

01178



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

7
2e1

**INTERFEROMETRÍA HOLOGRÁFICA
PARA VISUALIZACIÓN DE FLUJOS**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

(ENERGÉTICA)

presenta

Eduardo Rubio Cerda

Director: Dr. Miguel Ángel Porta Gándara

Co-director: Dr. Jaime Cervantes de Gortari

México, D.F. 1993



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

261856



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

A mi adorable esposa, por su comprensión y apoyo.

A la gracia y ternura de mis hijas Lilia, Socorro y Gabriela.

A mi padre.

A mi madre (q.e.p.d.).

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer el apoyo de Laura, Gilberto y José Luis Fernández, así como a todos los compañeros que contribuyeron de alguna forma a la terminación de este trabajo, y de manera muy especial a Miguel Ángel.

CONTENIDO

NOMENCLATURA	iii
RESUMEN	iv
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	4
3. MARCO TEÓRICO	10
3.1 Holografía.....	10
3.2 Interferometría holográfica con objetos fase.....	11
3.3 Interpretación de las franjas de interferometría holográfica.....	13
3.4 Relaciones termodinámicas	14
4. EQUIPO EXPERIMENTAL	17
4.1 Interferómetro holográfico.....	18
4.2 Cavidades experimentales.....	21
4.3 Controlador automático de temperatura	22
4.4 Equipo auxiliar de medición y registro.....	23
4.5 Accesorios de calibración y ajuste	24
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES	26
5.1 Visualización del flujo de calor de una superficie calentada con pérdidas al ambiente.....	26
5.2 Dinámica de flujo en el interior de una cavidad rectangular.....	30
5.3 Visualización del flujo en el interior de una cavidad triangular.....	34
5.4 Cavidad triangular con calentamiento en la parte inferior y paredes laterales a temperatura ambiente	35
5.4.1 Evolución de la pluma térmica	36
5.4.2 Inestabilidad de la pluma térmica para condiciones de calentamiento en el fondo y paredes laterales a temperatura ambiente	38
5.4.3 Condiciones en estado permanente de una cavidad triangular con calentamiento en la parte inferior y paredes a temperatura ambiente.....	40

5.5	Cavidad triangular con calentamiento en la parte inferior y paredes laterales a diferente temperatura	41
5.5.1	Evolución de la pluma térmica para una cavidad triangular con calentamiento en la base y paredes a diferente temperatura	42
5.5.2	Inestabilidad de la pluma térmica para una cavidad triangular bajo condiciones de calentamiento en el fondo y paredes a diferente temperatura.	45
5.5.3	Comportamiento de la pluma térmica para una cavidad triangular con calentamiento no uniforme en estado permanente.....	48
6.	CONCLUSIONES.....	51
	BIBLIOGRAFÍA.....	54
A.	PROCEDIMIENTO DE REVELADO DE LA PLACA HOLOGRÁFICA.....	57
B.	DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN Y CONTROL DISEÑADOS PARA LOS EXPERIMENTOS	60
B1.	Controlador automático de temperatura	60
B2.	Medidor de intensidad luminosa	60
B3.	Obturador automático	61

NOMENCLATURA

U	Amplitud compleja de la onda de luz.
a	Amplitud real de la onda de luz.
ϕ	Fase de la onda de luz.
f	Frecuencia de la onda de luz.
I	Irradiación.
t	Transmitancia del medio.
β	Constante de proporcionalidad de la película holográfica.
λ	Longitud de onda.
Φ	Longitud de la trayectoria óptica del rayo.
n	Índice de refracción del medio.
K	Constante de Gladstone-Dale.
k_i	Constante de Gladstone-Dale de la i -ésima componente.
ρ	Densidad.
M	Peso molecular del gas.
P	Presión del gas.
R	Constante universal de los gases (8.3143 J/mol K).
T	Temperatura absoluta (K).

RESUMEN

El propósito de esta tesis es proporcionar a la comunidad interesada en el estudio de la dinámica de gases una recopilación de experiencias que permitan una comprensión introductoria, teórica y práctica, de una de las herramientas más recientes que se utilizan para la caracterización de flujos. Esta herramienta llamada interferometría holográfica utiliza los conceptos más modernos de óptica y de los fenómenos de interferencia de la luz para posibilitar las observaciones de campos de densidad variable en diferentes modelos experimentales que permiten la determinación de los patrones de flujo del medio bajo estudio.

Además, en este trabajo se muestra la factibilidad de la construcción de un equipo de esta naturaleza sin el uso de componentes ópticos de alta calidad y a un bajo costo, así como su aplicabilidad al estudio de fenómenos de transferencia de calor como una herramienta no intrusiva capaz de proporcionar resultados únicos, difíciles de conseguir mediante las técnicas tradicionales de medición y análisis de flujos.

El medio que se ha seleccionado para realizar este trabajo es el aire en condiciones de flujo abierto y en confinamiento en cavidades. Para llevar a cabo los experimentos que aquí se describen se ha desarrollado un interferómetro holográfico del tipo fuera de eje (*off-axis*) con componentes ópticos de mediana calidad y el uso de placas holográficas rígidas. Las técnicas de registro de los interferogramas se valen de herramientas modernas computacionales como son el uso de una computadora con una tarjeta digitalizadora de vídeo para la captura de las imágenes. La calidad de las imágenes capturadas se ha mejorado con la ayuda de paquetería especializada que permite resaltar los detalles que se consideran de mayor interés para los propósitos de este trabajo.

Para obtener los resultados que se presentan, se han construido modelos de cavidades de cristal transparente con forma triangular y rectangular, así como un dispositivo experimental para el control de las temperaturas en el interior de las cavidades. Este último consiste en un control automático que permite mantener la temperatura deseada en los modelos de acuerdo a la naturaleza de los experimentos, permitiendo la visualización y medición de los flujos bajo estudio en condiciones controladas.

El trabajo se aborda mediante un análisis bibliográfico que refleja la gran diversidad de áreas en las que se aplican estos equipos, así como la variedad de objetivos que se persiguen, poniendo mayor énfasis en aquellos que por la originalidad de sus resultados merecen una mayor atención.

Se describe la metodología experimental utilizada para llevar a cabo los experimentos en donde se incluyen los modelos y las técnicas utilizadas. Se hace un análisis de los patrones de interferencia bajo condiciones de desprendimiento de calor al ambiente y de los patrones térmicos generados en el interior de las cavidades.

A partir de mediciones con termopares y con la ayuda del interferograma, se ha caracterizado el patrón isotérmico generado para el caso de desprendimiento de calor al ambiente, determinando los valores de la temperatura para todo el campo estudiado. Se presentan algunas gráficas de distribución espacial de las isoterms, así como de temperaturas obtenidas del análisis de los registros. Se aborda brevemente un análisis del comportamiento inestable observado en el desprendimiento de calor en el interior de las cavidades.

Se incluyen los fundamentos teóricos del fenómeno en el que se apoya esta técnica para aquellos que quieran profundizar en los aspectos físicos y matemáticos de la interferometría holográfica del tipo utilizado en este trabajo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La llegada de métodos numéricos sofisticados apoyados en tecnologías computacionales ha reforzado enormemente las técnicas tradicionales utilizadas en la caracterización de flujos. Las mediciones arrojadas por dichas técnicas contribuyen a mejorar el entendimiento de los procesos físicos involucrados en sistemas de flujos, particularmente en flujos turbulentos y tridimensionales, lo que permite vislumbrar mejores soluciones a problemas derivados de una gran variedad de aplicaciones industriales.

Dentro de los parámetros que son de gran interés en el estudio de flujos, se encuentran la magnitud de la velocidad instantánea, el vector velocidad, correlaciones temporales y espaciales, esfuerzos cortantes, flujos térmicos, así como las características globales cualitativas de flujos de masa y volumen. Para lograr el estudio de estos parámetros, constantemente se tienen variaciones en la instrumentación clásica utilizada, así como el surgimiento de nuevas técnicas que abren posibilidades de estudio novedosas.

La instrumentación se vale de dispositivos diferenciales para medir la presión, así como para medir la velocidad; los sistemas de hilo caliente y de película caliente que han sido usados por más de 50 años en la medición local de la velocidad, así como los flujómetros magnéticos y acústicos, entre otros. Grandes aportaciones ha hecho a la ciencia el surgimiento de métodos no intrusivos de medición basados en técnicas ópticas como lo son la velocimetría láser que fue utilizada desde mediados de los sesentas, así como las novedosas técnicas interferométricas de Schlieren, Shadowgraph, el interferómetro de Mach-Zehnder y más recientemente la interferometría holográfica.

Técnicas ópticas para la medición de flujos incluyen la visualización directa, en donde algún tipo de trazador se utiliza para seguir el movimiento del fluido; los sistemas láser-Doppler en donde se mide el cambio en la frecuencia de la luz dispersa por marcadores; y los métodos en donde se mide el índice de refracción o alguna de sus derivadas espaciales a partir de las cuales se determinan las propiedades del fluido.

Una de estas técnicas es el método Shadowgraph, que se utiliza para obtener la variación de la segunda derivada (normal al rayo de luz) del índice de refracción. Con el sistema Schlieren, la primera derivada del índice de refracción (en dirección normal al rayo de luz) es la que determina las características de los patrones de luz. Los interferómetros responden directamente a las diferencias en la longitud de la trayectoria óptica proporcionando el campo del índice de refracción del fluido.

Las técnicas interferométricas son muy valiosas cuando se trata de visualizar flujos en los cuales se tienen diferencias en la densidad de manera natural o artificialmente inducidas. Cuando se usan cuantitativamente, estas técnicas pueden ser utilizadas para determinar variaciones en la densidad, presión o temperatura en el fluido, y a partir de éstas, se pueden llegar a conocer algunas de las características del flujo, como son la naturaleza laminar o turbulenta del movimiento, el grosor de la capa límite, los ángulos de choque, los puntos de separación y de unión, entre otras.

Debido a que las técnicas interferométricas son métodos integrales, esto es, integran la cantidad medida a lo largo de la trayectoria del rayo, son más adecuadas para medir campos bidimensionales en donde no hay variación en la densidad o el índice de refracción en el campo a lo largo del rayo de luz, excepto en la entrada y en la salida de la sección de prueba. A pesar de esto, es posible utilizar estos métodos para estudiar campos con simetría axial en donde se puede determinar un promedio del parámetro bajo medición.

De la incursión del uso de los hologramas en los interferómetros surge la interferometría holográfica, que fue iniciada poco después de la introducción de la holografía fuera de eje (*off-axis*) por Leith y Upatnieks en 1961. La teoría básica, la práctica y el futuro potencial del método fueron presentados por Powell y Tetson, Burch y Heflinger, Wuerker y Brooks. Después de esta etapa surgió una gran actividad, en donde algunos autores llegaron a sugerir que la interferometría holográfica era vista como la panacea para los problemas de ingeniería y de la metrología científica. La actividad disminuyó conforme se fueron encontrando las limitaciones prácticas del método.

Gracias a la interferometría holográfica es posible producir y registrar holográficamente imágenes consistentes en un patrón de franjas que son un indicativo de los cambios en el índice de refracción del medio. Este tipo de interferometría es posible debido a que la luz que pasa por el medio puede ser

registrada y reproducida con tal precisión que se puede comparar interferométricamente con la luz obtenida del mismo medio en otro instante de tiempo. Esto es, puede ser comparada interferométricamente con una segunda reconstrucción holográfica.

La interferometría holográfica se define como la comparación interferométrica de dos o más ondas, donde al menos una de ellas ha sido holográficamente reconstruida, y a la composición de estas ondas se le llama interferograma holográfico. El término interferograma implica un patrón de franjas de interferencia registradas en una película fotográfica, formadas en un sistema de observación bidimensional, o en la retina del ojo.

La aplicación de la interferometría holográfica fue sugerida primero por Horman, quien incluyó un holograma en un interferómetro de Mach-Zehnder. Los desarrollos de la interferometría holográfica de doble exposición, y en tiempo real, ocurrieron independientemente en varios laboratorios durante 1965. A la última, en tiempo real, se dedica buena parte de este trabajo. En ésta, la luz que pasa por un medio, interfiere con un rayo de luz reconstruido holográficamente. Esto se logra con un sistema holográfico del tipo fuera de eje. Se hace una sola exposición holográfica del medio bajo prueba en su condición estática inicial. Luego, la placa fotográfica se retira del aparato, se procesa, se seca y se regresa a su posición original en el sistema holográfico. Si el rayo del láser incide sobre el holograma revelado, este último será iluminado simultáneamente por la onda de referencia y la onda de luz que pasa por la sección de prueba. Un observador que mira a través del holograma recibirá luz tanto de la imagen virtual reproducida por el holograma, como por el patrón producido por el estado actual de la sección de prueba. Estas dos ondas formarán un patrón de interferencia si el medio ha sufrido variación con respecto a su estado inicial. Si el medio se ve alterado durante la reconstrucción, se verá un patrón de franjas cuya forma varía de acuerdo a la naturaleza de los cambios inducidos.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

La literatura revisada sobre instrumentos utilizados para interferometría holográfica, muestra la existencia de una gran variedad de equipos que utilizan los registros holográficos como elementos útiles en investigaciones relativas al estudio de fenómenos de transporte de calor y masa. Entre ellos se han encontrado interferómetros del tipo que utilizan dos rayos de luz láser obtenidos a partir de una sola fuente, estos rayos inciden sobre una placa holográfica en donde se registran los patrones de interferencia representativos del medio bajo estudio. La fuente luminosa utilizada en algunas aplicaciones tiene la característica de ser monocromática, esto es, se emite a una sola longitud de onda, pero se han encontrado variaciones de estos equipos implementados con una fuente de luz de doble longitud de onda, así como aquellos que tienen propiedades multicolor.

Muchos de los interferómetros se utilizan en experimentos en condiciones en tiempo real para el análisis de la evolución de alguna propiedad característica del medio, pero también existen aquellos en los que se obtiene un registro estático en un holograma, que contiene las condiciones de interés de los modelos en estudio, y posteriormente se hace un análisis detallado de los resultados, mediante la reproducción del patrón de interferencia al exponer el holograma al rayo de referencia del interferómetro.

Los estudios que no se realizan en tiempo real se logran gracias a una doble exposición de la placa holográfica. Durante la primera exposición se registra el patrón de interferencia de la sección de prueba sin inducir perturbaciones en el medio, mientras que durante la segunda exposición se sobrepone el patrón de interferencia con el campo perturbado sobre el patrón de interferencia inicial. El revelado de la placa se realiza después de la segunda exposición, con lo que se logra un registro estático que corresponde a las condiciones de estudio establecidas en el momento de la segunda exposición.

En las aplicaciones en tiempo real, la placa holográfica se expone al patrón de interferencia producido por el campo sin inducir perturbación alguna y se revela, con lo que queda registrado un patrón de referencia, después se coloca la placa en el lugar en el que se hizo la primera exposición, y se aplica la perturbación a la sección de prueba. La superposición de los patrones de

interferencia del campo sin perturbar, que ha sido registrado en la placa holográfica, y la del campo perturbado, genera un interferograma que cambia su forma conforme varían las condiciones aplicadas a la sección de prueba, permitiendo así realizar estudios de tipo transitorio. Una de las ventajas con respecto al interferómetro de doble exposición, es que la placa holográfica se puede ajustar para obtener el patrón de interferencia con franjas de referencia o en la modalidad de franja infinita.

Como podrá concluirse, en el caso de las aplicaciones en tiempo real, para mantener un registro de los interferogramas, se tendrá que hacer uso de equipo auxiliar, que puede incluir cámaras fotográficas, cámaras de vídeo, digitalizadores de imágenes, entre otros.

Los estudios de campos de densidad o temperatura se realizan utilizando diferentes medios, por ejemplo, se ha encontrado que hay un gran número de investigaciones de fenómenos de transferencia de calor en condiciones de convección natural y forzada, tanto en aire confinado en cavidades, como en condiciones de flujo abierto. Entre estos se encuentran gases en movimiento a baja y alta velocidad, flujos de aire a alta velocidad, mezclas aire-gas, mezclas aire-vapor y capas de aire bajo diferentes condiciones cada una de ellas. De igual forma, los modelos experimentales utilizados adoptan una variada gama de formas y naturalezas, entre ellos se encuentran cilindros huecos orientados horizontalmente, arcos producidos por interruptores eléctricos de alto voltaje, quemadores de hornos, tubos rectangulares, aspas de abanicos, intercambiadores de calor, turbomaquinaria, canales orientados verticalmente, e incluso se utilizan como modelos a los combustibles líquidos y plasmas, a los que se les introduce aire como trazador para posibilitar el seguimiento de los cambios que sufre el plasma al desplazarse.

Las mediciones que se realizan se centran en aquellos parámetros que son capaces de inducir un cambio en alguna de las propiedades termodinámicas del medio, como por ejemplo la densidad. Esto hace posible el estudio, y la literatura así lo demuestra, de propiedades de fluidos como son la distribución de densidades y velocidades de desplazamiento, visualización de flujos en líquidos y gases, propiedades de transferencia de calor en convección libre, caracterización de los gradientes térmicos presentes en el medio, perfiles de temperatura en la sección de la capa límite, concentración de impurezas y densidad radial, estudios de turbulencia, visualización de flujos, estudios de

convección mezclada, evolución en tiempo real de ondas de choque y calibración de flujos.

La interferometría holográfica no deja de ser una herramienta indispensable en la realización de estudios bidimensionales, sino también de tipo tridimensional. Existe una gran cantidad de citas sobre estudios de transferencia de calor y masa que utilizan esta herramienta para descubrir y estudiar los mecanismos térmicos que se presentan en la naturaleza, tratando de aprovecharlos de la forma más adecuada. A manera de apreciar la variedad que se puede esperar en este tema se pueden citar dentro de la literatura estudios como el realizado por **Piliniyi y Tanos (1977)** utilizando un interferómetro de doble exposición para el estudio de plasmas magneto-hidrodinámicos como es el caso de argón con temperaturas de 1000 a 3000 K; la medición de las propiedades de transferencia de calor por convección natural alrededor de un cilindro horizontal calentado por **Diez G. et al. (1981)**; el estudio del grosor de la capa límite térmica, así como los gradientes térmicos encontrados en la vecindad de una placa vertical calentada mediante la toma de hologramas para estudios tridimensionales. Llama la atención la caracterización de los campos de densidad en flujos de gas a velocidades de 5500 metros por segundo como el realizado por **Burner en 1973**.

