

03073

2

lej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES
UNIDAD ACADEMICA DE LOS CICLOS PROFESIONALES Y DE POSGRADO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

LABORATORIO DE ENERGIA SOLAR

ESPECIALIZACION EN HELIODISEÑO Y MAESTRIA EN ENERGIA SOLAR

ESTUDIO DE LA CONVECCION NATURAL TRANSITORIA EN
UN SISTEMA DOBLEMENTE DIFUSIVO

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN ENERGIA SOLAR PRESENTA:

CECILIA CUEVAS ARTEAGA

JUNIO 1991

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio teórico y experimental de la convección natural doblemente difusiva en estado transitorio en un tanque con geometría de prisma rectangular con una pared inclinada y superficie libre. La frontera lateral derecha (pared inclinada) se mantiene a una temperatura alta respecto a la temperatura inicial del fluido, la temperatura de la superficie libre se considera igual a la temperatura ambiente, el resto de las fronteras son adiabáticas. El análisis experimental se realiza en un prototipo construido para el propósito. El fluido de trabajo es una mezcla salina de cloruro de sodio (NaCl) y agua con un número de Prandtl igual a 6.0. El gradiente de temperatura usado es de 5.0°C , por lo que el número de Rayleigh es de $1.38\text{E}+07$. Se utiliza la técnica fotográfica para el análisis cualitativo y cuantitativo de las características del flujo. En particular, se determinan el campo de velocidades y el patrón de flujo. El estudio teórico se hace resolviendo numéricamente las ecuaciones de balance de masa, cantidad de movimiento, energía y especies químicas, usando para esto el código PHOENICS. Este estudio se resuelve para una geometría bidimensional de paredes verticales a temperatura constante y adiabáticas, explorando números de Rayleigh entre $5.53\text{E}+06$ y $2.76\text{E}+07$. Se resuelven dos condiciones iniciales de concentración una con distribución tipo escalón y otra con distribución tipo rampa, esta última semeja el cuerpo de un estanque solar y es similar a la observada experimentalmente. Se determinan campos de velocidad, temperatura y concentración como función de la posición y del tiempo.

Los resultados muestran la formación de una celda convectiva en las regiones a concentración constante, y una zona de velocidades nulas en la región de gradiente salino lineal, encontrándose que el patrón de flujo obtenido experimentalmente coincide cualitativamente con el resultado numérico para un mismo número de Rayleigh térmico. En el trabajo se discuten las diferencias cuantitativas para las dos geometrías en estudio.

INDICE

CAPITULO	1 INTRODUCCION.....	4
	1.1 Motivación.....	4
	1.2 Conceptos generales.....	9
	Mezclas químicas.....	9
	Convección natural doblemente difusiva.....	9
	1.3 Antecedentes.....	12
	Sistemas homogéneos.....	12
	Sistemas doblemente difusivos.....	14
	1.4 Objetivos.....	18
	1.5 Presentación.....	19
CAPITULO	2 MODELO TEORICO.....	20
	2.1 Introducción.....	20
	2.2 Modelo teórico.....	20
	Ecuaciones gobernantes.....	20
	Ecuaciones de balance de masa.....	20
	Ecuación de balance de cantidad de movimiento.....	23
	Ecuación de balance de energía.....	23
	Relaciones auxiliares.....	25
	Fuerzas de cuerpo.....	25
	2.3 Condiciones iniciales y de frontera.....	26
	2.4 Ecuaciones adimensionales.....	28
	2.5 Condiciones a la frontera adimensionales.....	29
	2.6 Definición de parámetros adimensionales.....	30
	Número de Rayleigh térmico.....	30
	Número de Rayleigh salino.....	31
	Número de Prandtl.....	31
	Número de Lewis.....	33
	2.7 Método de solución.....	34
	2.8 Características de la solución numérica.....	37
CAPITULO	3 RESULTADOS TEORICOS.....	46
	3.1 Introducción.....	46
	3.2 Análisis de la solución analítica de la ecuación de difusión de especies químicas.....	47
	3.3 Análisis de la solución numérica del fenómeno de convección natural para un fluido homogéneo.....	51
	3.4 Análisis de la solución numérica del fenómeno doblemente difusivo con distribución de concentración inicial tipo escalón.....	52
	gradiente de temperatura 5°C (Rt=1.38E+07).....	52
	gradiente de temperatura 2°C y 10°C.....	78
	(Rt=5.53E+06 y Rt=2.76E+07)	
	3.5 Análisis de la solución numérica del fenómeno doblemente difusivo con distribución de concentración inicial tipo rampa.....	83

CAPITULO 4 EQUIPO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	100
4.1 Equipo experimental.....	100
4.2 Método de experimentación.....	106
4.3 Método de análisis (técnica fotográfica).....	109
CAPITULO 5 RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	112
5.1 Introducción.....	112
5.2 Análisis de resultados.....	112
5.2.1 Resultados de experimentos realizados con.....	114
tinta de permanganato de potasio	
5.2.2 Resultados de experimentos realizados.....	119
con partículas de estereato de aluminio	
CAPITULO 6 DISCUSION Y CONCLUSIONES.....	144
APENDICE.....	149
BIBLIOGRAFIA.....	164
LISTA DE VARIABLES.....	168

