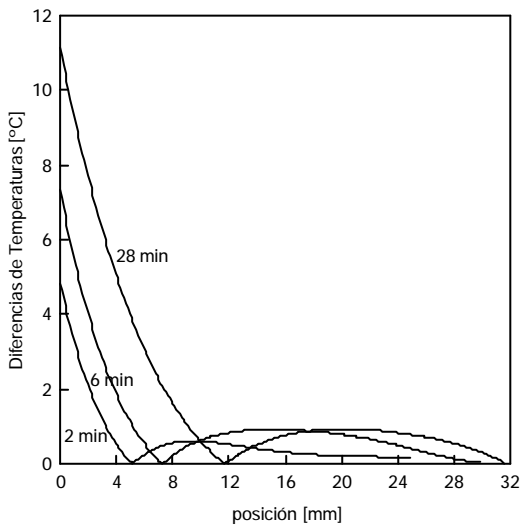


Figura 7. Diferencias de temperaturas, respecto al estado de referencia, en el interior del muro en los tiempos indicados.

Estas curvas evidencian un máximo de temperatura que se desplaza hacia la cara fría del muro en función del tiempo.

IV. MEDIDAS ÓPTICAS

Para visualizar la propagación del frente térmico, en el momento en que se desconecta el suministro de energía a la placa calefactora se registran cuatro interferogramas sucesivos del estado del sistema, con una diferencia de fase entre ellos de $\pi/2$. Estas imágenes constituyen el estado de referencia. Se procede de igual manera para registrar otros estados del sistema, a intervalos regulares de tiempo. Por el método de escalonamiento de fase para cuatro interferogramas con saltos de fase constante

se obtienen los mapas de fase correspondientes a estos estados. Cada uno de estos mapas de fase se restan del mapa de fase de referencia. En la Figura 8 se muestran tres de estos mapas de fase, para los tiempos indicados en los fotogramas.

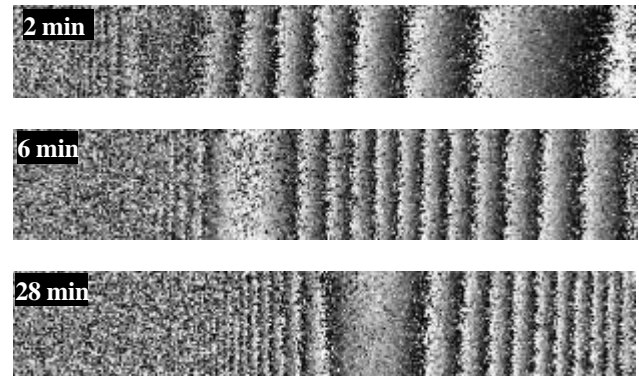


Figura 8. mapas de fase obtenidos por escalonamiento de fase para tres estados del sistema.

Los valores de fase de los mapas obtenidos se correlacionan con las diferencias de temperatura indicadas en la Figura 7.

En la Figura 9 se muestra la fase desenvuelta de estos mapas en comparación con las diferencias de temperatura medidas con termocuplas. La forma de estas curvas de fase desenvuelta se correlacionan adecuadamente con las curvas obtenidas térmicamente. Es decir evidencian el desplazamiento de la máxima diferencia de temperatura, hacia la cara más fría del muro.

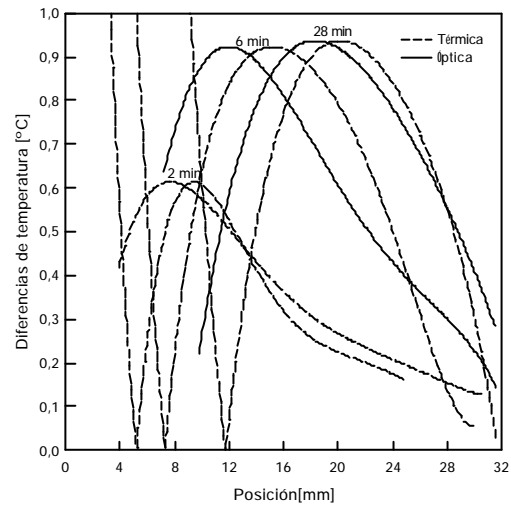


Figura 9: Curvas de diferencias de temperatura correspondientes a los fotogramas de la Figura 8.

Sistemáticamente las diferencias de temperatura medidas térmicamente se encuentran más desplazadas hacia la cara fría del muro que las ópticas. El defasaje espacial entre ambas mediciones se estima en un 16%. Esto puede deberse a que ambas determinaciones se realizaron en dos experimentos independientes. Para evitar este problema, se está construyendo un sistema de adquisición automática de temperatura que actuará simultáneamente con el registro óptico.

VI. CONCLUSIONES

Se ha propuesto el uso de la técnica óptica de escalonamiento de fase para estudiar la propagación de un frente térmico en el interior de un modelo de muro colector-acumulador, información requerida para el dimensionamiento y diseño de este tipo de sistemas pasivos de acondicionamiento térmico de edificios. La técnica ha demostrado su factibilidad para este fin ya que concuerda con las mediciones térmicas, dentro los márgenes de error esperados. Como se ha indicado, el registro simultáneo de las medidas ópticas y térmicas, contribuirá a disminuir las discrepancias observadas. Sin embargo, es necesario aumentar la resolución a fin de medir gradientes de temperatura más elevados, lo que se conseguirá introduciendo un nuevo sensor CCD ya adquirido para este fin.

Agradecimientos.

Este trabajo ha sido financiado por el Consejo de Investigación y las Facultades de Ciencias Exactas, Ciencias Naturales, e Ingeniería de la Universidad Nacional de Salta.

Referencias

1. Casperson R. (1979) "*Experimental investigation of the Trombe wall passive solar energy system*". Proceeding of the 3th. National Passive Conference. International Solar Energy Society, pp 231-240, San Jose, California.
2. Yamaguci K. (1984) Experimental study of natural convection buildings. En Proceeding of the 9th. National Passive Conferenc., American Solar Energy. Ppp 501-506, Columbus, Ohio.
3. Alanís E., Romero G. y Martínez C. (1995). "*Interferometría Holográfica: Estudio de un fluido en convección natural*". En Anales de la Asociación Física Argentina Vol. 7, 32-35.
4. Torroba R. y Joenathan, C. Real "*Time refractive index measurements*". Lamp Series Report (LAMP/91/1), 1-10. (1991)
5. Alvarez, L., Alanís, E., Romero G. y Lesino, G. "*Determinación interferométrica de perfiles de temperatura en el interior de un muro colector-acumulador*" Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 15, pp 19 – 23, (2004).
6. Alanís E., Romero G. y Martinez C. "*Interferometric measurements of diffusion coefficients through a scanning laser beam*". *Opt. Eng.* **39**.3, 744-750. (2000).
7. Malacara, D., Servín, M., Malacara, J., in "*Interferogram analysis for optical testing*" Centro de Investigaciones en óptica A.C. León Mexico, Ed. Marcel Dekker, Inc. New Cork (1998).