Las aplicaciones anteriores se pueden considerar comunes, ya que existe un gran número de citas reportando experimentos con placas y tubos calentados, así como el estudio de ondas de choque producidos por gases a alta velocidad, sin embargo, es posible encontrar aplicaciones que no son tan comunes y que arrojan resultados reveladores y únicos; de estos últimos se puede citar el estudio reportado por **Kashiwagi et al. (1982)** referente a los mecanismos de ignición de un combustible líquido por excitación continua con un rayo láser. En este estudio se describe el comportamiento del combustible cerca de la interfase líquido-aire durante la irradiación con energía incidente de 260 a 2500 W/cm², también se reporta la distribución en la concentración de la temperatura y del vapor en la fase gaseosa. El fenómeno de ignición se reporta como un proceso en el que se forma una onda radial, una depresión superficial central, nucleación con ebullición seguido por un movimiento superficial complejo y posteriormente por más ebullición. La secuencia de eventos que suceden lleva a que predomine el ciclo de ebullición con un incremento en la concentración de oxígeno con la presencia de dos etapas de reacción química en la fase gaseosa, y finalmente la aparición de la primera emisión visible.

Witte y Matthews (1971), reportan un estudio de caracterización de gradientes térmicos y turbulencia en flamas, cuyo objetivo es estudiar la relación existente entre las características básicas de la flama y la generación de emisiones, particularmente monóxido de nitrógeno que se forma y se fija en la zona principal de combustión. Se encontró que la estructura de la flama es extremadamente turbulenta lo que hizo imposible resolver el patrón de franjas en la línea central del quemador.

Un estudio realizado por **Nomura *et al.* (1989)** sobre las características de transferencia de calor en la superficie de una película de agua en evaporación, sujeta a una corriente de vapor supercalentado, se compara con el comportamiento esperado en aire por medio de interferometría holográfica en tiempo real. La situación considera un flujo laminar de vapor o aire sobre una superficie de agua en condiciones de evaporación adiabáticas. Se encontró que los perfiles de temperatura en la capa límite térmica del vapor y el aire son diferentes debido a que el vapor supercalentado es realmente un gas con participación radiante.

El estudio del comportamiento térmico encontrado en el interior de cavidades ha cobrado gran importancia en los últimos años. Se encuentran estudios realizados en cavidades rectangulares y triangulares con muy variadas relaciones de aspecto. La literatura revisada muestra una amplia variedad de trabajos que utilizan interferómetros de naturaleza diferente a los que se utilizó para la preparación de este trabajo, como son aquellos de tipo Mach-Zehnder, Schlieren, y los del tipo que utilizan un prisma de Wollastom. No se encontraron muchas referencias en las que se utilizara la interferometría holográfica aplicada al estudio en el interior de cavidades.

Se pueden citar trabajos como el realizado por **Sernas *et al.* (1975)**, quienes interesados en los fenómenos de transferencia de calor en cavidades como las que se encuentran en paredes huecas, ventanas dobles y en el interior de edificios, realizaron un estudio interferométrico de convección natural en una cavidad rectangular con una relación de aspecto menor a uno. Para este estudio se utilizó un interferómetro de tipo Schlieren con prisma Wollastom y se utilizó este instrumento para reportar datos de transferencia de calor en régimen laminar para el interior del modelo.

Hamady *et al.* (1994), realizaron un estudio en una cavidad con sección transversal cuadrada de 5.08 X 5.08 cm en movimiento, diferencialmente calentada para comparar los resultados con el caso sin movimiento, ya que

ésta es considerada la geometría estándar para este tipo de estudios y se pretende analizar las fuerzas adicionales que se incorporan debido al movimiento. Se valen de un interferómetro tipo Mach-Zehnder con el que se define el campo de temperaturas del modelo para obtener los resultados de los números de Nusselt medios y locales. Al comparar los resultados de los interferogramas obtenidos con el caso numérico analizado en este trabajo bajo condiciones similares, se encuentra que se correlacionan muy favorablemente, además de que las observaciones revelan una tendencia a inhibir la convección longitudinal con forma de celdas.

Baum y Bairamov (1964), utilizaron un modelo de destilador solar del tipo de condensador de una pendiente y realizaron un estudio para caracterizar el movimiento del medio agua-vapor, así como los procesos de transferencia de calor y masa en el interior de la cavidad bajo condiciones de estado permanente. Se reporta en este trabajo el uso de un calentador eléctrico para aumentar la temperatura del agua y se presenta la imagen de un interferograma del cual se concluye la existencia de una capa límite delgada (tanto en la superficie condensadora como en la evaporadora) con espesor de varios milímetros a varios centímetros. Además, se encuentra que esta capa límite circulante es el único factor sustancial que toma parte en los procesos de transferencia de calor y masa, mientras que el resto del volumen no participa. Cabe destacar que en este trabajo no se describe la naturaleza del interferómetro utilizado, ni se menciona explícitamente su uso para la obtención del interferograma mostrado. De igual forma, la imagen presentada no muestra tan claramente la capa límite en la superficie del agua, a diferencia de como se aprecia en el vidrio condensador.

Otros autores han utilizado interferómetros de Mach-Zehnder para diversos estudios experimentales. **Viskanta y Behnia (1982)**, realizaron un estudio de convección natural inestable de una capa de agua calentada desde abajo, empleando un modelo de turbulencia κ - ϵ para la predicción del flujo. **Lewis et al. (1982)** simulaban experimentalmente los efectos que inducen o inhiben el desarrollo de la capa de mezcla en un sistema termohalino y realizaron experimentos de visualización con este equipo. Se obtienen concentraciones de sal y distribuciones de densidad de masa en las regiones estables de la solución. Ambos trabajos hacen uso de un microscopio vernier de precisión para analizar los interferogramas obtenidos.

Dentro de los pocos trabajos que reportan el uso de un interferómetro holográfico para el estudio de cavidades se encuentra el de **Peterson (1985)**

quien trata ampliamente el fenómeno de la condensación en mezclas binarias de gases. Su trabajo hace notar que la transferencia de calor por condensación ofrece uno de los medios más efectivos de transporte de energía, sin embargo, existen en el sistema gases no condensables que reducen la eficiencia de los procesos de transferencia. En este trabajo se muestra, mediante la interferometría holográfica, el potencial de los patrones de recirculación de una mezcla binaria de gas en una cavidad vertical de placas paralelas. Los interferogramas muestran el comportamiento isotérmico para el caso en el que se tiene una mezcla de gas no condensable y vapor de agua.

En este trabajo se comparan los resultados para cuando el gas tiene un peso molecular mayor y menor que el del vapor de agua, mostrando claramente el confinamiento que sufre el gas cuando el peso molecular de éste es menor que el del vapor de agua, evitando así los efectos de la condensación en la región ocupada por el gas no condensable. Aquí se demuestra que la interferometría holográfica arroja buenos resultados aún para flujos altamente inestables y periódicos, mencionando además la dificultad de conseguir suficientes franjas en el rango de baja densidad para números de Rayleigh bajos en donde las bifurcaciones más interesantes ocurren.

La interferometría holográfica es sin duda una herramienta que ha demostrado ser de gran utilidad por lo que se ha extendido considerablemente. Día a día se encuentran resultados novedosos a la par de la evolución de esta herramienta que se da de una manera muy acelerada para la que se encuentran nuevas aplicaciones y usos.

CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO

3.1 Holografía

La holografía fuera de eje, desarrollada por Leith y Upatnieks, se usa en interferometría holográfica. Este esquema posibilita la separación espacial de las tres ondas producidas por la difracción durante el proceso de reconstrucción. Está basado en un procedimiento usado en teoría de comunicaciones llamado codificación y decodificación de señales por modulación de una onda portadora de alta frecuencia. La onda de referencia utilizada para el registro se propaga en diferente dirección angular de la onda objeto. Las amplitudes complejas en el plano de la película, $z=0$, son para la onda objeto:

$$U_o(x, y) = a_o(x, y) \exp[-i\phi_o(x, y)] \quad (1)$$

y para la onda de referencia:

$$U_r(x, y) = a_r \exp(i2\pi f_y y) \quad (2)$$

donde $f_y = \sin \theta_R / \lambda$ es la frecuencia espacial de la onda de referencia. La radiación en el plano de la película es:

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |U_o + a_r \exp(i2\pi f_y y)|^2 \\ &= |U_o|^2 + a_r^2 + a_o U_o \exp(-i2\pi f_y y) \\ &\quad + a_o U_o^* \exp(i2\pi f_y y) \end{aligned} \quad (3)$$

La película se expone al patrón de radiación, ecuación (3), y se revela de modo que la amplitud de su transmitancia $t(x, y)$ es proporcional a $I(x, y)$:

$$t(x, y) = t_b + \beta[|U_o|^2 + a_r U_o \exp(-i2\pi f_y y) + a_r U_o^* \exp(i2\pi f_y y)] \quad (4)$$

Se sustituye la ecuación (1) y se combinan los términos exponenciales para obtener:

$$t(x, y) = t_b + \beta a_o^2(x, y) + 2\beta a_r a_o \cos[2\pi f_y y + \phi_o(x, y)] \quad (5)$$

Esta ecuación muestra que el holograma consiste en una serie de franjas de interferencia portadoras de la frecuencia espacial f_y que están moduladas en amplitud por $a_0(x,y)$ y en fase por $\phi(x,y)$.

Para reconstruir la onda objeto, el holograma se ilumina por una onda plana que viaja en la misma dirección que la onda de referencia original. Su amplitud compleja en el plano del holograma es:

$$U_c(x, y) = a_c \exp(i2\pi f_y y) \quad (6)$$

La amplitud compleja resultante de la luz a la derecha del holograma, $z=0+$, es:

$$U_I(x, y) = (t_h + \beta |U_o|^2) a_c \exp(i2\pi f_y y) + \beta a_{c,ar} U_o + \beta a_{c,ar} U_o^* \exp(i4\pi f_y y) \quad (7)$$

El primer término de la ecuación (7) representa una porción de la onda reconstructora que se transmite por el holograma con atenuación y alguna modulación en la radiación. El segundo término representa una onda difractada que es una réplica de la onda objeto original.

El tercer término en la ecuación (7) representa una onda que es el conjugado de la onda objeto original. Se propaga con un ángulo $-\sin^{-1}(2f_y)$ con respecto al eje z.

3.2 Interferometría holográfica con objetos fase

Considerando la interferometría holográfica de objetos fase usando una onda plana, en el objeto fase, la distribución del índice de refracción es $n_1(x,y,z)$ durante la exposición holográfica inicial y $n_2(x,y,z)$ durante la segunda exposición. Cuando el holograma se revela y se ilumina con la onda de referencia, se reconstruyen dos ondas simultáneamente:

$$U_{01} = a_1(x, y) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \phi_1(x, y)\right] \quad (8)$$

y

$$U_{02} = a_2(x, y) \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \phi_2(x, y)\right] \quad (9)$$

donde la longitud de la trayectoria óptica del rayo a través del medio es:

$$\Phi(x, y) = \int n(x, y, z) dz \quad (10)$$

El patrón de franjas es la radiación de la suma de U_{01} y U_{02} en el plano de la imagen. Suponiendo por simplicidad que a_1 y a_2 son uniformes, de amplitud unitaria, se puede escribir esta radiación como:

$$I(x, y) = 2 \left\{ 1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} [\Phi_2(x, y) - \Phi_1(x, y)] \right\} \quad (11)$$

En la mayoría de las aplicaciones el índice de refracción durante la primera exposición es uniforme y se puede denotar por n_0 , entonces el patrón de franjas es:

$$I(x, y) = 2 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta\Phi(x, y) \right) \right] \quad (12)$$

donde la diferencia en la longitud de la trayectoria óptica es:

$$\Delta\Phi(x, y) = \int [n(x, y, z) - n_0] dz \quad (13)$$

La ecuación de una franja brillante es:

$$\Delta\Phi(x, y) = \int [n(x, y, z) - n_0] dz = N\lambda \quad (14)$$

Si el objeto tiene una variación del índice de refracción sólo en la dirección "y", la diferencia en la trayectoria óptica se simplifica:

$$\Delta\Phi(y) = [n(y) - n_0] l \quad (15)$$

donde l es la longitud del objeto. El espaciamiento entre las franjas se determina por el gradiente de n . Para un espaciamiento lineal como:

$$n(y) = n_0 + n' y \quad (16)$$

Con esta última ecuación se obtendrá una serie de franjas paralelas igualmente espaciadas, en donde:

$$y = \frac{N\lambda}{n'} , N = 0,1,2,\dots \quad (17)$$

Si el espaciamento tiene la forma:

$$n(y) = n_0 - n_1 \exp(-ay) \quad (18)$$

se tendrá una distribución de franjas similar a la que ocurre en la medición de capas límite térmicas, en donde las franjas son líneas paralelas con espaciamento variable. El espaciamento es grande en regiones de pequeño gradiente y pequeña en regiones de gradientes mayores.

El interferograma descrito en la ecuación (12) es llamado interferograma de franja infinita. Este término implica que resulta un campo de radiación uniforme, esto es, una franja infinitamente ancha cuando $\Delta\Phi(x,y)=0$. Este tipo de interferograma muestra contornos de valor constante de $\Delta\Phi(x,y)$ cuando se interpretan las franjas, no es claro si la trayectoria óptica aumenta o disminuye de una franja a la siguiente, esta ambigüedad se puede resolver introduciendo franjas de referencia en el interferograma. Estas franjas son en su mayoría, franjas de referencia rectas, paralelas, con espaciamentos iguales que corresponden a un gradiente constante de signo conocido. El interferograma resultante se llama interferograma de franja infinita y es muy común su uso en interferometría clásica.

Las franjas de referencia se introducen girando el rayo objeto un pequeño ángulo $\Delta\beta_0$ entre las exposiciones de un holograma de doble exposición. El interferograma resultante tiene una distribución de radiación dada por:

$$I(x, y) = 2\{1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} [\Delta\Phi(x, y) + \Delta\beta_0 y]\} \quad (19)$$

3.3 Interpretación de las franjas de interferometría holográfica

Considerando que los medios transparentes son tratados como objetos fase, esto es, los rayos son líneas rectas, no existe refracción y la diferencia en la longitud de la trayectoria óptica de un rayo que viaja en la dirección "z" a través del objeto fase está dada por:

$$\Delta\Phi(x, y) = \int [n(x, y, z) - n_0] dz = N\lambda \quad (20)$$

n_0 es el índice de refracción al momento de la exposición inicial y es generalmente una constante, y $n(x,y,z)$ es la distribución del índice de refracción al momento de la segunda exposición. La evaluación de un interferograma consiste en determinar $\Delta\Phi$ a partir del patrón de franjas e invertir la ecuación (20) para calcular $n(x,y,z)-n_0$.

Es posible medir $\Delta\Phi$ en unidades de longitud de onda λ asignando un orden numérico a las franjas. El número $N=0$ se asigna a la franja brillante más grande en el ambiente de gas no perturbado. Los centros de las franjas brillantes subsecuentes son asignados con números $n=1,2,3,\dots$ consecutivamente. Los centros de las franjas oscuras son asignados con los números $N=0.2, 1.5, 2.5, 3.5, \dots$ etc. En cualquier lugar la diferencia en la longitud de la trayectoria óptica es:

$$\Delta\Phi = N\lambda \quad (21)$$

Una vez que $\Delta\Phi$ se ha evaluado para un interferograma, la ecuación (20) debe ser invertida para determinar $n(x,y,z)-n_0$.

Para un objeto bidimensional, con longitud L en la dirección z , que es la dirección de la propagación de la onda objeto, el cambio desconocido en el índice de refracción es función solamente de " x " y " y ", de modo que la ecuación (20) se simplifica:

$$\lambda N(x, y) = \int_0^L [n(x, y) - n_0] dz = [n(x, y) - n_0] L \quad (22)$$

por lo tanto:

$$n(x, y) - n_0 = N(x, y) \frac{\lambda}{L} \quad (23)$$

Esta relación es útil ya que en muchos casos los campos estudiados para fines prácticos son considerados bidimensionales.

3.4 Relaciones termodinámicas

La interferometría es utilizada para determinar la distribución en la densidad de un gas. La densidad, denotada por ρ se relaciona con el índice de refracción del gas por la ecuación de Gladstone-Dale:

$$n - 1 = K\rho \quad (24)$$

donde K es la constante de Gladstone-Dale y es una propiedad del gas. Ésta es una función débil de la longitud de onda de la luz y es casi independiente de la temperatura y de la presión bajo condiciones físicas moderadas. La constante de Gladstone-Dale para una mezcla de gases se puede calcular como un promedio de masas de valores de K para los gases componentes:

$$K = \sum_i a_i k_i, \dots \quad (25)$$

donde a_i es la fracción másica, y K_i la constante de Gladstone-Dale de la i -ésima componente.

En la mayoría de los casos la densidad de un gas se puede calcular utilizando la ecuación de estado de los gases ideales:

$$\rho = \frac{MP}{RT} \quad (26)$$

donde $P(\text{Pa})$ es la presión, M es el peso molecular del gas, $R=8.3143 \text{ J/mol K}$ es la constante universal de los gases y $T (\text{K})$ es la temperatura absoluta. Combinando la ecuación (24) y (26) se tiene:

$$n - 1 = \frac{KMP}{RT} \quad (27)$$

La pendiente de la curva del índice de refracción contra temperatura es:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{-KMP}{RT^2} \quad (28)$$

Si los cambios de temperatura en un experimento dado son pequeños, el lado derecho de la ecuación (28) será aproximadamente constante, de modo que resulta una relación lineal entre el cambio del índice de refracción y el cambio de temperatura.