CAPITULO I INTRODUCCION

1.1 MOTIVACION.

El uso y aprovechamiento de fuentes de energía renovables se ha vuelto cada vez mas importante debido a las exigencias de energía que en tiempos actuales se reclama. Esto se ha observado principalmente en requerimientos energéticos para el confort de casas y edificios, uso doméstico, uso industrial, y generación de energía eléctrica. La energía solar se presume como una fuente alterna con grandes expectativas a futuro, ya que se ha desarrollado un número apreciable de dispositivos que son capaces de aprovechar la radiación solar transformándola en energía térmica o en energía eléctrica. Algunos dispositivos que convierten directamente la energía solar en energía eléctrica son los llamados celdas fotovoltaicas; entre los dispositivos que se utilizan para la conversión de energía solar en energía térmica se tienen los colectores solares planos, concentradores parabólicos, estanques solares, etc.

Los estanques solares como sistemas de colección y almacenamiento de energía aplicados a la generación de energía térmica ó eléctrica han tenido gran desarrollo en las últimas décadas. Algunos países como Israel, Estados Unidos y Australia han diseñado y construido estanques solares acoplados a plantas de generación eléctrica que actualmente están operando con resultados aceptables, otros países como Canadá y Arabia Saudita han iniciado estudios a nivel experimental y tienen proyectos de diseño y desarrollo. En México ya se han desarrollado algunos de los dispositivos mencionados anteriormente. El grupo de Fuentes no Convencionales de Energía del instituto de Investigaciones Eléctricas en Cuernavaca Morelos, diseña y construye un estanque experimental cuya área superficial es de $1000.0m^2$ en Zacatepec Morelos, y tendrá una capacidad de generación de 10KW.

Un estanque solar es un sistema doblemente difusivo (térmico y salino), que se utiliza para la captación y almacenamiento de energía solar. Está constituido por un cuerpo de agua que contiene sal en solución con la siguiente estructura: a) región superior convectiva formada por un fluido de baja salinidad y temperatura homogéneas, su espesor mide de 0.1 a 0.2m, b) región intermedia no convectiva formada por un gradiente salino y térmico aproximadamente lineal que se incrementa con la profundidad, su espesor mide de 0.5 a 1.2m y c) una región inferior convectiva de alta salinidad (salmuera) y temperatura homogéneas, su espesor está en el rango de 0.3 a 0.6m. La zona superior del estanque recibe la radiación solar, absorbiendo parte de ella y transmitiendo la mayor cantidad a zonas subsecuentes. La zona de gradiente actúa como un aislante transparente y permite que se desarrollen altas temperaturas en la zona inferior, la cual tiene como objetivo almacenar la energía que ha llegado hasta ella. La Figura 1.1 muestra esquemáticamente las regiones de un estanque y los perfiles de salinidad y de temperatura. La Figura 1.2 presenta los flujos de energía típicos en un estanque solar suponiendo que la región inferior convectiva está aislada. El principio de

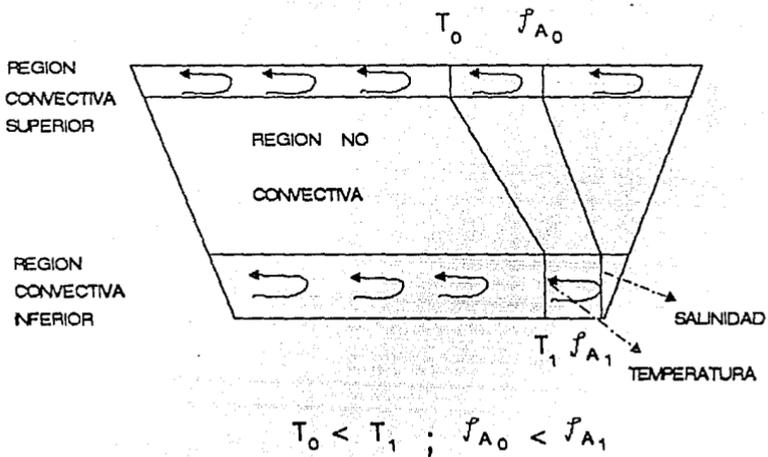


FIGURA 1.1 REGIONES DE UN ESTANQUE SOLAR Y PERFILES DE SALINIDAD Y TEMPERATURA

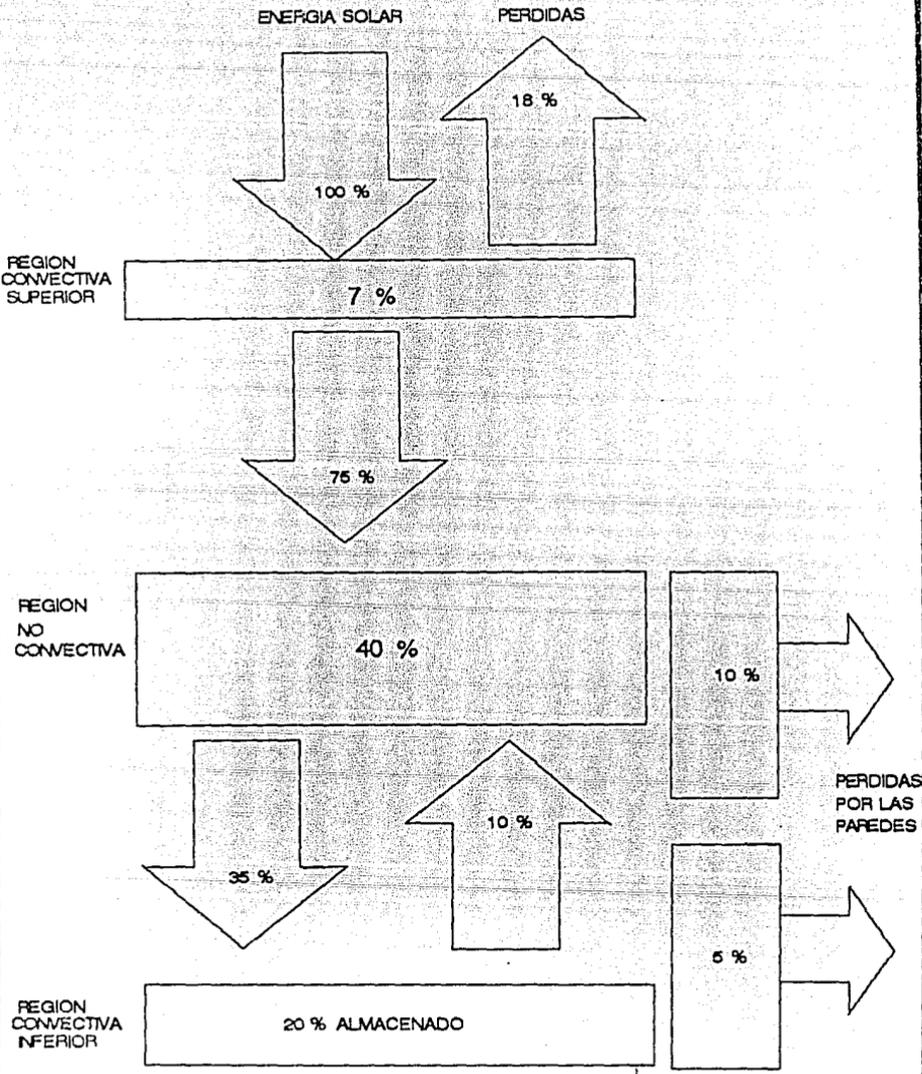


FIGURA 1.2. FLUJOS DE ENERGIA DE ENTRADA Y SALIDA DE UN ESTANQUE SOLAR.

operación de un estanque solar puede resumirse de la siguiente manera: la radiación solar incidente absorbida en el fluido salino es convertida a energía térmica y almacenada como calor sensible. En un sistema homogéneo, el calor sensible es devuelto a la atmósfera debido a fenómenos de convección natural. En el estanque solar esto no ocurre debido a que el gradiente salino inhibe la convección natural. La energía almacenada puede ser extraída de la zona de almacenamiento (zona convectiva inferior) al recircular la salmuera caliente a través de un intercambiador de calor. Posteriormente, esta energía es utilizada en procesos industriales de calor, generación de energía eléctrica y uso doméstico. La existencia del gradiente salino es el elemento esencial para la operación del estanque solar y debe cumplir con criterios de estabilidad que están ampliamente estudiados aunque no satisfactoriamente entendidos [1].

Algunos de los problemas que se pueden encontrar en los estanques solares y que producen inestabilidades hidrodinámicas y térmicas son las siguientes:

1) Erosión de la zona de gradiente: Se ha observado que el gradiente de salinidad requerido para mantener las fronteras de la zona de gradiente estacionarias y el espesor de la misma constante, es del orden de cinco veces más grande que el gradiente salino que se requiere para la estabilidad interna [2]. Cuando el gradiente de salinidad cerca de las fronteras es inadecuado, la zona de gradiente se erosiona paulatinamente, incrementando el espesor de la zona convectiva adyacente a expensas de la zona de gradiente [3]. Esta conducta se observa más claramente en la zona superior convectiva, en la cual los procesos de erosión son favorecidos por la acción del viento. Por otra parte cuando llegan a suscitarse gradientes de temperatura muy grandes en la zona inferior convectiva, esta zona se erosiona debido a los movimientos convectivos generados en la frontera [4].

2) Pérdidas de Calor: Las pérdidas de calor que pueden presentarse en un estanque solar son a través de la superficie libre, paredes laterales y fondo del estanque. Las pérdidas de calor por la superficie libre se originan por convección, radiación y evaporación; las pérdidas por las paredes laterales y el fondo se producen solo por conducción. Se han hecho algunos estudios numéricos para analizar tales pérdidas [5], pero en la práctica sigue siendo difícil diseñar un buen sistema de aislamiento térmico.