Por ejemplo, para aire a 288 K y 0.1013 MPa, la constante de Gladstone-Dale a $\lambda=632.8 \text{ nm}$ es $0.226 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ y su peso molecular es 28.97, por lo tanto:

$$\frac{dn}{dT} = -0.961 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \quad (29)$$

Se puede lograr una mayor precisión usando la siguiente relación para el índice de refracción del aire a 632.8 nm:

$$n - 1 = \frac{0.292015 \times 10^{-3}}{1 + 0.368184 \times 10^{-2} T} \quad (30)$$

para 514.5 nm:

$$n - 1 = \frac{0.294036 \times 10^{-3}}{1 + 0.369203 \times 10^{-2} T} \quad (31)$$

donde T se expresa en °C. Estas ecuaciones están basadas en la relación de Gladstone-Dale con dependencia en la longitud de onda calculada de acuerdo a Meggers y Peters, e incluyen pequeñas correcciones introducidas por Tilton.

CAPÍTULO 4

EQUIPO EXPERIMENTAL

Para demostrar el uso y la utilidad que representa el contar con un equipo de esta naturaleza, así como para apreciar su potencial, se diseñaron y construyeron algunos instrumentos y modelos con características específicas acordes al alcance de los objetivos de este trabajo. De igual forma, las especificaciones sobre las que se diseñaron estas herramientas se limitaron a los requerimientos necesarios para obtener los interferogramas que permitieran observar los beneficios que de estos equipos se pueden obtener. Dentro de los equipos que se construyeron se encuentra el interferómetro holográfico que fue diseñado y construido tomando como base la interferometría y principios de óptica. Así mismo, los modelos experimentales utilizados para perturbar la sección de prueba se diseñaron de tal forma que integran un control de temperatura que permite establecer condiciones controladas de estado permanente.

Dentro del equipo utilizado se seleccionó una forma conveniente de obtener registros permanentes de los resultados experimentales. Para ello se utilizó un sistema de registro apoyado en recursos computacionales para darle mayor versatilidad al manejo de la información, esto se logró mediante el uso de una computadora con una cámara de vídeo y una tarjeta digitalizadora de imágenes, permitiendo la captura éstas en el momento preciso, así como tener un registro en cinta magnética para facilitar análisis posteriores.

Con la finalidad de tener un control adecuado sobre la temperatura de los modelos, los experimentos se desarrollaron en una cámara aislada térmicamente y controlada en temperatura con la ayuda de un aire acondicionado de ventana. Esto aseguró que la temperatura ambiente permaneciera constante durante el transcurso de las corridas experimentales.

Todos los experimentos se desarrollaron dentro del laboratorio, en donde se acondicionó una pequeña área de revelado para las placas holográficas. Dentro de los instrumentos utilizados para los experimentos se encuentra el interferómetro holográfico, las cavidades con el controlador de temperatura, el sistema de procesamiento de imágenes, así como una serie de accesorios adicionales. El interferómetro es el instrumento principal de este trabajo por lo que a continuación se proporciona una breve descripción del mismo.

4.1 Interferómetro holográfico

El montaje del interferómetro holográfico utilizado es del tipo fuera de eje (*off-axis*). Se integró el montaje a partir de componentes ópticos comunes de mediana calidad, tal es el caso del divisor de haz y de los difusores que fueron obtenidos a partir de binoculares comerciales.

La fig. 1 muestra el esquema del interferómetro holográfico diseñado para este trabajo.

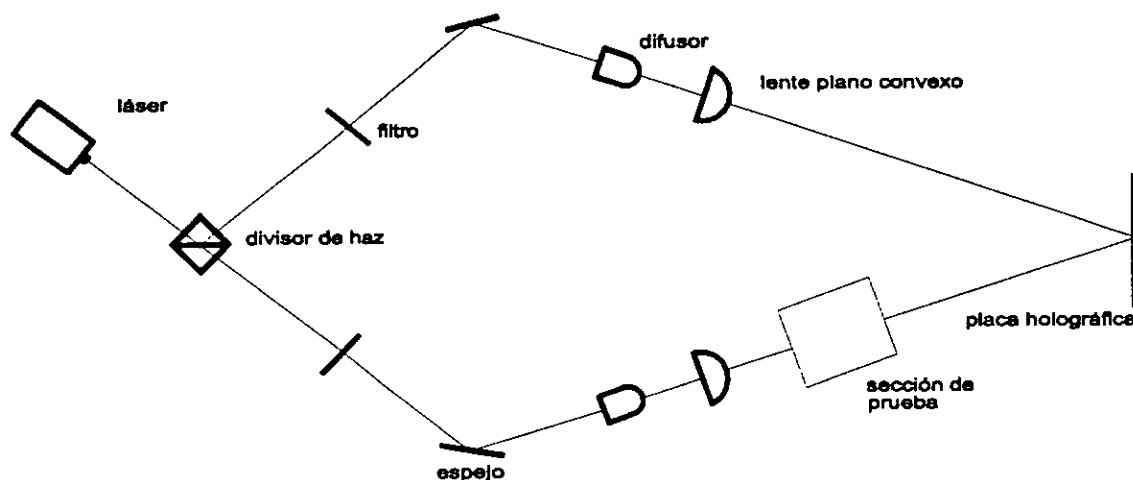


Fig. 1 Montaje para interferometría holográfica.

Se puede identificar en esta figura la trayectoria que toman los dos rayos de luz del láser que se utilizan para producir los patrones de interferencia. Se ha utilizado un dispositivo de luz láser del tipo Helio-Neón (He-Ne) de onda continua con una potencia de 3 mW y una longitud de onda de 632 nm. Esta longitud de onda queda situada dentro del espectro de frecuencias en el rango visible en la longitud del color rojo.

Para lograr coherencia en los dos rayos que interfieren, se ha dividido el rayo láser original en dos rayos mediante un divisor de haz de forma cúbica. Este divisor está compuesto por un par de prismas en ángulo recto, unidos por una de sus caras. A la salida de este divisor se obtienen un par de rayos, uno reflejado y uno transmitido, con trayectorias independientes.

Cada uno de los rayos se hace pasar a través de un filtro espacial (*pinhole*) con la finalidad de eliminar irregularidades en su periferia.

Posteriormente se hace pasar cada uno de los rayos por un espejo de primera superficie y se expanden por medio de un arreglo integrado por un difusor y una lente tipo plano convexo. Estos dos elementos se encuentran a una distancia tal que cuando el rayo expandido sale de la lente, el haz formado tiene la característica de estar colimado, esto es, tiene un frente de onda plano. Esta característica es necesaria para obtener patrones de interferencia adecuados para los experimentos. El difusor se ha obtenido a partir de un par de objetivos de binoculares comerciales.

Una vez que se tienen dos haces expandidos y colimados, se hacen incidir sobre una placa holográfica rígida. Esta se coloca sobre el plano de incidencia de los haces. En la emulsión de la placa holográfica se registrarán los patrones de interferencia producidos por la intersección de los haces de luz. Se utilizó una placa holográfica rígida, marca AGFA, con dimensiones de 2.5" X 2.5 " X 0.06", 8E75 HD NAH. La fig. 2 muestra una imagen de las placas utilizadas para este trabajo.

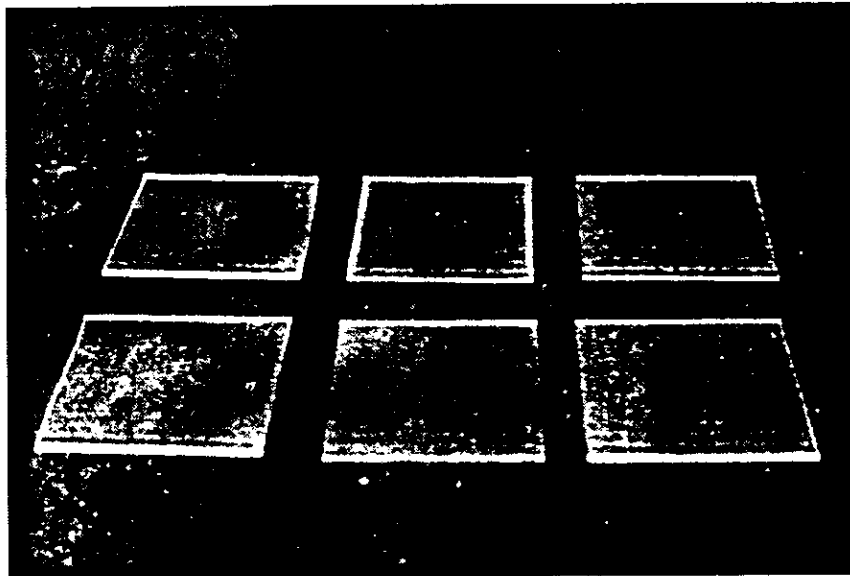


Fig. 2 Placas utilizadas para interferometría.

La placa se colocó sobre un montaje especial que cuenta con varios grados de libertad y que permite variar su posición para ajustar el patrón de franjas en la modalidad de franja infinita o franjas de referencia. La fig. 3 ilustra este montaje.

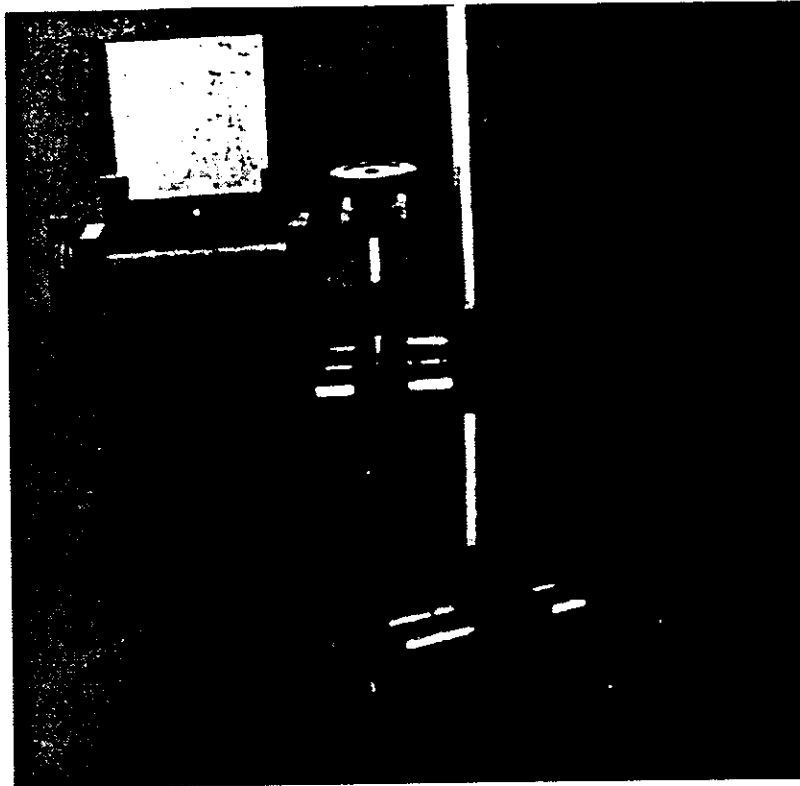


Fig. 3 Montaje de la placa holográfica.

Se selecciona una de las trayectorias de los haces entre la salida de la lente y la placa holográfica para disponerla como sección de prueba, tal y como se ilustra en la fig. 1. Esta sección de prueba tiene dimensiones específicas y es la zona en donde se introducen las perturbaciones al medio bajo estudio para inducir los cambios en la densidad mediante perturbaciones al campo térmico de la misma. En esta sección se colocan los modelos experimentales.

La fig. 4 ilustra el interferómetro en el laboratorio.

Los accesorios y lentes que integran el interferómetro se han montado sobre una mesa de madera con cubierta de vidrio de 5 mm de espesor, lo que asegura uniformidad en su superficie. La cubierta de vidrio cuenta con un paño negro para evitar reflexiones indeseables. Se han utilizado varias gomas especiales entre la cubierta de vidrio y la superficie de madera, y sirven para absorber las vibraciones mecánicas que pudieran producirse durante los experimentos. La estabilidad del montaje debe ser muy buena, ya que

cualquier vibración podría evitar el registro o la reproducción adecuada de los interferogramas.

4.2 Cavidades experimentales

Uno de los modelos que se construyeron para los experimentos de visualización de flujos de calor consistió en una cavidad triangular. Esta cavidad se construyó en su totalidad con placas de vidrio. Sobre las paredes inclinadas se incluyó un par de recipientes a manera de contenedores con la finalidad de utilizarlos para mantener constante la temperatura de ambas paredes. La forma y dimensiones de esta cavidad se pueden observar en el esquema de la fig. 5.

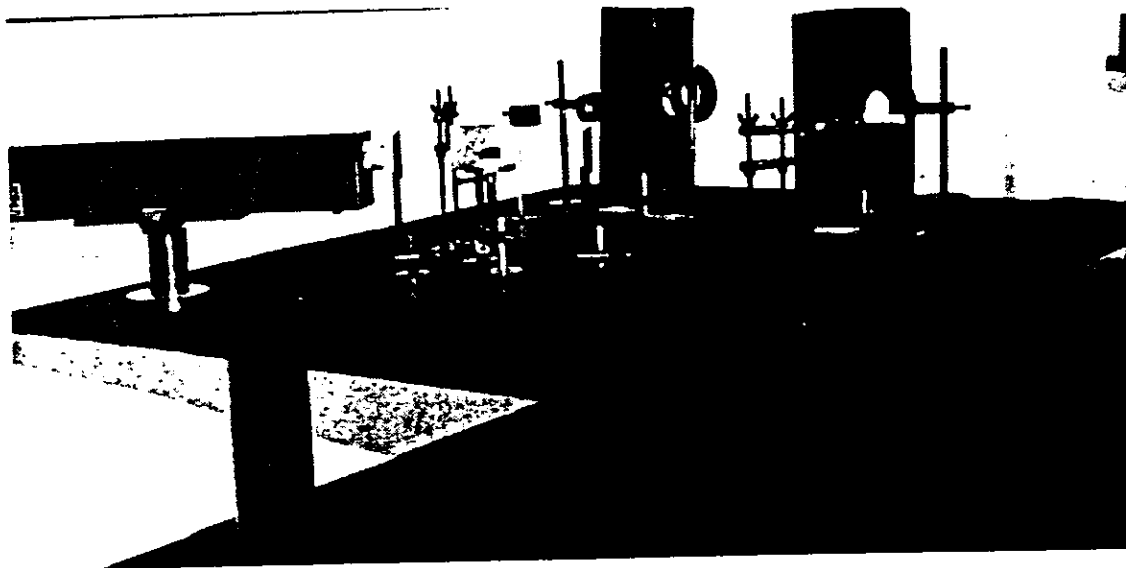


Fig. 4 Montaje del interferómetro holográfico.

Se construyó un modelo de cavidad rectangular con paredes de vidrio. Esta cavidad se construyó de tal forma que se pudiera utilizar con el controlador de temperatura a fin someter a diversas condiciones el interior de la misma. La fig. 6 muestra el modelo en cuestión.

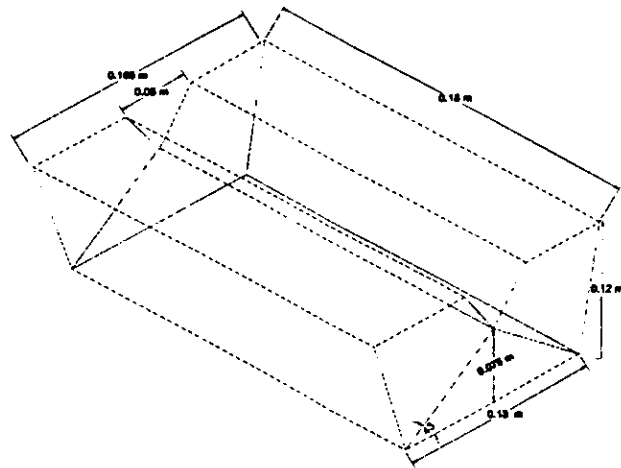


Fig. 5 Esquema de la cavidad triangular.

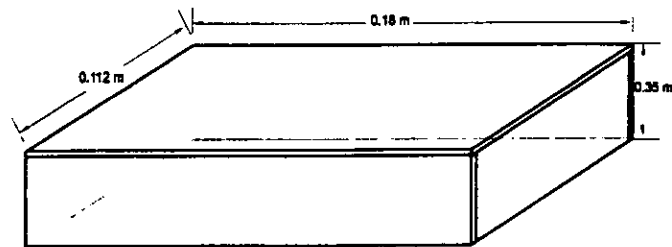


Fig. 6 Esquema de la cavidad rectangular.

4.3 Controlador automático de temperatura

A fin de tener resultados bajo diferentes condiciones de temperatura, y para alcanzar condiciones controladas y en estado permanente, se desarrolló un equipo que permitiera controlar las temperaturas aplicadas a los diferentes modelos experimentales. Este equipo se muestra en la fig. 7.

El equipo mencionado está formado por un dispositivo de calefacción y un dispositivo de control. El dispositivo de calefacción consiste en una pequeña cámara aislada térmicamente en paredes y fondo con fibra de cerámica para evitar pérdidas de calor. Éste tiene un calefactor en su interior cuyo calor se desprende hacia el ambiente sólo por la parte superior del mismo; se tiene

además, un termómetro de estado sólido en su interior para la medición de la temperatura utilizada por el controlador.

El dispositivo de control permite ajustar la temperatura a un valor constante, el cual se ha desarrollado con componentes electrónicos que amplifican la señal del termómetro de estado sólido, y mediante dispositivos de potencia envían las señales de control necesarias para regular la energía aplicada al calefactor. Este dispositivo cuenta con una perilla y un panel calibrado que permite ajustar fácilmente la temperatura deseada.