3) Suspensión de objetos extraños: La radiación que llega a la superficie del estanque es atenuada por absorción y dispersión al atravesar las regiones del estanque, por tanto solo es posible que se transmita parte de la radiación solar hacia la zona de gradiente y posteriormente a la zona inferior. Se requiere la mayor transparencia posible del fluido para obtener mayor almacenamiento de energía. Un problema cotidiano de los estanques solares es la suspensión y acumulación de objetos extraños como son: polvos, basura, algas, bacterias y materias de desecho, que afectan grandemente la colección de energía, ya que una cantidad

de la energía solar atrapada es absorbida y dispersada por estos materiales, disminuyendo con ello el paso de la energía a niveles más profundos del estanque y por tanto la energía útil que pueda ser extraída.

4) Inestabilidades originadas por calentamiento lateral: Se han observado inestabilidades en la región de gradiente debidas a movimientos convectivos horizontales que se originan por calentamiento lateral. Estas inestabilidades consisten principalmente en un movimiento que trae como consecuencia el mezclado de la zona de gradiente que puede provocar el rompimiento del proceso de operación del estanque. Como ya se mencionó anteriormente, un elemento esencial en la operación de un estanque solar es la zona de gradiente salino estable, de aquí la importancia en el estudio de este tipo de efectos que se originan en las paredes inclinadas.

De las inestabilidades de los estanques solares originadas por calentamiento de las paredes inclinadas surgió la motivación para hacer el estudio que aquí se presenta. Aunque ha habido estudios recientes en esta dirección, todos ellos han sido planteados solo experimentalmente en un rango pequeño de parámetros. En esta tesis se hace el estudio de la dinámica de un sistema doblemente difusivo y se analizan algunos aspectos de su estabilidad. Se observa el fenómeno desde un punto de vista experimental y numérico, lo cual representa una contribución original al problema tratado. Por otra parte no sólo se estudia la zona de gradiente lineal, sino el conjunto formado por dos zonas superior e inferior constituidas por fluidos homogéneos, y una zona intermedia que presenta un gradiente salino, esto hace del problema un sistema que permite hacer conclusiones sobre el comportamiento de las interfases que posee un estanque solar.

Se logró concluir el trabajo experimental del sistema que simula un estanque solar con geometría de pared inclinada, numéricamente se resuelve este mismo sistema para una geometría con paredes laterales verticales. Los resultados teóricos muestran tres casos con distintos gradientes de temperatura, presentando una comparación que permite hacer conclusiones interesantes del comportamiento del fenómeno. Adicionalmente se estudió el caso de fluido homogéneo para la geometría de paredes verticales y se presentan los resultados obtenidos. Hubiera sido deseable hacer un estudio comparativo teórico y experimental del sistema formado por las tres regiones que semejan un estanque solar, sin embargo debido a la complejidad en la simulación numérica no se logró este último objetivo, aunque es importante mencionar que como trabajo a futuro, esta tesis representa una herramienta muy valiosa para su conclusión.

Antes de continuar con la descripción de los capítulos subsecuentes, es pertinente revisar algunos conceptos que se utilizan a lo largo de esta tesis y que contribuyen a un mejor entendimiento del fenómeno en estudio.

1.2 CONCEPTOS GENERALES.

Mezclas químicas:

Es conveniente hacer una definición desde el punto de vista químico de lo que es una "solución", ya que es un concepto fundamental para este trabajo. Una solución es un sistema homogéneo de dos o más sustancias cuya composición puede variar continuamente dentro de ciertos límites [6]. En particular una solución como la utilizada en este estudio está constituida por un sólido o soluto (NaCl) y un líquido o solvente (H₂O). Este tipo de solución se denomina binaria. Generalmente el solvente es el compuesto que se halla en mayor cantidad. De acuerdo a la teoría cinética molecular, una sustancia disuelta es dispersada dentro de las moléculas, átomos o iones de otra sustancia. Existen dos tipos de soluciones, una donde el soluto es una sustancia de estructura molecular covalente y la otra donde el soluto es un compuesto iónico. En el caso del cloruro de sodio y agua se tiene una solución del segundo tipo.

Un compuesto electrovalente o iónico consiste de una red de iones positivos y negativos, los cuales se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas. Para que la sustancia se disuelva en un líquido estas fuerzas deben ser debilitadas para que los iones queden libres de su red y sean capaces de moverse independientemente. La Figura 1.3 ilustra la disolución de cloruro de sodio en agua.

La composición cuantitativa de la solución es comúnmente expresada en términos de la concentración del soluto. Existen varias formas de presentar tal composición, aquí se utiliza aquella que se expresa en términos del peso de soluto por volumen de solución. Si A es el soluto cloruro de sodio y B es el solvente agua, la solución está constituida por A y B, cuya composición es la masa de A dividida entre el volumen de A mas B, esta magnitud se denotará por ρ_A y se denominará indistintamente concentración o salinidad. A partir de este momento esta solución será referida como "mezcla", esto es para evitar confusión con la palabra solución que es mencionada muchas veces en otro contexto. Una mezcla puede tener una concentración mayor a cero ó menor o igual a una concentración máxima, la cual se denomina de saturación. La concentración de saturación está en función directa de la temperatura. Generalmente hablando, la solubilidad de sólidos se favorece con el incremento de la temperatura. Para el caso particular de la mezcla de NaCl-H₂O la variación es apenas perceptible en un rango muy grande de temperatura (4.0% ante una variación de 80°C). En este trabajo los gradientes de temperatura de interés son como máximo 10.0°C, y por consiguiente puede suponerse que la solubilidad del cloruro de sodio en agua permanece invariable.