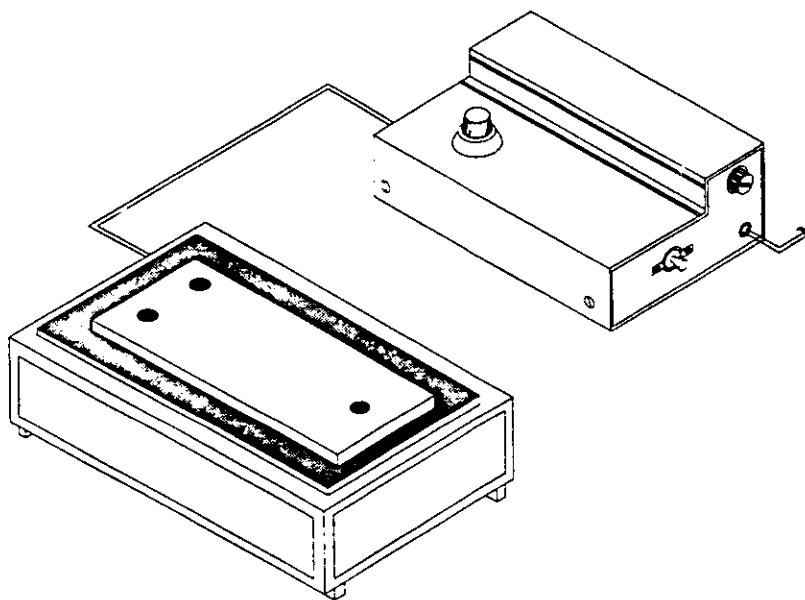


Fig. 7 Controlador automático de temperatura.

La fig. 8 muestra una imagen del controlador de temperatura con la cavidad triangular instalada sobre el dispositivo calefactor. Se pueden apreciar los contenedores para el control de la temperatura de las paredes laterales de la cavidad.

4.4 Equipo auxiliar de medición y registro

El sistema de adquisición de imágenes utilizado se integró con una computadora personal con procesador 486DX con velocidad de 33 MHz y monitor de color. Se utilizó una tarjeta para adquisición de imágenes de vídeo con formato NTSC, INTECTRA WIN VISION PRO, cuya señal de vídeo

compuesto se obtuvo de una cámara PANASONIC modelo PV-IQ203 con formato de cinta VHS compacto.

Las imágenes se registraron en la cámara de vídeo y posteriormente se analizaron en la computadora personal, registrando en disco duro los eventos que se consideraron de mayor relevancia para su presentación.

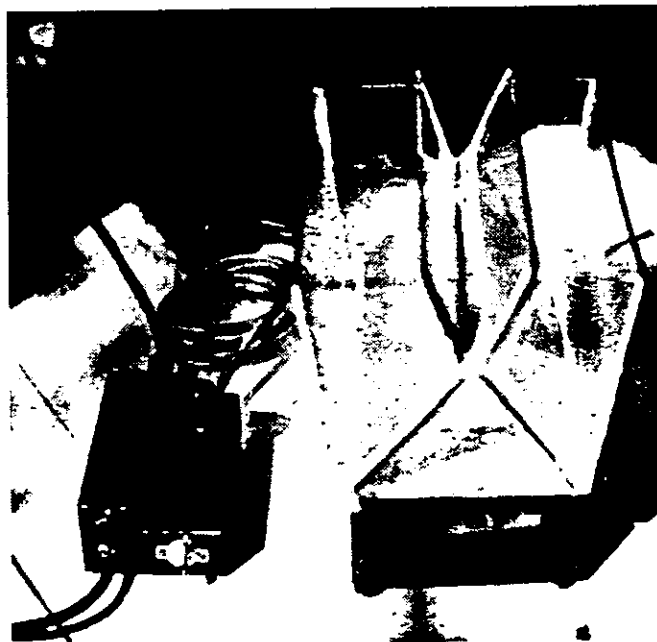


Fig. 8 Cavity triangular y controlador de temperatura.

El programa utilizado para el procesamiento de las imágenes capturadas se llama PHOTO-SHOP y es un programa que permite modificar las características de la imagen en lo que se refiere al contraste, brillo, colores, filtros, y una serie de efectos secundarios para dar otra apariencia a las mismas. Se seleccionaron los procesos necesarios para proporcionarle a las imágenes la suficiente claridad para destacar los aspectos más importantes de las mismas de acuerdo a los propósitos de este trabajo.

Para la medición de las temperaturas en los diferentes puntos de los modelos experimentales construidos, se utilizó un termómetro digital portátil marca FLUKE modelo 77. Este instrumento cuenta con un par de entradas para termopar y presenta una resolución de 0.1° C. Durante las mediciones se utilizaron termopares de unión fierro-constantano, tipo J.

4.5 Accesorios de calibración y ajuste

Para obtener interferogramas adecuados, el tiempo de exposición de la placa a los rayos de luz del láser debe tener una duración controlada, determinada por las características de la emulsión, así como por la intensidad de los rayos, por lo que se diseñó un obturador electrónico que utiliza un temporizador disparado mediante un interruptor de botón, y se utiliza un electroimán que desliza una placa metálica para permitir que la luz llegue a la placa holográfica sólo durante el tiempo requerido.

Se instaló un controlador de luz variable en el interior del recinto experimental para obtener los niveles de iluminación adecuados para el revelado de los hologramas. El revelado de las placas holográficas se efectuó en el mismo recinto por lo que se dispuso de una toma de agua corriente, así como de los reactivos y charolas necesarios. La fig. 9 muestra el laboratorio de revelado.

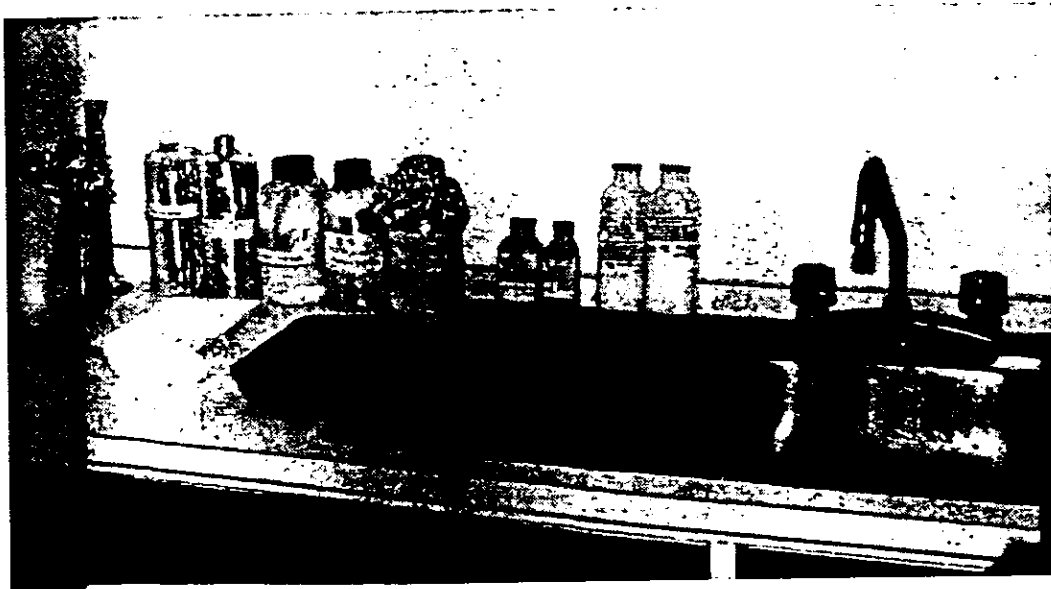


Fig. 9 Charolas y reactivos para el proceso de revelado.

Se ha utilizado una hoja de cartulina blanca como pantalla de proyección en donde se hace incidir el rayo de luz que proviene de la placa holográfica. En el plano de esta pantalla se enfoca la cámara para mantener el registro de los interferogramas producidos.

La técnica de revelado de las placas holográficas se proporciona en un anexo de este trabajo.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del uso del interferómetro holográfico en los modelos experimentales descritos. Se considera inicialmente el caso de pérdidas de calor al ambiente y posteriormente se aborda el caso de la visualización en el interior de cavidades rectangulares y triangulares. El interferómetro se ha utilizado en los modos de franja infinita y de franjas de referencia, y en cada resultado que se presenta se hace un breve análisis del comportamiento observado.

5.1 Visualización del flujo de calor de una superficie calentada con pérdidas al ambiente

Para estudiar la dinámica del flujo de calor de superficies calentadas con desprendimiento de calor al ambiente, se colocó la cavidad rectangular sobre el controlador de temperatura, y éste a su vez en la trayectoria del rayo objeto del interferómetro holográfico.

El montaje se dispuso de tal forma que la superficie de vidrio correspondiente a la interfase vidrio-aire se proyecta a la mitad del holograma, y así poder observar los gradientes térmicos que ocurren cerca de la superficie bajo experimentación.

Sin aplicar calor a la cavidad, se procedió a grabar el interferograma producto de las condiciones térmicas del modelo. Una vez registrado éste, se encendió el controlador para lograr condiciones de estado permanente. Esta condición se fijó para una temperatura del modelo de 333 K en la superficie de cristal.

El estudio se realizó en la modalidad de franja infinita con registro en computadora del interferograma resultante. Éste se muestra en la fig. 10.

En el interferograma se pueden apreciar dos secciones claramente definidas. En la parte media superior se encuentra el ambiente afectado por el calor que se desprende del modelo, y en la parte media inferior, una proyección longitudinal de la cavidad rectangular, cuyo interior se puede observar gracias a que las paredes son de cristal.

Dado que el interferómetro se ha ajustado para utilizarse en la modalidad de franja infinita, las líneas oscuras que se observan representan el campo térmico definido con isotermas. Se puede apreciar en esta figura que en el interior de la cavidad sólo aparece una franja ancha oscura, esto se explica porque el control se ha dispuesto de tal forma que se tenga un calentamiento uniforme en el interior de la misma, con la finalidad de que el calor transferido a la superficie de cristal sea lo más uniforme posible.

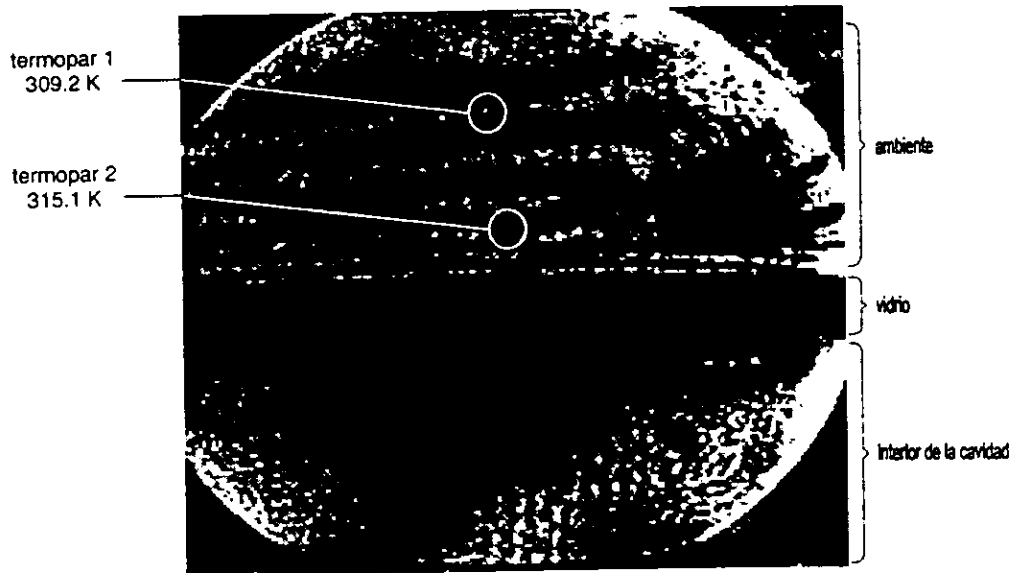


Fig. 10 Interferograma del desprendimiento de calor de una superficie al ambiente.

En el interferograma se observan las isotermas (líneas horizontales oscuras) con separación variable mostrando la distribución del calor que se desprende de la superficie. Se ha dispuesto un par de termopares dentro de la sección de prueba con la finalidad de obtener valores que permitan determinar la diferencia de temperaturas existente entre cada isoterma y así caracterizar el campo térmico. La fig. 10 muestra que los valores obtenidos para las condiciones experimentales descritas fueron de 315.1 K y 309.2 K.

Para apreciar mejor el campo isotérmico, en la fig. 11 se muestra la ampliación de una sección del interferograma.

Como podrá notarse, las isotermas que se encuentran más cerca de la superficie de vidrio, tienen una menor separación que las que se encuentran

alejadas, teniendo estas últimas la característica adicional de que su grosor aumenta. Esto es debido a que la temperatura del medio se distribuye no de manera lineal, sino que define una curva que se comporta en forma asintótica hasta alcanzar la temperatura del medio ambiente que rodea el modelo.

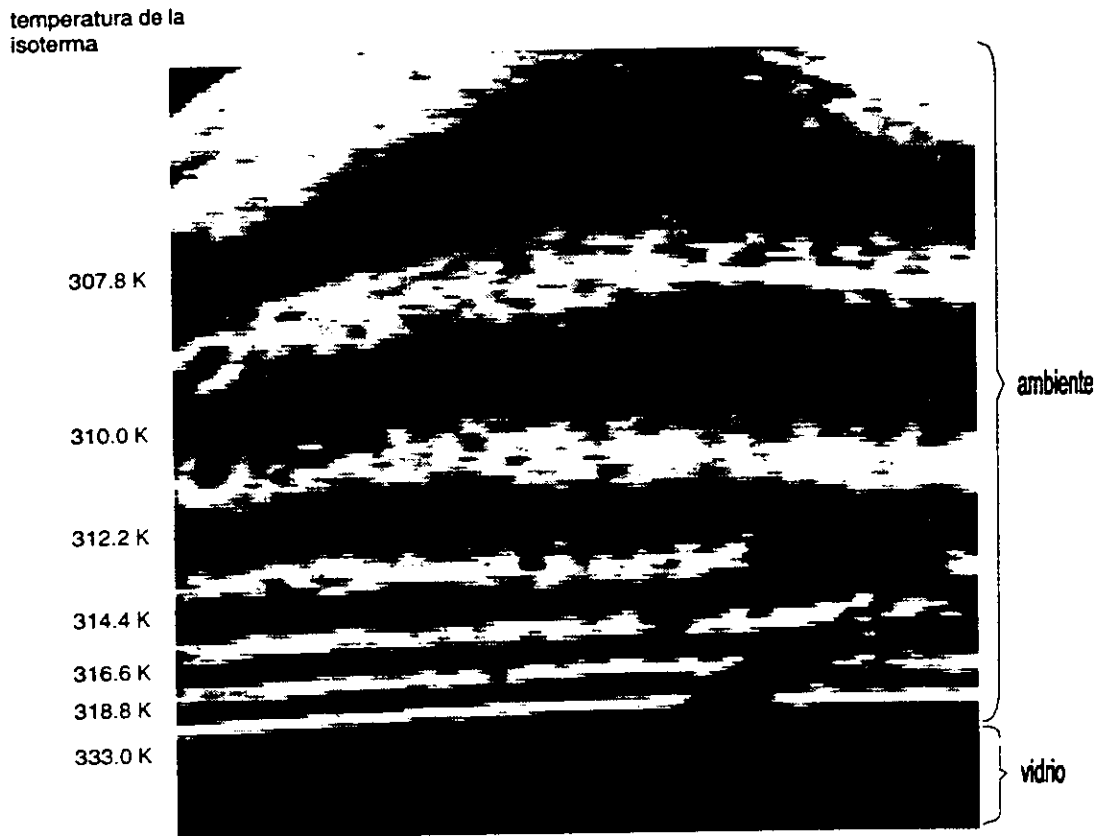


Fig. 11 Ampliación de una sección del interferograma.

Las mediciones hechas con los termopares muestran una diferencia de 2.2 K entre cada isoterma. En esta modalidad, la formación de las isotermas es proporcional a la diferencia en temperaturas y a las condiciones termodinámicas del medio. Para este caso de estudio se considera un campo bidimensional, esto es, sólo existe variación en la dirección "y", además, se forma una franja cada vez que existe una diferencia de una longitud de onda en la trayectoria óptica de los rayos que cruzan la sección de prueba. Haciendo estas consideraciones, es posible caracterizar el campo térmico, cuya información se ha incorporado a la fig. 11.

Se puede observar que entre la superficie del modelo, que se encuentra a 333 K, y la primera isoterma visible de 318.8 K, se tiene una diferencia en temperatura de 14.2 K, debido a que en esta sección existen varias isotermas que el instrumento no es capaz de resolver.

Se ha hecho un análisis de la separación de las franjas y se ha elaborado la gráfica 12 que muestra la tendencia observada. En esta gráfica, $n=0$ representa la superficie del modelo, y $n=6$ la isoterma visible más alejada. Como era de esperarse, existe una mayor concentración de franjas en las inmediaciones de la superficie experimental, donde ocurren los cambios térmicos más abruptos, que en las secciones alejadas del modelo.

Se ha elaborado una gráfica con valores adimensionales para las temperaturas y se correlacionan con la distancia a la superficie. Los resultados obtenidos se muestran en la fig. 13. El resultado es un comportamiento típico del desprendimiento de calor en superficies, en donde los cambios térmicos más fuertes se presentan para lugares cercanos a la superficie de vidrio.