Convección natural doblemente difusiva:

En sistemas doblemente difusivos la densidad se modifica por gradientes térmicos y gradientes de concentración debidos a la existencia de una o más especies químicas que no reaccionan entre sí pero que se encuentran en estado de disolución. En estos casos,

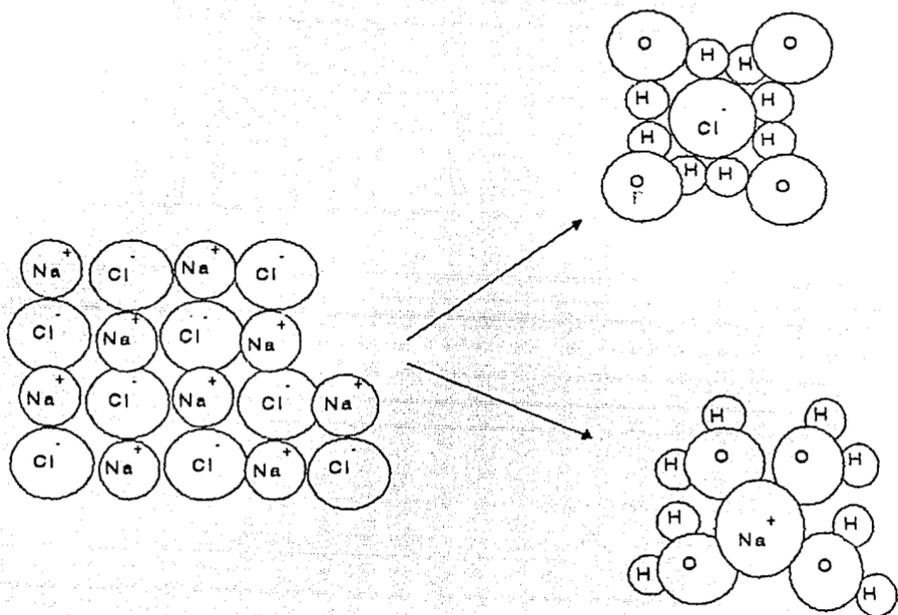


Figura 1.3 Disolución del cloruro de sodio en agua. Los átomos positivos de hidrógeno son atraídos por los iones Cl^- mientras que los átomos negativos de oxígeno son atraídos por los iones Na^+

la densidad (ρ) de la mezcla es una función de dos variables, la temperatura (T) y la concentración de la especie química A (ρ_A). En símbolos: $\rho(T, \rho_A)$. Haciendo una expansión en series de Taylor alrededor de un estado de referencia y despreciando los términos no-lineales, se tiene:

$$\rho = \rho_o + \frac{\partial \rho}{\partial T} \bigg|_{\rho_A = \rho_{Ao}} (T - T_o) + \frac{\partial \rho}{\partial \rho_A} \bigg|_{T = T_o} (\rho_A - \rho_{Ao}) \quad (1.1)$$

donde el subíndice "o" indica los valores de referencia. Usando las definiciones termodinámicas de los coeficientes de expansión térmica β_T y de concentración β_C para mezcla salina, se tiene:

$$\beta_T = - \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial T} \bigg|_{\rho_A = \rho_{Ao}} \quad (1.2)$$

$$\beta_C = \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial \rho_A} \bigg|_{T = T_o} \quad (1.3)$$

la expresión 1.1 toma la forma:

$$\rho = \rho_o [1 - \beta_T (T - T_o) + \beta_C (\rho_A - \rho_{Ao})] \quad (1.4)$$

El movimiento del fluido se presenta cuando existen gradientes de temperatura y concentración que producen cambios en la densidad. Estos movimientos se combinan con el efecto de la fuerza de gravedad. Los flujos inducidos por fuerzas de flotación son muy complejos debido a la interacción entre el transporte de calor y el patrón de movimiento. El movimiento tiene influencia en el transporte de calor y especies químicas, y consiguientemente modifica los campos de temperatura y concentración. La convección debida a flujos generados por efectos de flotación por la acción simultánea de gradientes de temperatura y concentración se denomina convección doblemente difusiva.