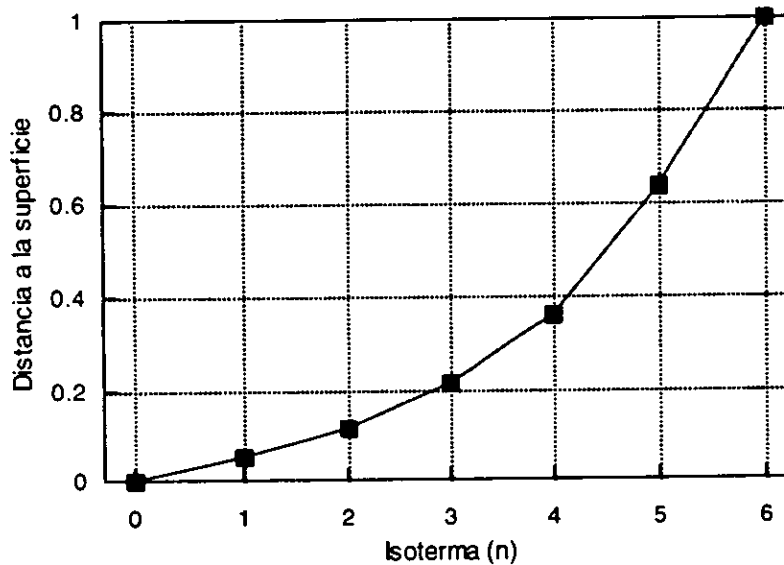


Fig. 12 Distribución de las isotermas sobre la superficie.

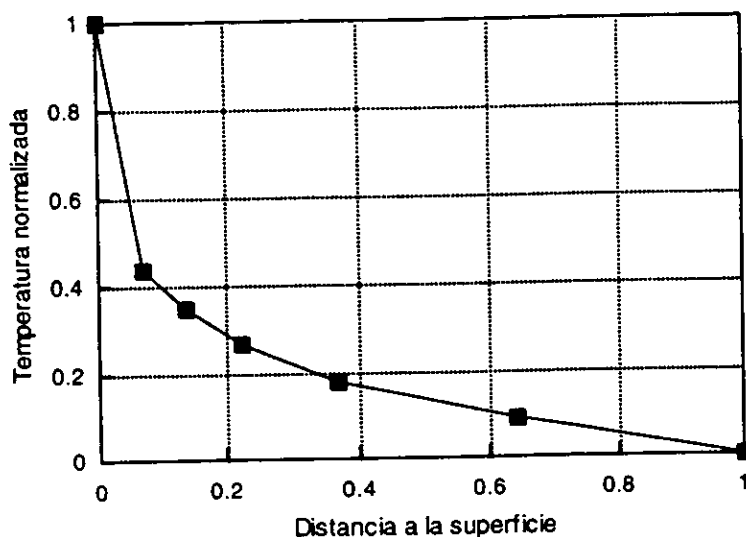


Fig. 13 Perfil de temperaturas sobre la superficie del modelo

5.2 Dinámica de flujo en el interior de una cavidad rectangular

Para realizar el estudio de la dinámica del flujo de calor en el interior de cavidades rectangulares, se utilizó el interferómetro en dos modalidades, en la modalidad de franja infinita y con franjas de referencia.

El modelo se colocó en la trayectoria del rayo objeto del interferómetro en condiciones tales que no se tuviera perturbación en su interior, esto es, sin aplicar calor con el controlador de temperatura. Se procedió al registro del interferograma en la placa holográfica con la metodología ya descrita y se utilizaron los ajustes disponibles en el montaje de la placa con la finalidad de obtener la modalidad de franja infinita. Este ajuste se caracteriza por la existencia de una sola franja de gran espesor en el campo de visualización proyectado por los rayos del láser del interferómetro.

Una vez ajustado el interferómetro, se procedió a aplicar calor al interior de la cavidad mediante el controlador de temperatura por un tiempo de 2 horas hasta asegurar condiciones de estado permanente sujetas a una temperatura de aproximadamente 307 K en la superficie exterior superior de la cavidad. La fig. 14 muestra el interferograma resultante.

De un análisis de este interferograma se puede identificar claramente la ausencia de franjas de referencia, denotando el uso del interferómetro en la modalidad de franja infinita. Se aprecia que aparece solamente una línea oscura irregular, que representa el patrón isotérmico del interior de la cavidad mostrando la forma de la pluma térmica generada bajo estas condiciones. La fig. 15 muestra una interpretación del interferograma.

El patrón observado del campo isotérmico denota un desprendimiento de calor desde la base, que adopta una forma no uniforme, con una concentración de calor mayor en la parte central que en los extremos, esto se explica porque las paredes del modelo utilizado no se encuentran térmicamente aisladas permitiendo su consiguiente enfriamiento al encontrarse expuestas a la temperatura ambiente, generando una zona de mayor calor en la sección media de la cavidad.

Además de este comportamiento, se aprecia que la pluma térmica denota una concentración de calor en la parte central de la cavidad, en donde la pluma toma una forma circular. Dicha concentración de calor hace suponer la existencia, en el interior de la cavidad, de un flujo de aire de más baja temperatura que la que se tiene en la parte central de la cavidad, y que se mueve cerca de las paredes superior y laterales. Este efecto provocaría la existencia de un confinamiento de calor que evitaría que el enfriamiento producido por la pared superior generara un patrón de enfriamiento gradual conforme aumenta la distancia a la base del modelo.

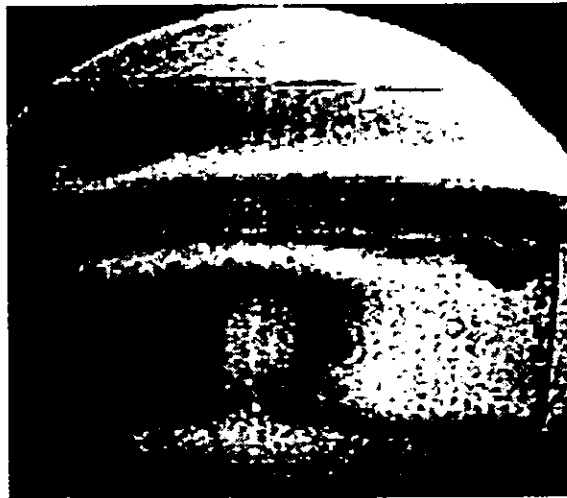


Fig. 14 Interferograma del interior de la cavidad rectangular en condiciones de estado permanente.

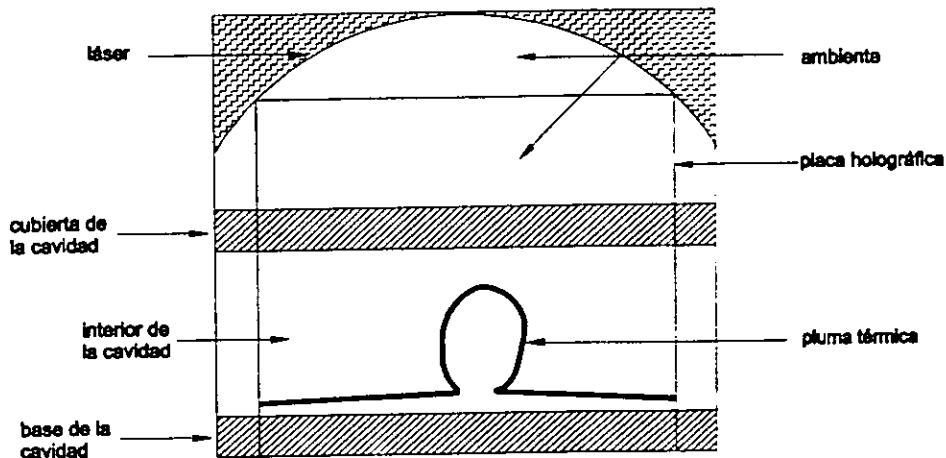


Fig. 15 Interpretación del interferograma.

Con la finalidad de estudiar más a fondo esta peculiaridad mostrada por la cavidad, se realizó otro experimento utilizando la modalidad de franjas de referencia. El uso de las franjas de referencia para la caracterización de los campos isotérmicos, a diferencia de la modalidad de franja infinita que sólo refleja la distribución isotérmica, permite determinar de una manera más precisa los cambios térmicos existentes en el campo estudiado, esto gracias a que se puede ajustar el número de franjas inicial de acuerdo a las características del modelo.

Para lograr lo anterior, se procedió a obtener el holograma con el patrón de referencia utilizando la metodología del experimento anterior. En esta ocasión, el ajuste aplicado al montaje de la placa holográfica se realizó de tal forma que se variara su posición en un pequeño ángulo a fin de obtener suficientes franjas de referencia que permitieran resolver los patrones térmicos buscados. El interferograma resultante de estas condiciones se muestra en la fig. 16.

En este interferograma se aprecia la sección correspondiente al interior de la cavidad denotada por el área que contiene líneas horizontales desde la sección media hacia la parte inferior. La línea gruesa que aparece en la sección media se debe al grosor de la pared superior de vidrio del modelo.

Una vez colocado el holograma de referencia bajo estas condiciones, se aplicó calor al interior de la cavidad y se sujetó a condiciones fijas durante un tiempo de 2 horas asegurando condiciones de estado permanente en los flujos de calor.

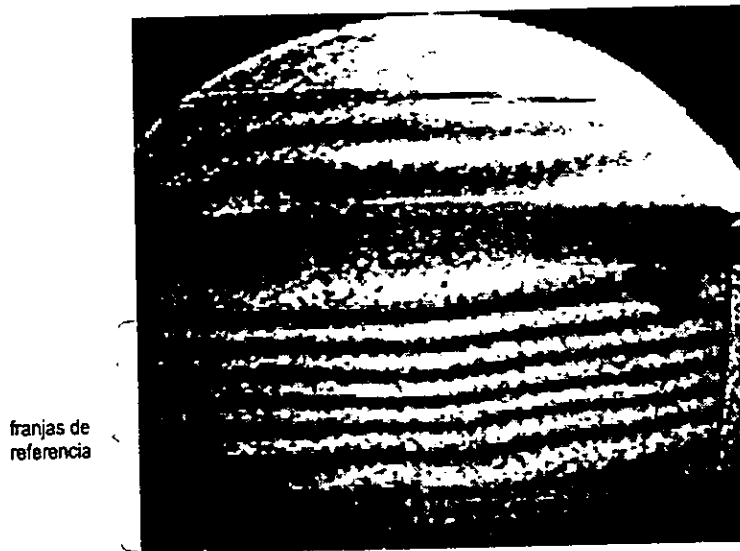


Fig. 16 Interferograma con franjas de referencia para la visualización de la cavidad rectangular.

Debido a que las dimensiones del rayo del láser utilizado para generar los interferogramas no cubrió totalmente la sección transversal de la cavidad, se procedió a la toma de los interferogramas en tres partes. Primero la sección izquierda de la cavidad, posteriormente la sección media, y finalmente la sección derecha de la misma utilizando la metodología ya descrita.

Los interferogramas resultantes para cada una de estas secciones se muestran en las figs. 17, 18 y 19 respectivamente.

En estas tres figuras se aprecia que el patrón de franjas se ha modificado sobre todo en la periferia del modelo. Se aprecia además, la acumulación de calor cerca de las paredes superior e inferior denotada por la geometría circular que adoptan las franjas de interferencia en estas fronteras. A diferencia del interferograma resultante del experimento anterior, no se observa tan claramente el efecto de confinamiento central, sin embargo, se distingue cierta simetría en la sección media inferior de la cavidad denotando la existencia de una región de temperatura mayor en esta zona.

Fig. 17 Interferograma de la sección izquierda de la cavidad rectangular.



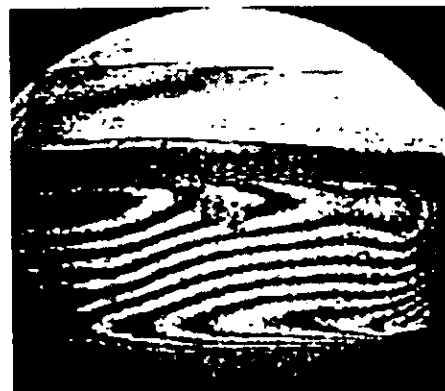
región central 

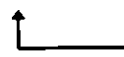
Fig. 18 Interferograma de la sección central de la cavidad rectangular.



región central 

Fig. 19 Interferograma de la sección derecha de la cavidad rectangular.



 región central

5.3 Visualización del flujo en el interior de una cavidad triangular

Para efectuar el estudio de la dinámica del flujo de calor en el interior de cavidades triangulares, se montó un arreglo experimental utilizando el controlador de temperatura y la cavidad triangular con los recipientes que permiten mantener un control en las paredes laterales de la cavidad.

La metodología experimental para este caso consistió en obtener el interferograma de referencia de las condiciones del interior de la cavidad utilizando el interferómetro en la modalidad de franja infinita. Se analizaron dos casos, en uno de ellos, la cavidad se somete a calentamiento en la parte inferior y enfriamiento en las paredes laterales sujetas a la misma temperatura. El segundo caso se analiza cuando una de las paredes se somete a temperatura ambiente mientras que en la otra se tienen condiciones de baja temperatura.

A partir de un análisis de los resultados experimentales, se identificaron tres fases en la evolución de la dinámica del desprendimiento de calor desde el momento en que se aplica éste, hasta el momento en que se alcanzan condiciones de estado permanente. La primera fase corresponde a la etapa de formación de la pluma térmica por efecto del desprendimiento de calor de la base del modelo. La segunda fase es aquella en la que se observa un comportamiento inestable en la pluma térmica caracterizado por el movimiento oscilatorio de un lado a otro de la pluma, y finalmente la tercera fase que corresponde al momento en el que se alcanzan las condiciones de estado permanente después del cual el patrón permanece prácticamente invariable.

Dada la naturaleza del comportamiento observado en el flujo de aire en el interior de la cavidad, se analizan cada una de estas fases por separado para los dos casos considerados.

5.4 Cavidad triangular con calentamiento en la parte inferior y paredes laterales a temperatura ambiente

Para determinar el comportamiento de la cavidad triangular bajo estas condiciones, se utilizó el controlador de temperatura con el cual se aplicó calor a la parte inferior de la misma, y se utilizaron los recipientes de la cavidad para mantener constante la temperatura de las paredes laterales. La fig. 20 muestra un esquema de las condiciones utilizadas para este experimento.

Las condiciones establecidas consideraron una temperatura en la base de la cavidad de 348 K, y una temperatura en las paredes de 297.5 K. Para lograr esto último, se utilizó agua a temperatura ambiente en los contenedores.

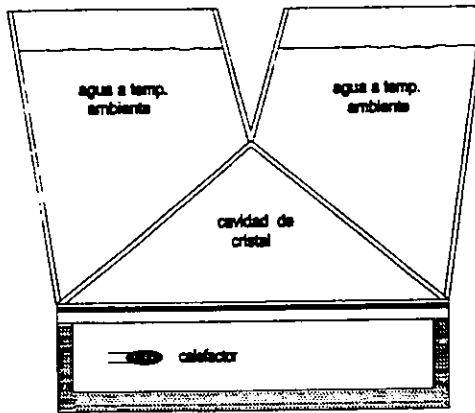


Fig. 20 Esquema del experimento con paredes laterales a temperatura ambiente.

Para obtener el patrón de referencia, se tomó el interferograma bajo condiciones de la cavidad sin perturbación y a temperatura ambiente con la metodología ya descrita.

El interferómetro se ajustó para operarlo en la modalidad de franja infinita y se procedió al registro de las tres fases. A continuación se describe cada una de ellas.

5.4.1 Evolución de la pluma térmica

El análisis de la evolución de la pluma térmica se realiza desde el momento en que se identifica el inicio en la formación de la misma. Este proceso dura aproximadamente 60 segundos para las condiciones de transferencia de calor obtenidas con los dispositivos de control utilizados en estos experimentos, y los resultados se muestran en la fig. 21.

Las imágenes que se presentan corresponden a la evolución de la pluma térmica desde el momento de su formación hasta que se encuentra completamente desarrollada. Cada imagen se ha tomado con una diferencia de tiempo de 10 segundos y se puede observar lo siguiente:

La fig. 21a muestra el interferograma correspondiente al patrón de referencia utilizado, caracterizado por la iluminación uniforme del campo de

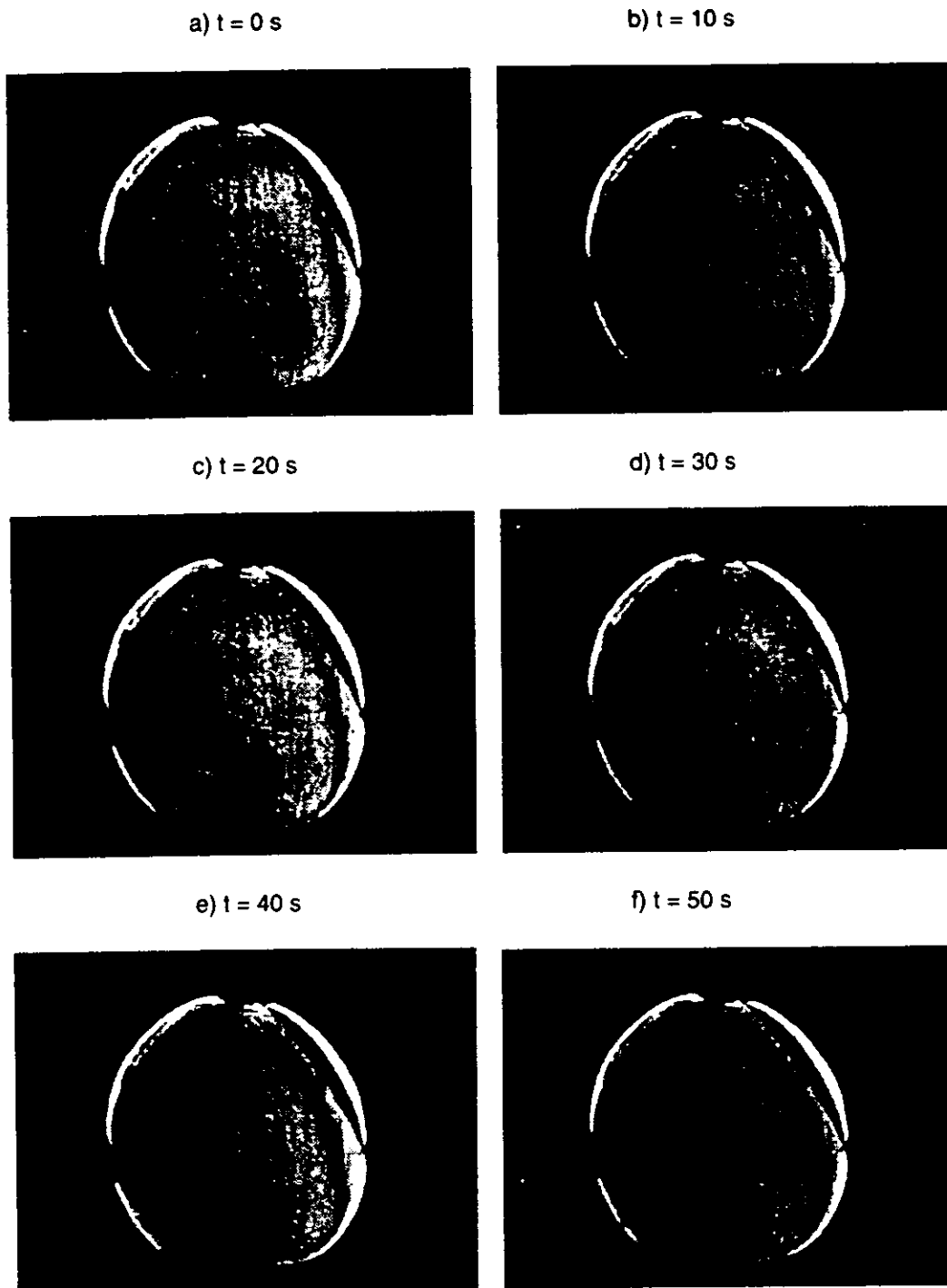


Fig. 21 Evolución de la pluma térmica con calentamiento inferior y paredes a igual temperatura.

visualización, denotando la modalidad de franja infinita del interferómetro. Conforme transcurre el tiempo, se observa la formación de una prominencia en la base de la cavidad, que corresponde a la formación de la pluma térmica esquematizada por una isoterma creciente.