El progreso en el entendimiento de los fenómenos de convección natural puede ser obstaculizado debido a dos aspectos. El primero se relaciona con la interacción entre los transportes de cantidad de movimiento, energía y especies químicas. Este tipo de fenómenos está descrito por sistemas de ecuaciones diferenciales parciales, no-lineales y acopladas. Actualmente se sabe que no existen soluciones analíticas generales para estos problemas y por consiguiente se debe hacer uso de métodos numéricos implementados en las computadoras y obtener soluciones aproximadas. La estrategia más adecuada para comprender los fenómenos de manera integral es incorporar en el estudio observaciones experimentales y resultados teóricos. El segundo aspecto está relacionado con la normalización adecuada de las ecuaciones, también conocida como análisis dimensional o análisis de escalamiento. Se debe mencionar que aunque existen parámetros adimensionales bien identificados que dan información sobre el comportamiento cualitativo de los

flujos, hay fenómenos cuyo escalamiento está lejos de ser correctamente definido. Este problema es más agudo para flujos laminares en estado transitorio, flujos en transición, y flujos turbulentos.

1.3 ANTECEDENTES.

Ha habido muchos trabajos sobre convección natural referidos a sistemas tanto homogéneos como doblemente difusivos, así como para cavidades con geometría regular y cavidades con geometría más compleja. En la Figura 1.4 se presenta un esquema de algunas particularidades sobre convección natural en cavidades, que son de interés para el estudio que se desarrolla en esta tesis.

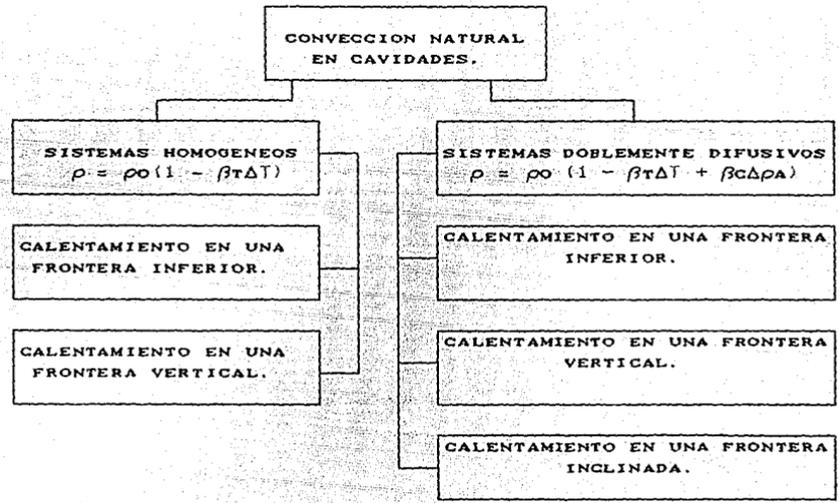


Figura 1.4. Diagrama de los distintos estudios sobre la convección natural en cavidades. La división principal se compone de fluidos homogéneos y no homogéneos con diferentes condiciones de frontera para su calentamiento.

Sistemas Homogéneos:

Estudios numéricos y analíticos sobre convección natural transitoria con calentamiento vertical para fluidos homogéneos han sido realizados por Patterson e Imberger [7] y Hall et al. [8]. Trabajos en estado permanente con un enfoque también experimental son los presentados por Cormack, Leal e Imberger [9], Cormack, Leal y Seinfeld [10] e Imberger [11]. Todos estos autores han utilizado cavidades con razón de aspecto (altura/longitud) menor o igual a la unidad. Otros estudios se han realizado para cavidades

que poseen una razón de aspecto mayor a la unidad como son los de Batchelor [12] y Gill [13], quienes estudiaron el problema en estado permanente usando métodos analíticos. El problema transitorio ha tenido poco interés entre los investigadores y rara vez está documentado. Aunque todos los trabajos mencionados anteriormente son de interés general, aquí solo se mencionarán aquellos que competen directamente al estudio realizado en esta tesis.

Patterson e Imberger [7] hicieron un análisis de escalas cuyos resultados muestran la existencia de varios tipos de flujos que son determinados con base en valores relativos de parámetros adimensionales. Estos parámetros son el número de Rayleigh térmico Rt , el número de Prandtl Pr , y la razón de aspecto A . Estos parámetros con excepción de la razón de aspecto son definidos y discutidos ampliamente en el capítulo 2, sin embargo en este punto se mencionará brevemente su significado. El número de Rayleigh térmico es una razón adimensional de las fuerzas de flotación producidas por un gradiente de temperatura y las fuerzas viscosas de arrastre y de difusión de calor, el número de Prandtl es también una razón adimensional, pero de la difusividad de cantidad de movimiento y la difusividad de calor. La clasificación de los flujos se hizo en conductivo, convectivo y de transición según valores relativos de Rt , y un número de Rayleigh térmico crítico definido como $Rt_{c} = \max(Pr^2, A^{-12})$; esta clasificación se presenta en la Tabla 1.1.

VALOR RELATIVO DEL NUM. DE RAYLEIGH	TIPO DE FLUJO
$Rt < 1$	CONDUCTIVO
$Rt > Rt_c$	CONVECTIVO
$1 < Rt < Rt_c$	DE TRANSICION

Tabla 1.1. Clasificación de los flujos en base al número de Rayleigh presentada por Patterson e Imberger.