La forma de la pluma se mantiene estable conforme evoluciona el fenómeno, reflejando la existencia de una única influencia en el desarrollo de la misma, provocado por el desprendimiento de calor de la base del modelo, sin que hasta el momento exista influencia por las condiciones establecidas en las paredes de la cavidad.

Se aprecia que al final del período de formación de la pluma, esta abarca aproximadamente la mitad de la altura del modelo, y se caracteriza por una forma del tipo campana de Gauss alargada.

5.4.2 Inestabilidad de la pluma térmica para condiciones de calentamiento en el fondo y paredes laterales a temperatura ambiente

Una vez que ha finalizado el proceso de formación de la pluma térmica, la dinámica del flujo del interior de la cavidad se caracteriza por un comportamiento inestable de la pluma. Esto se aprecia cuando la parte superior de la pluma sufre deformaciones debido a un movimiento oscilatorio que tiende a inclinar la pluma de un lado a otro, permaneciendo ésta en la parte media de la cavidad. Las figs. 22a a 22f muestran el comportamiento descrito.

La inestabilidad observada se caracteriza por un movimiento oscilatorio con duración de algunos segundos, y es por esto que la secuencia de imágenes se presenta para intervalos de 2 segundos cada una.

En las figs. 22a y 22c se observa la pluma en una posición central, mientras que para las figs. 22b y 22e se observa que la parte superior de ésta se ha desplazado hacia la izquierda demostrando la existencia de una fuerza que obliga este movimiento.

De igual forma, durante el experimento se observó que la parte superior de la pluma también se desplaza hacia la sección derecha de la cavidad, con un desplazamiento menos pronunciado, por lo que este efecto no se aprecia claramente en la secuencia de imágenes mostrada.

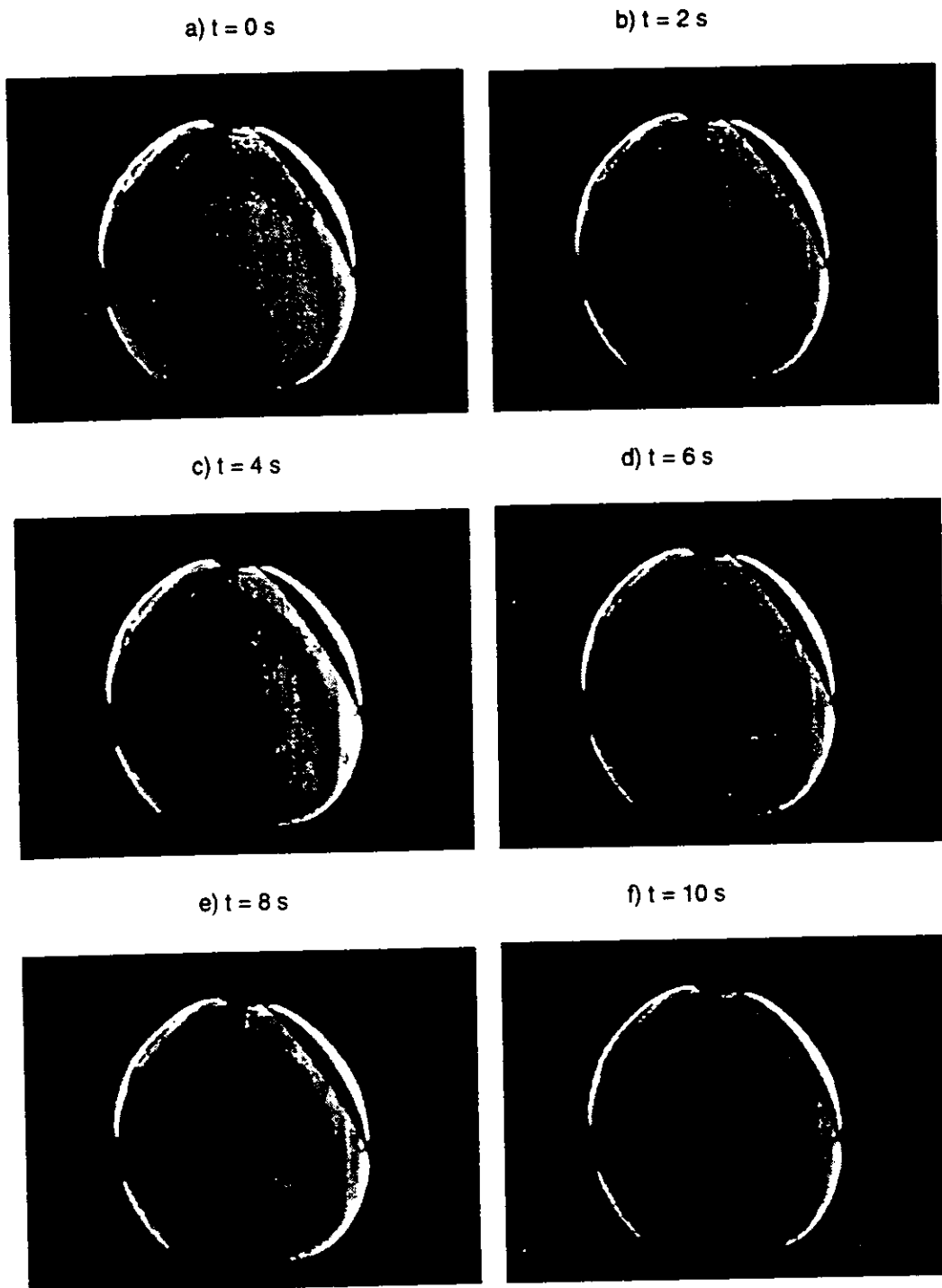


Fig. 22-1 Inestabilidad de la pluma térmica para la cavidad triangular con calentamiento en la parte inferior y paredes a igual temperatura.

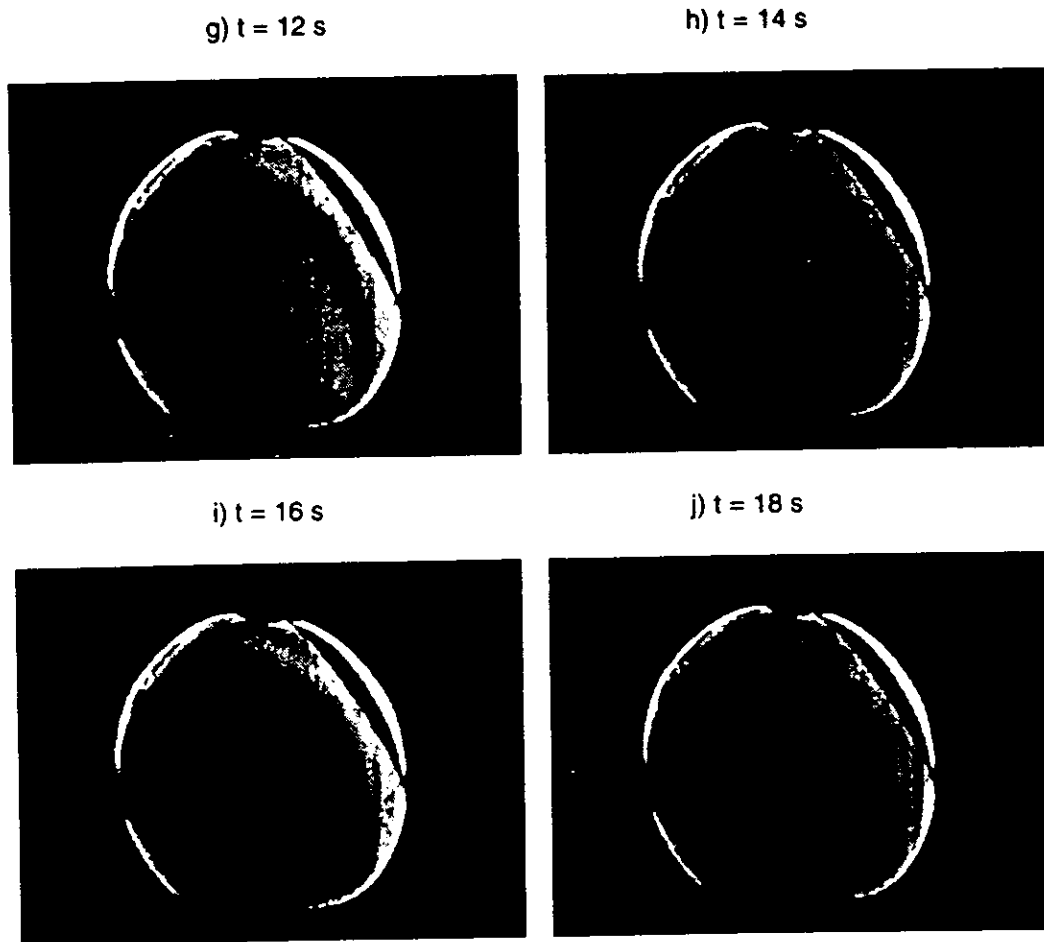


Fig. 22-2 Inestabilidad de la pluma térmica para la cavidad triangular con calentamiento en la parte inferior y paredes a igual temperatura.

5.4.3 Condiciones en estado permanente de una cavidad triangular con calentamiento en la parte inferior y paredes a temperatura ambiente

El patrón isotérmico generado para condiciones de estado permanente no varió significativamente con respecto al mostrado en la inestabilidad de la pluma térmica. La fig. 23 muestra la imagen del interferograma correspondiente, en el que se pueden apreciar las características generales del patrón de temperaturas generado en el interior de la cavidad para las condiciones ya descritas. Se aprecia la existencia de dos celdas de calor, siendo la celda del lado derecho más clara y de mayores dimensiones, estas

celdas denotan la existencia de un flujo que tiende a confinar el calor en dos secciones de temperatura uniforme con geometría ovalada.

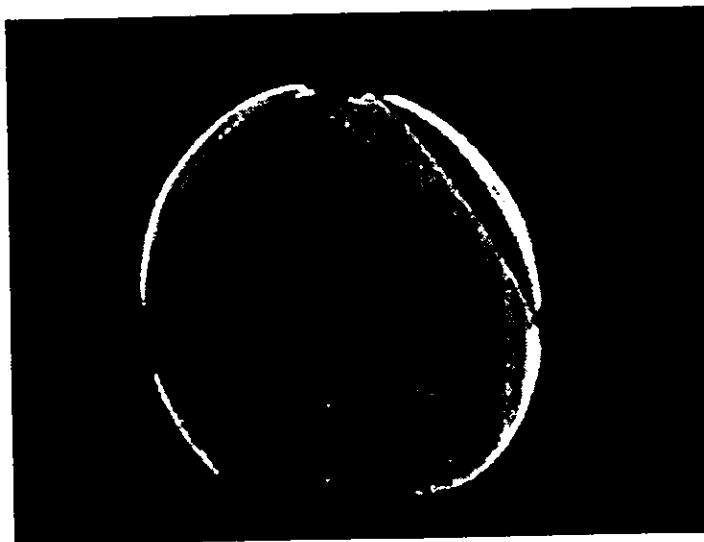


Fig. 23 Interferograma correspondiente a condiciones de estado permanente para una cavidad calentada en la parte inferior y paredes a temperatura ambiente.

La razón de que ambas celdas sean de diferentes proporciones se explica por las diferencias en la geometría de la cavidad y el control de las temperaturas que tiende a que uno de los flujos generados domine sobre el otro, confinándolo en una celda de menores dimensiones. El patrón observado obedece a los resultados reportados en la literatura para cavidades triangulares bajo condiciones de temperatura iguales en ambas paredes.

5.5 Cavidad triangular con calentamiento en la parte inferior y paredes laterales a diferente temperatura

Para estudiar el comportamiento de la dinámica de flujo en el interior de una cavidad triangular con paredes a diferente temperatura, se colocó el modelo construido sobre el controlador de temperatura y se incluyeron condiciones térmicas tales que se aplicara calentamiento desde la parte inferior de la cavidad y paredes laterales a diferente temperatura. Para obtener temperaturas distintas en ambas paredes, se llenó uno de los recipientes de la

cavidad con agua a temperatura ambiente, mientras que el otro se controló con una mezcla de agua y hielo para mantener a baja temperatura la pared. Un esquema de las condiciones anteriormente descritas se muestra en la fig. 24.

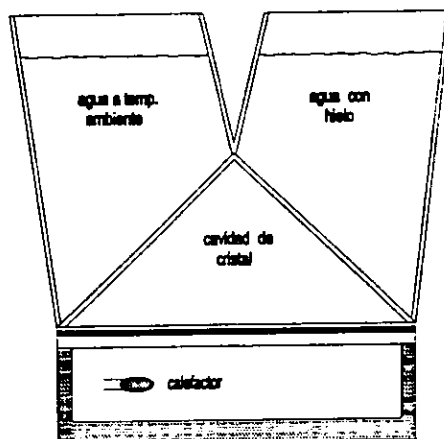


Fig. 24 Condiciones experimentales con paredes a diferente temperatura.

La metodología utilizada para desarrollar este experimento es idéntica al caso anterior, se procede al llenado de uno de los recipientes con agua a temperatura ambiente, y el otro con una mezcla de agua con hielo. Se permite que las paredes alcancen una temperatura estable antes de aplicar calentamiento desde el fondo y se registra un holograma con las condiciones de la sección de prueba sin perturbar. Finalmente, se ajusta el interferómetro para utilizarlo en la modalidad de franja infinita.

Una vez preparado el montaje experimental se procede al registro en vídeo de la evolución de los eventos proyectados por el interferómetro. Lo observado se presenta a continuación.

5.5.1 Evolución de la pluma térmica para una cavidad triangular con calentamiento en la base y paredes a diferente temperatura

Se encontró de los registros observados que el tiempo de formación de la pluma térmica desde el momento en que se identifica en la base de la cavidad hasta que ya no sufre modificación en su tamaño es de aproximadamente 2.5 minutos. Una selección de los registros de la evolución de la pluma térmica se muestra en la secuencia de imágenes de la fig. 25.

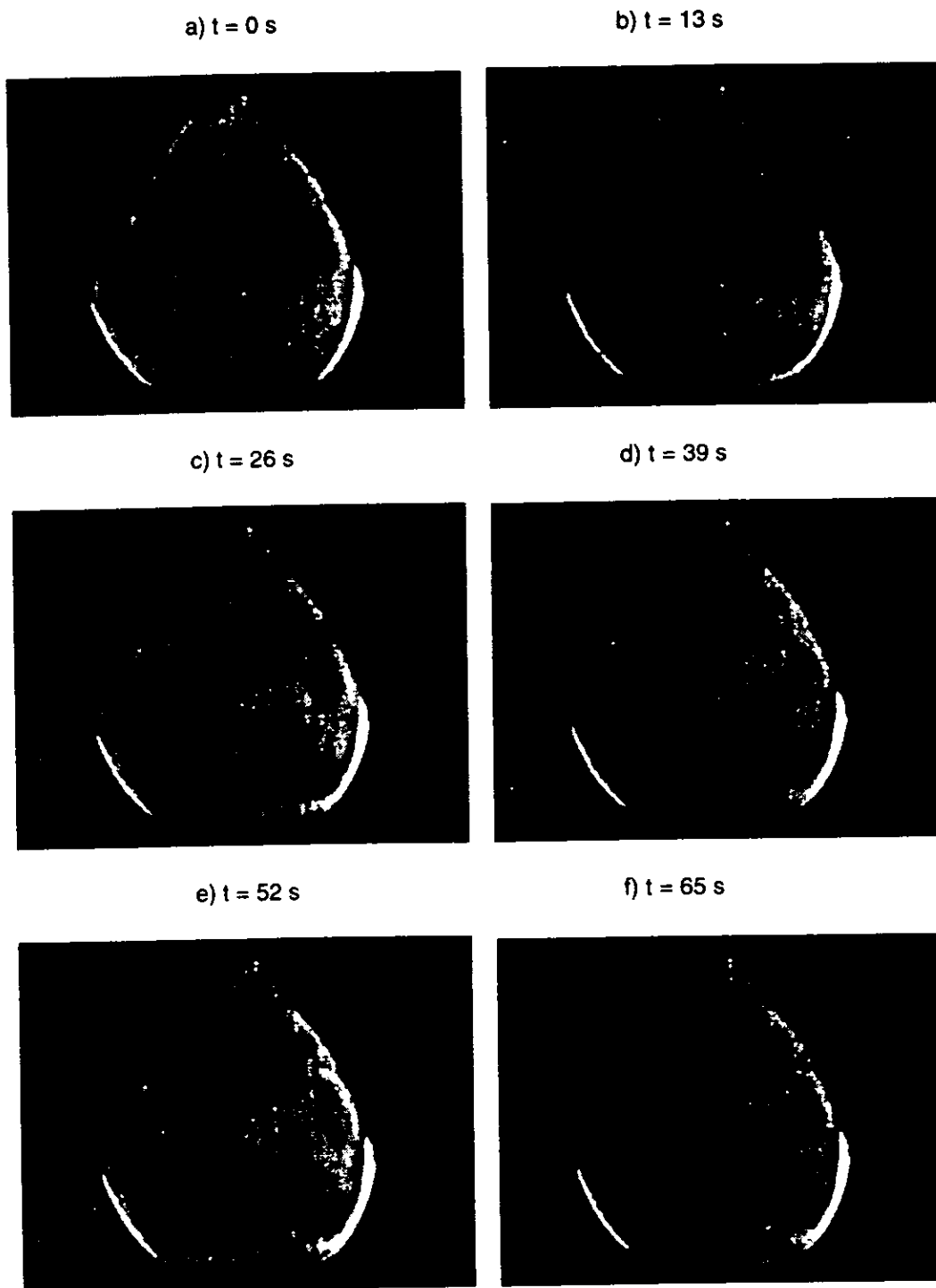


Fig. 25-1 Evolución de la pluma térmica. Una imagen cada 13 segundos. Cada baño a diferente temperatura.

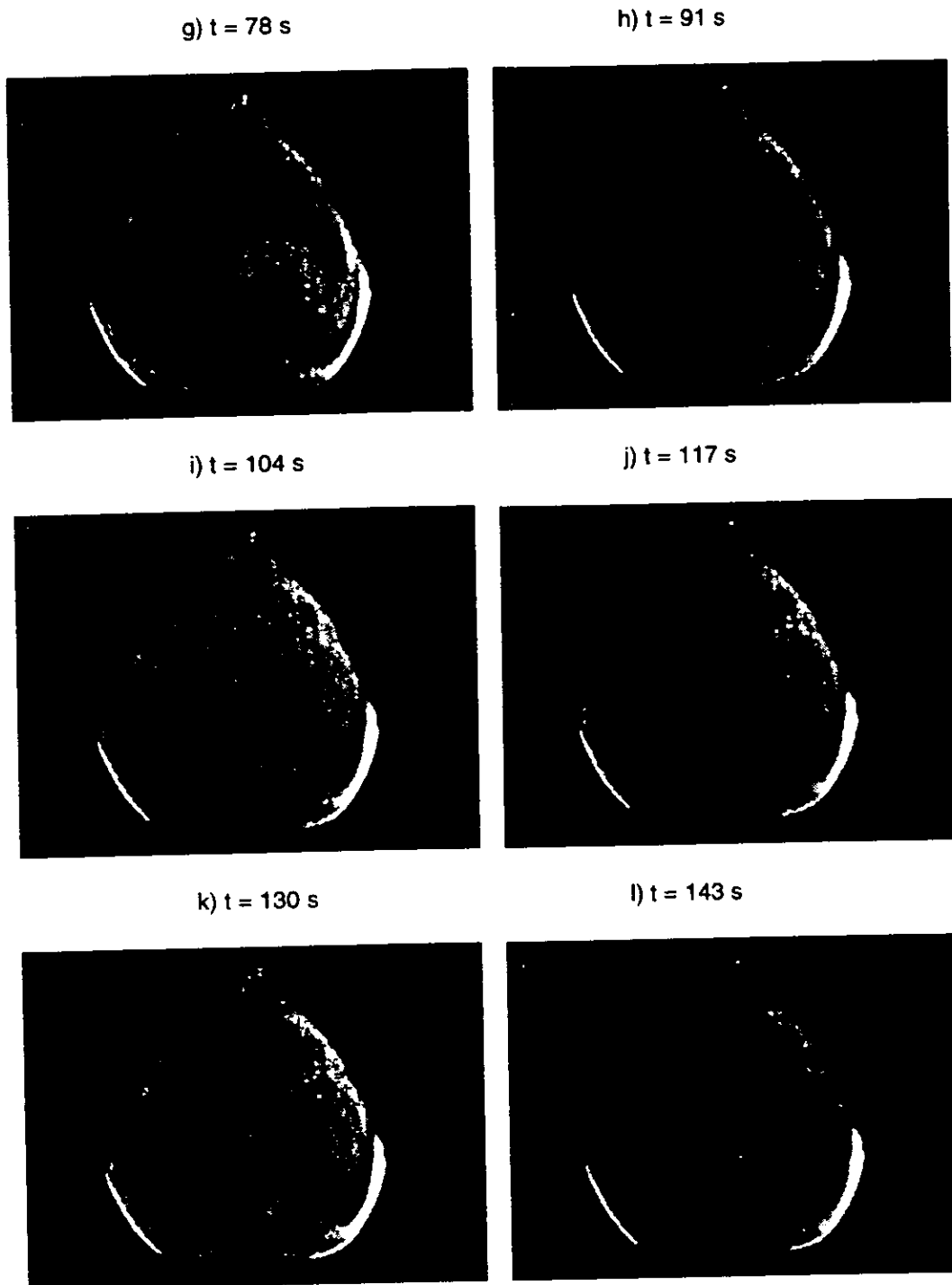


Fig. 25-2 Evolución de la pluma térmica. Una imagen cada 13 segundos.
Cada baño a diferente temperatura.

En este caso, para apreciar la evolución de la pluma térmica, se han presentado imágenes cada 13 segundos, de las cuales se puede inferir que la pluma adopta su forma final después de un tiempo de aproximadamente 130 segundos. La fig. 25a muestra el interferograma correspondiente a las condiciones establecidas al instante en que se empieza a formar la pluma térmica. En esta imagen se aprecia una línea oscura y gruesa que denota una distribución térmica en el interior de la cavidad debido a la influencia que tienen las paredes de diferente temperatura sobre el campo estudiado.

La secuencia posterior de imágenes denota claramente una isoterma que aparece en la base del fondo y que toma una forma gaussiana irregular cargada hacia el lado derecho. Esta isoterma crece conforme la temperatura de la base aumenta, permitiendo la formación de una isoterma adicional debajo de ésta, la que se puede identificar a partir de la fig. 25h y que adopta dimensiones pequeñas al terminar el período de formación de la pluma térmica.

Un análisis de las figuras muestra que la isoterma superior tiene un grosor creciente conforme se acerca a la pared izquierda de la cavidad, esta peculiaridad denota una distribución más uniforme de temperaturas en la sección izquierda de la cavidad. Esto se explica por el hecho de que la diferencia en temperaturas existente entre la pared izquierda y la base es menor que la diferencia en temperaturas entre la pared derecha y la base del modelo, lo que provoca que las líneas que representan las isotermas adquieran un grosor mayor para gradientes térmicos menores.

5.5.2 Inestabilidad de la pluma térmica para una cavidad triangular bajo condiciones de calentamiento en el fondo y paredes a diferente temperatura.

De igual forma que en el experimento en el que las paredes de la cavidad se encuentran a la misma temperatura, en este caso se observó que la pluma térmica generada presenta un comportamiento inestable caracterizado por un movimiento oscilatorio de un lado a otro. La posición de la pluma no varía, pero sí la prominencia superior que se deforma conforme adquiere el movimiento provocado por la fuerza de los flujos que se desarrollan en el interior.

La fig. 26 muestra una secuencia de imágenes en las que se aprecia el movimiento de la pluma. Cada imagen se ha presentado para un tiempo transcurrido de 2 segundos debido a que la inestabilidad adquiere un período oscilatorio de este orden de tiempo.

FALTA PAGINA

No. **46**

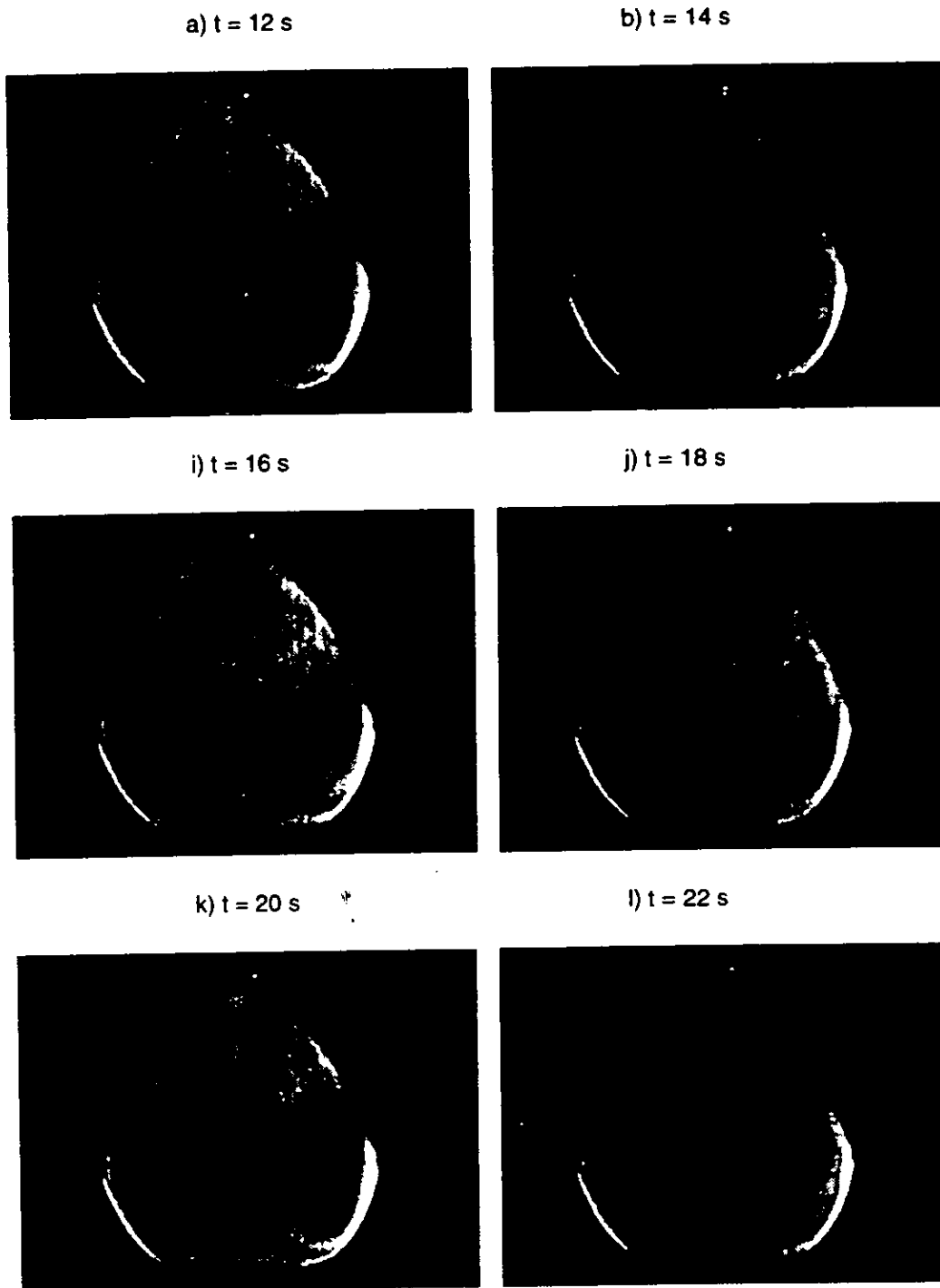


Fig. 26-2 Inestabilidad de la pluma térmica para una cavidad triangular con paredes a diferente temperatura.

Un análisis de las imágenes permite identificar los instantes durante los cuales la pluma se encuentra desviada de la posición central de la cavidad. En las figs. 26e y 26h se aprecia claramente la pluma deslizada hacia la sección derecha de la cavidad, e incluso ésta pierde momentáneamente su forma, como se puede apreciar más claramente en la fig. 26h. El caso en que la pluma se encuentra deslizada hacia la sección izquierda se identifica en las figs. 26f y 26j, denotando además que la forma de la pluma no varía tanto como en el caso en el que se desplaza hacia la sección derecha.

Este comportamiento inestable continúa y disminuye de forma gradual conforme se incrementa la temperatura en la base del modelo, sucediendo lo mismo con su intensidad conforme se alcanzan las condiciones en estado permanente.

5.5.3 Comportamiento de la pluma térmica para una cavidad triangular con calentamiento no uniforme en estado permanente

Una vez que se han establecido condiciones de estado permanente en el interior de la cavidad, la pluma adopta una forma casi invariable con un patrón térmico caracterizado por las isoterma que se muestran en la fig. 27.

En esta figura se aprecia que la forma de la pluma es muy parecida a la que se presentó en los análisis posteriores, la diferencia radica en que la pluma se ha desplazado y se encuentra situada dentro de la sección izquierda de la cavidad. El comportamiento de la pluma bajo estas condiciones se limitó a una pequeña variación en su forma sin perder las características generales observadas, manteniendo además sus dimensiones.

La distribución isotérmica de la fig. 27 muestra una isoterma semicircular cargada hacia la izquierda cerca del fondo del modelo. Este comportamiento denota una tendencia del flujo de calor desprendido de la base a dirigirse hacia arriba por la periferia izquierda de la cavidad, y así lo demuestra la forma de las isoterma que lo preceden. En la sección izquierda inferior de la cavidad, se aprecia una densidad menor de isoterma que en la parte superior, con la característica de tener un grosor mayor y una menor definición. Este comportamiento denota una estratificación no uniforme en la temperatura, en la que los gradientes térmicos son menores en la parte inferior que en la parte superior.

El comportamiento observado en la pluma térmica denota un flujo interno con una influencia más marcada en la cercanía de las paredes del modelo.

Con la finalidad de observar el efecto que tiene sobre la pluma térmica la aplicación de condiciones extremas, mucho mayores a las utilizadas, se incrementó la temperatura del controlador hasta obtener aproximadamente 373 K en la base de la cavidad, manteniendo estas condiciones hasta alcanzar el estado permanente. El interferograma correspondiente a las condiciones anteriores se muestra en la fig. 28.

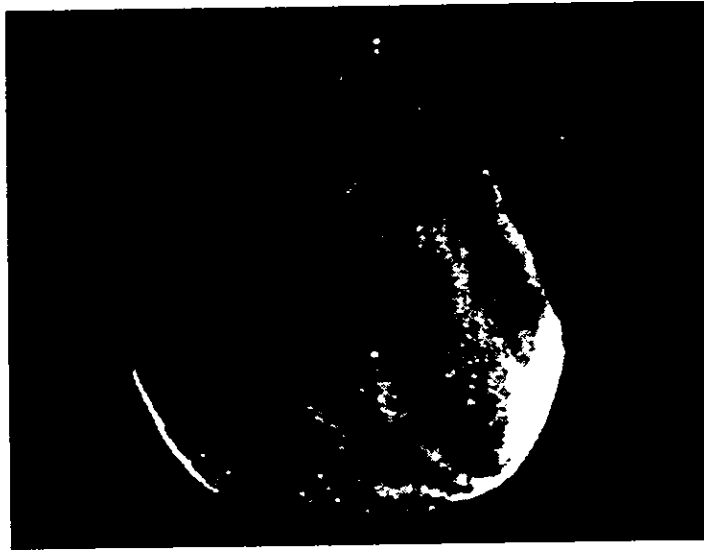


Fig. 27 Cavidad triangular en condiciones de estado permanente.



Fig. 28 Pluma térmica en condiciones extremas de temperatura.

Como era de esperarse, al someter la cavidad a condiciones mayores de temperatura incrementaría la velocidad del flujo de aire en su interior. Este hecho provoca que la pluma se deforme perdiendo su forma semicircular, aumentando la concentración de las isotermas en la sección izquierda de la cavidad, denotando una diferencia mayor en temperaturas. El flujo impuesto en su interior obliga a un mayor mezclado, creando una sección más uniforme en las inmediaciones de la cara de baja temperatura.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

El trabajo experimental desarrollado permite apreciar la utilidad y potencialidad que un interferómetro holográfico representa en la visualización de fluidos como una técnica no intrusiva. Los resultados arrojados muestran que es posible conocer los aspectos generales del medio estudiado, y así determinar los puntos más interesantes que merecen un estudio más profundo, ya sea con esta técnica aislada o bien aunado al uso de técnicas tradicionales de medición como lo es con termopares.

Con la información que proporciona un interferómetro, la ubicación de los termopares se hace de una manera más acertada, además de que es posible verificar si el flujo es modificado o no.

Se puede usar una mayor densidad de uniones de termopar en las regiones de mayor diferencia de temperaturas que en las regiones más uniformes. Sin contar con dicho equipo, se tiene que realizar una primera medición del campo estudiado, y a partir de su análisis, reubicar los puntos de medición a fin de detallar el comportamiento en ciertas regiones, proceso que podría llevar varias sesiones de trabajo, y de cualquier forma, no es posible saber en que medida los termopares interfieren en el experimento.

La medición de la temperatura con un par de termopares hizo posible caracterizar la totalidad del campo térmico estudiado, como se mostró en el caso de la cavidad rectangular. Estas mediciones proporcionaron la información de la diferencia de temperaturas entre las isotermas, que asociado a su distribución, permite conocer los valores en cualquier sección del interferograma.

Además de ser una herramienta muy valiosa de visualización, se mostró que un sólo interferograma permite caracterizar las temperaturas del medio estudiado, tal y como se hizo con el experimento del desprendimiento de calor de superficies al ambiente. De otro modo, se requeriría un gran número de termopares y equipo adicional de medición para obtener los mismos resultados.