El estudio realizado por estos investigadores fué bidimensional y en estado transitorio, basándose en las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía, con condiciones iniciales y de frontera como las presentadas en la Figura 1.5. Este análisis fué clasificado en tres etapas, la primera determina las escalas de tiempo y longitud para un flujo inicial cerca de la pared caliente o fría, la segunda las escalas concernientes a la descarga de fluido calentado o enfriado hacia el interior de la cavidad, y la tercera el desarrollo del flujo hacia el estado estable.

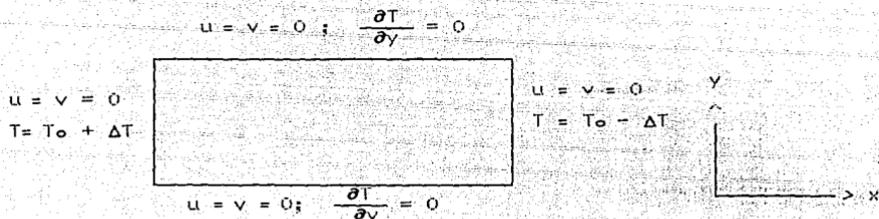


Figura 1.5. Geometría estudiada por Patterson e Imberger, donde la pared vertical derecha posee una temperatura fría y la pared izquierda una temperatura caliente respecto a la temperatura del fluido.

En la primera etapa definen los espesores de las capas límites hidrodinámica y térmica, el tiempo característico de formación de las capas límites y la velocidad de la capa hidrodinámica; en la segunda etapa determinan el espesor de la capa horizontal de intrusión debida a la descarga del fluido proveniente de las capas verticales, el tiempo que tarda en llegar a la pared vertical opuesta y la velocidad de avance; finalmente en la tercera etapa definen el tiempo en el que se alcanza el estado estable del fenómeno. Patterson e Imberger concluyen su análisis de escalas con una subclasificación de los tres tipos de flujos descritos anteriormente. Estos subtipos se determinan con base en los valores del número de Prandtl y la razón de aspecto, y tienen como objetivo describir cualitativamente el desarrollo del flujo hacia el estado estable.

Sistemas doblemente difusivos:

A manera de comentario, trabajos sobre convección natural en sistemas estratificados con calentamiento por la frontera inferior han sido llevados a cabo por varios investigadores como Turner [14], y más recientemente Mancini et al. [15], Takao y Nurusawa [16], y Marmorino y Caldwell [17].

Se han observado varios fenómenos con distintos comportamientos cuando se tiene un gradiente de densidad que es calentado lateralmente a temperatura constante [18]. Cuando se aplica un gradiente de temperatura pequeño entre la pared lateral y un fluido formado por una mezcla salina estratificada, el movimiento convectivo producido por efectos de flotación es paralelo a la pared caliente y las velocidades originadas son apenas apreciables. Este caso denominado régimen subcrítico presenta algunas celdas convectivas horizontales cerca de las fronteras inferior y superior. Un segundo régimen llamado de transición se suscita al incrementar el gradiente de temperatura, entonces las celdas convectivas horizontales empiezan a formarse en la frontera inferior y crecen simultáneamente hacia el cuerpo del fluido y hacia la frontera. Si se sigue aumentando el gradiente de temperatura, las celdas convectivas se presentan simultáneamente a lo largo de toda la pared caliente, teniendo en

este caso un régimen supercrítico. Mendenhall y Mason [19], demostraron que esto se debe a la presencia de gradientes de temperatura laterales, la explicación clara dada por estos autores fué corroborada recientemente por Thorpe, Hutt y Soulsby [20].

Chen, Briggs y Wirtz [21] presentan un análisis dimensional para un fluido establemente estratificado, que posee su máxima concentración en el fondo y su mínima concentración en la superficie. Este fluido es calentado a temperatura constante a través de una de sus fronteras verticales, por tanto, la densidad del fluido puede ser definida en función de dos variables (ver ecuación 1.1). Estos autores han definido el tamaño vertical de la celda h^* :

$$h^* = \frac{-\beta r \Delta T}{\vartheta} \quad (1.5)$$

siendo $\vartheta = -\beta c(d\rho_a/dy)$, y un número de Rayleigh térmico modificado en términos de h^* que en símbolos se expresa de la siguiente manera:

$$R_{Tm} = \frac{g\beta r \Delta T h^{*3}}{\alpha \nu} \quad (1.6)$$

donde g es la fuerza de gravedad, α la difusividad térmica, ν la viscosidad cinemática y ΔT el gradiente de temperatura.

Estos autores hicieron una serie de experimentos con el propósito de determinar el número de Rayleigh crítico, el cual definirían como aquél que da lugar a los primeros movimientos convectivos. Iniciaron sus estudios con números de Rayleigh pequeños (800) y los fueron aumentando gradualmente hasta valores supercríticos (54000). Todos los experimentos se llevaron a cabo para geometrías con paredes laterales verticales, encontrando los siguientes valores:

$R_{Tm} < 12500$	Régimen Subcrítico
$12500 \leq R_{Tm} \leq 17500$	Régimen de Transición
$R_{Tm} > 17500$	Régimen Supercrítico

En todos los experimentos la escala h^* del tamaño de las celdas estuvo en un rango del 80.0 por ciento respecto al esperado, lo cual indica que la longitud h^* fué elegida de manera correcta.