Los diferentes casos estudiados con el interferómetro muestran que este equipo permite de una manera muy fácil corroborar resultados analíticos. Tal es el caso de las gráficas elaboradas para el experimento de la cavidad rectangular con pérdidas al ambiente, en donde se comprueba

experimentalmente la abrupta caída en la temperatura que se espera en la cercanía de la superficie del modelo, así como la distribución no uniforme del calor desprendido.

Otro aspecto que se pudo comprobar es el que se refiere al comportamiento esperado en el flujo en el interior de cavidades calentadas. De acuerdo a la teoría, una cavidad rectangular, con relación de aspecto menor a uno, calentada en su base, formará un flujo en su interior que adopta la forma de rollos de convección (**Shadid y Goldstein, 1990; Flack R., 1980**). Esto se presenta en el interferograma de franja infinita mostrado en donde se puede inferir un flujo simétrico dentro de la cavidad, denotado por la formación de una pluma térmica central con simetría lateral.

De la misma forma, se pudo comprobar experimentalmente el comportamiento del flujo en una cavidad triangular cuyas paredes se encuentran a la misma temperatura, pero su base en condiciones térmicas diferentes a las paredes. En este caso, se espera la formación de un par de celdas convectivas en su interior (**Flack R., 1980**), con la posible presencia de una celda que domina sobre la otra. Esto se demostró en los interferogramas presentados en donde se establecieron condiciones de calentamiento en el fondo y paredes a temperatura ambiente, mostrando la formación de dos celdas, en donde una de ellas domina y confina la segunda celda a dimensiones menores.

El caso estudiado de la cavidad triangular con calentamiento en el fondo y paredes a diferente temperatura concuerda con lo esperado, ya que en la literatura se reporta la formación de una sola celda dominante al encontrarse las paredes en condiciones distintas (**Flack R., 1980**). Esto se pudo observar en los experimentos realizados, en donde el campo térmico definido permite inferir la formación de una única celda en el interior de la cavidad.

Un comportamiento adicional que se pudo observar, y que con un montaje con termopares sería muy complejo, es el que se refiere a la inestabilidad observada en el interior de las cavidades. La literatura demuestra que existen condiciones para las cuales el flujo tiene un comportamiento estable, y que al ser rebasadas se presentan inestabilidades (**Poulikakos y Bejan, 1983; Salmún, 1995**). Se ha demostrado que los registros en cinta de los interferogramas, asociados a una escala de tiempo, permiten obtener información complementaria para estudios de esta naturaleza. No se profundizó en este aspecto debido a que el fenómeno de la inestabilidad es muy complejo y merece un estudio particular muy detallado.

Del caso del experimento con la cavidad triangular para condiciones normales y extremas, se pudo comprobar que es posible estimar los cambios inducidos

en el campo térmico de su interior al variar las condiciones externas impuestas al modelo. Esto se logra estimando los cambios de posición de las isotermas para cada condición establecida. La información obtenida, asociada con resultados analíticos es de gran valía cuando se estudia la variación de los coeficientes convectivos y los fenómenos de inestabilidad.

Se comprobó la existencia de una relación entre los campos de temperatura y los campos de velocidad, ya que en algunos casos es posible inferir el comportamiento del flujo establecido partiendo del análisis de los campos térmicos, como se observó en la mayoría de los interferogramas que se presentaron.

Los modelos construidos, así como el controlador de temperatura diseñado, fueron adecuados, ya que permitieron establecer las condiciones necesarias para observar los comportamientos esperados en las cavidades; aunque si se desea tener un mejor control de las temperaturas durante los experimentos, se habrán de incluir aislamientos térmicos en las paredes, a fin de disminuir las pérdidas que pudieran afectar las mediciones y el estado de los interferogramas.

Finalmente, es conveniente mencionar que para lograr este trabajo se abordaron aspectos multidisciplinarios que permiten diseñar montajes experimentales complejos, y sobre todo, que posibilitan la solución de problemas específicos. Cada uno de estos aspectos se puede refinar, y adecuar a las necesidades *ad hoc*, para que los estudios de los fenómenos de transporte aporten información adicional, mediante el uso de la técnica descrita y de tecnologías computacionales actuales, que proporcionan un gran potencial de registro y análisis de la información.

BIBLIOGRAFÍA

1. Baum V., Bairamov R. "Heat and mass transfer processes in solar stills of hotbox type". *Solar Energy*. Vol. 8, n. 3, pp. 78-82 (1964).
2. Burner A. "A holographic interferometer system for measuring density profiles in high-velocity flows". *International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities*. pp. 140-5 (1973).
3. Deason V., Reynolds L., McIlwain M. "Velocities of gases and plasmas from real-time holographic interferograms". *Optical Engineering*. Vol. 24, n. 5, pp. 735-740 (1985).
4. Diez G., Dolz P., Buendia G. "Holographic interferometry applications to the remote determination of the temperature field around a metallic cylinder". *Anales de Física*. Serie B. Vol. 77, n. 2, pp. 87-91 (1981).
5. Farrell P., Springer G., Vest C. "Heterodyne holographic interferometry: Concentration and temperature measurements in gas mixtures". *Applied Optics*. Vol. 21, n. 9, pp. 1624-7 (1982).
6. Flack R., Konopnicki T., Rooke J. "The measurement of natural convective heat transfer in triangular enclosures". *International Journal of Heat Transfer*. Vol. 101, pp. 648-654 (1979).
7. Flack R. "The experimental measurement of natural convection heat transfer in triangular enclosures heated or cooled from below". *International Journal of Heat Transfer*. Vol. 102, pp. 770-772 (1980).
8. Hamady F., Lloyd J., Yang K., Yang H. "A study of natural convection in a rotating enclosure". *International Journal of Heat Transfer*. Vol. 116, pp.136-143 (1994).
9. Kashiwagi T., Ohlemiller T., Kashiwagi T., Jones W. "Thermal radiative ignition of liquid fuels by a CO₂ laser". *Air Force Office of Scientific Research* (1982).

10. Kogelschatz U. "Holography and high voltage circuit breakers". *Laser und Elektro-optik*. Vol. 6, n. 2, pp. 18-19 (1974).
11. Kurosaki Y., Kashiwagi T. "Visualization of thermal behavior of fluid by laser holographic interferometry". *Exp. Thermal Fluid Sci.* Vol. 3, n. 1, pp. 87-107 (1990).
12. Kurosaki Y., Kashiwagi T., Kovbayashi H., Uzuhashi H., Xue-Zhong T. "Experimental study of heat transfer of parallel louvered fins through laser holographic interferometry". *Transactions of the Japanese Association of Refrigeration*. Vol. 2, n. 2, pp. 31-9 (1985).
13. Marn J., Issacci F., Catton I. "Measurements of temperature and concentration fields in a rectangular heat pipe". *Thermophysics and Heat Transfer Conference* (1990).
14. Meserve, Gregory S. "Holographic interferometric survey of boundary layer transition in an axisymmetric free convection thermal boundary layer". *Master's thesis* (1979).
15. Nomura, Tomohiro, Nishimura N., Kashiwagi T., "Characteristics of evaporation of water into superheated steam". *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*. Part B, Vol. 55, n. 520, pp. 3746-3752 (1989).
16. Peterson F. "Species-controlled condensation in enclosures". *Annual Review of Heat Transfer*. Chapter five. pp. 247-285.
17. Pilinyi A., Tanos E. "Investigation of cylindrically symmetrical high-temperature gas flows by means of holographic interferometry". *Elektrotechnika*. Vol. 70, n. 9, pp. 347-52 (1977).
18. Poulikakos D., Bejan A. "The fluid mechanics of an attic space". *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 131, pp. 215-269 (1983).
19. Salmún H. "Convection patterns in a triangular domain". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 38, pp. 351-362 (1995).

20. Sernas V., Fletcher L., Rago C. "An interferometric study of natural convection in rectangular enclosures of aspect ratio less than one". ***AICh-ASME Heat Transfer Conference*** (1975).
21. Shadid J.N., Goldstein R.J. "Visualization of longitudinal convection roll instabilities in an inclined enclosure heated from below". ***Journal of Fluid Mechanics***. Vol. 215, pp. 61-84 (1990).
22. Tsang-Yuan L., Shou-Shing H. "Natural convection of opposing/assisting flows in vertical channels with asymmetrically discrete heated ribs". ***International Journal of Heat and Mass Transfer***. Vol. 33, n. 10, pp. 2295-309 (1990).
23. Vizkanta R., Behnia M. "Experimental and analytical study of heat transfer and mixing in thermally stratified buoyant flows". ***International Journal of Heat and Mass Transfer***". Vol. 25, n. 6, pp. 847-861 (1982).
24. White A., Haflinger D. "Applications of holographic methods to the measurement of flames and particulate. Vol. 1 (1974).
25. White A., Matthews B. "Laser holography study of oil-fired burner combustion". ***TRW Systems Group*** (1971).
26. Zhiglinskii A., Kund G., Morozov A., Samokhin A., "Holographic apparatus for plasma diagnosis at many wavelengths simultaneously". ***Instruments and Experimental Techniques***. Vol. 31, n. 6, pp. 1533-1536 (1989).

ANEXO A

PROCEDIMIENTO DE REVELADO DE LA PLACA HOLOGRÁFICA

El revelado de la placa holográfica se efectúa mediante un procedimiento análogo al utilizado en el revelado de películas fotográficas comunes. Se utilizaron una serie de reactivos cuya preparación se hizo de acuerdo a las instrucciones del fabricante de los mismos. A continuación se da una lista de los reactivos:

Revelador Kodak D19
Revelador "A"
Revelador "B"
Revelador "A+B"
Solución blanqueadora
Photo-flo

El revelador D19 es un químico que se encuentra en polvo y se preparó con agua destilada. Una vez hecha la mezcla, se colocó en una botella de color oscuro para evitar su deterioro a causa de la luz.

El revelador "A" se preparó con 5 gramos de ácido pirogálico y 500 mililitros de agua destilada. La mezcla se colocó en una botella de color oscuro.

El revelador "B" consistió en 30 gramos de carbonato de sodio y 500 mililitros de agua destilada. Se mezcló y se colocó en una botella de color oscuro.

La solución A+B se preparó mezclando cantidades iguales de solución A y solución B en tres tantos de agua.

La solución blanqueadora se preparó mezclando 5 gramos de dicromato de potasio, 80 gramos de bisulfato de sodio y 1 litro de agua destilada.

El *Photo-flo* es un líquido que se utilizó para prevenir la formación de manchas en la placa holográfica durante el proceso de secado.

Se utilizó una placa holográfica rígida de Kodak con dimensiones de 2.5" de alto por 2.5" de ancho y un espesor de 0.06". Una de sus caras está cubierta por una emulsión fotográfica sensible. Estas placas se encuentran en una caja hermética protegida de la luz.

Para evitar el velado de la placa durante el proceso de revelado, se utilizó un foco de luz verde con un controlador para variar la potencia y disminuir la intensidad a un nivel suficiente para manipular los reactivos.

El procedimiento de toma y revelado se hizo en un cuarto oscuro en donde se cuenta con una toma de agua corriente.

La exposición de la placa a la luz del rayo láser se controló mediante el obturador automático ajustado para un tiempo de exposición de 2 s.

El procedimiento utilizado para el revelado de la placa fue el siguiente:

Se colocó la placa en el recipiente que contiene la solución A+B agitando durante un tiempo entre 15 y 45 segundos. El proceso se continuó hasta obtener un oscurecimiento de la placa de un 30% a 40%. Después se procedió a enjuagarla con agua destilada durante un tiempo de 3 minutos. Posteriormente se pasó la placa al recipiente con revelador D19 durante un tiempo de 25 a 40 segundos hasta obtener una oscuridad de 80% a 90%. Se sacó de dicho recipiente y se enjuagó con agua destilada por un tiempo de 3 a 5 minutos.

El siguiente paso consistió en introducir la placa en el blanqueador durante un tiempo de 30 a 95 segundos hasta que la placa adquiere un color café, enjuagando posteriormente con agua destilada por un tiempo de 3 a 5 minutos.

Como paso final se colocó la placa en *photo-flo* durante unos segundos.

La fig. A1 muestra los tonos que adquirió la placa en cada paso del revelado.

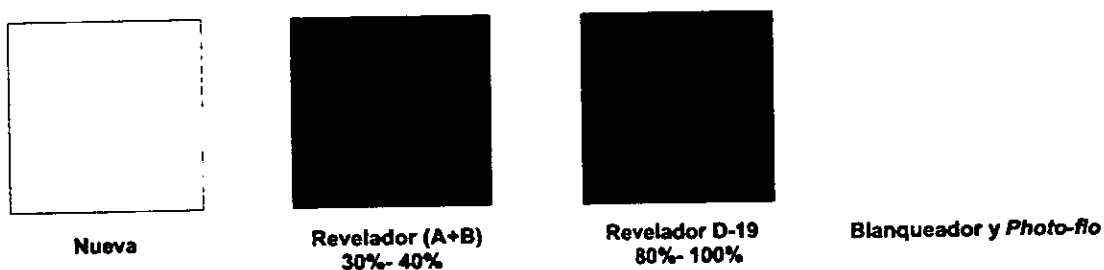


Fig. A1 Tonalidades que adquiere la placa holográfica durante el proceso.

Una vez que se completó el proceso anterior, se colocó la placa en posición inclinada sobre un papel absorbente para su escurrimiento y secado. Este proceso duró aproximadamente 30 minutos a temperatura ambiente.

Terminado el proceso de revelado se observa una figura circular en la placa que representa el área expuesta a los rayos de luz, esto se muestra en la fig. A2.

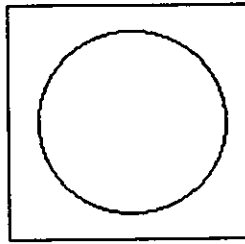


Fig. A2 Apariencia final de una placa revelada.

ANEXO B

DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN Y CONTROL DISEÑADOS PARA LOS EXPERIMENTOS

A continuación se presenta una breve descripción técnica de los dispositivos de medición y control que se diseñaron para efectuar los experimentos que se describen en este trabajo. Para cada uno de ellos se incluye el esquema eléctrico diseñado, así como una descripción en la que se hace referencia a los elementos más importantes que lo componen.

B1. Controlador automático de temperatura

El dispositivo para el control de la temperatura aplicada a los modelos se diseñó con componentes de estado sólido. El control de la energía aplicada al elemento calefactor se realiza por medio de un TRIAC, Q6040J7, que se muestra en la fig. B1. Éste se dispara con un optoacoplador con salida a TRIAC, MOC3031, manejado en su entrada por un circuito comparador.

Las entradas del comparador utilizan como señales de referencia un punto de ajuste establecido por un reóstato, y un arreglo resistivo, que determinan la temperatura a la que se activará la salida de energía para el calefactor. El segundo punto de referencia queda determinado por un termómetro de estado sólido, LM35, que se encuentra instalado junto al elemento calefactor a fin de medir su temperatura y establecer el punto de operación del módulo de calefacción.

Los voltajes de alimentación de los circuitos se obtienen a través de una resistencia de potencia, y un arreglo de diodos en configuración de puente rectificador de onda completa. El voltaje de salida se filtra y se hace pasar por un circuito regulador que proporciona el voltaje necesario.

B2. Medidor de intensidad luminosa

La fig. B2 muestra el esquema eléctrico utilizado para la calibración del equipo. La medición de la intensidad del láser se hizo mediante un circuito elemental con fotodiodo. Se ha conectado una resistencia en el circuito serie que se alimenta con una batería. Se utiliza un voltmetro en paralelo con la resistencia para obtener las mediciones relativas de la luz que incide sobre el fotodiodo.

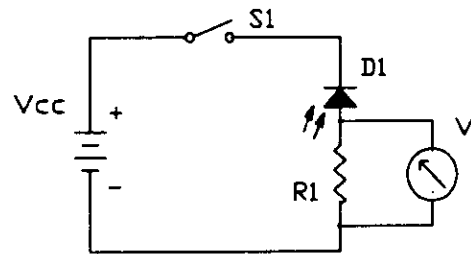


Fig. B2 Arreglo utilizado para la medición de la intensidad del láser.

El paso de la luz que sale del equipo láser se controla mediante una placa deslizable acoplada mecánicamente a un electroimán, manejado por un transistor conmutado. La duración del pulso aplicado al transistor se establece mediante un circuito temporizador LM555, y se controla mediante la combinación de los componentes C2 y un reóstato de 10 vueltas lo que permite un ajuste muy fino de la temperatura del dispositivo.

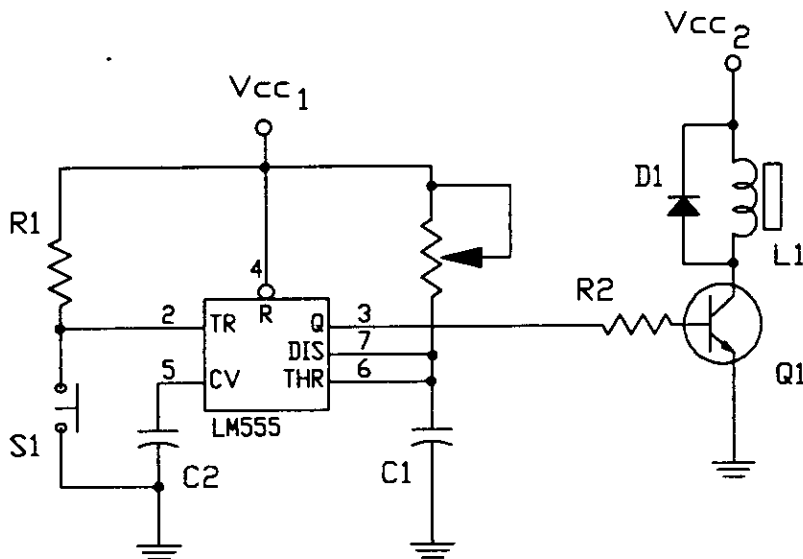


Fig. B3 Esquema eléctrico del obturador automático.