El fenómeno que se presenta cuando la geometría posee una pared lateral inclinada fué estudiada teórica y experimentalmente por Chen y Skok [18]. En este caso la definición del número de Rayleigh en términos de h^* solo se modifica debido a la gravedad reducida:

$$R_{tm} = \frac{g \cos \theta \rho \Delta T h^3}{\alpha \nu} \quad (1.7)$$

donde θ es el ángulo de inclinación respecto al eje vertical. Los valores del número de Rayleigh encontrados para un ángulo de inclinación de 45° son:

$R_{tm} < 18000$	Régimen Subcrítico
$18000 \leq R_{tm} \leq 26000$	Régimen de Transición
$R_{tm} > 26000$	Régimen Supercrítico

Haciendo una comparación entre los valores de Rayleigh para los tres tipos de régimen caracterizados para paredes verticales [21], y para paredes inclinadas [18], se observa que los valores obtenidos para paredes inclinadas son mayores que aquellos encontrados para paredes verticales. Este resultado es atribuido a una presión hidrostática adicional normal a la pared inclinada que retarda el inicio de los movimientos convectivos [18].

Akbarzadeh y Manins [22] discuten los efectos de las paredes inclinadas cuando las celdas convectivas horizontales son generadas debido a la absorción de radiación solar en gradientes salinos similares a los encontrados en estanques solares. Presentan resultados teóricos y experimentales sobre las inestabilidades inducidas por las paredes calientes. Estos autores describen el fenómeno producido por calentamiento lateral de la siguiente manera: "Debido a la absorción de radiación solar por las paredes laterales, el fluido cerca de la pared se calienta convirtiéndose en menos denso que el fluido que se encuentra en la parte interior del estanque al mismo nivel. Por tanto, el fluido se separa de la pared y se desplaza hacia niveles superiores que poseen densidades menores para encontrar su posición de equilibrio. Cuando este nivel se alcanza, el fluido, debido a su energía cinética, sale de su posición de equilibrio creando gradientes de presión horizontales. Esta presión mas alta cerca de la pared provee al fluido un movimiento horizontal, al mismo tiempo aparece un flujo en dirección hacia afuera de la pared. El fluido de la parte interior del estanque se mueve hacia la pared caliente para compensar el flujo inicial, con la consiguiente formación de celdas convectivas horizontales".

Su estudio sobre inestabilidades producidas en gradientes salinos debido a un calentamiento lateral está basado en resultados previamente obtenidos por Chen, Briggs y Wirtz [21] quienes determinaron teórica y experimentalmente la escala vertical de las celdas h^* ; y Chen y Skok [18] quienes definieron un número de Rayleigh térmico modificado R_{tm} para una pared inclinada con base en la escala vertical h^* , (ver ecuaciones 1.5 y 1.7).

Akbarzadeh y Manins llevaron a cabo una serie de experimentos a nivel de laboratorio donde simularon las condiciones reales de

un estanque solar, omitiendo el gradiente térmico vertical dentro del cuerpo del sistema y presentando solo el gradiente salino. Los experimentos fueron realizados en un dispositivo cuyo ángulo es de 45° y un flujo de calor aplicado de 200Wm^{-2} en la pared inclinada; el movimiento del fluido se visualizó mediante la técnica de sombras y mediante la toma de fotografías usando tinta de permanganato de potasio. El número de Rayleigh calculado de acuerdo a la definición de Chen et al. [18] fue de 76000 con un gradiente de temperatura correspondiente al flujo de calor de 4.0°C . La observación mas interesante es la formación de pequeñas celdas convectivas cerca de la pared caliente, que se presentaron a los 23 minutos de iniciado el calentamiento. A los 32 minutos las celdas ya habían cubierto la pared entera y se habían introducido 25.0mm al cuerpo del fluido. Los espesores de las celdas fueron de 20.0mm en la superficie y el fondo, y en la región media inicialmente entre 7.0-10.0mm. La fusión de las celdas delgadas originan celdas de espesores entre 10.0-15.0mm. A las 3 horas de calentamiento las celdas habían avanzado mas de 300mm. con una velocidad promedio de los frentes de las celdas de 3.5mm/min y una velocidad máxima de los flujos de las celdas de 8.0mm/min. También mostraron que la presencia de estas celdas convectivas producen la transferencia de sal de mayor a menor concentración.

Un estudio mas reciente presentado por Akbarzadeh [23], muestra resultados similares de experimentos hechos con un dispositivo de mayor tamaño que recibe la radiación solar directamente. En ese estudio no fue posible conocer la razón de crecimiento de las celdas convectivas debido a la acción del viento al producir esfuerzos de corte sobre la superficie del estanque que afectaban regiones de mayor profundidad. También presenta resultados experimentales de laboratorio llevados a cabo en un dispositivo con paredes verticales estudiando dos gradientes de salinidad distintos 125.0 y 250.0kgm^{-4} y aplicando un flujo de calor de 150.0Wm^{-2} , el cual resulta en un aumento de temperatura de la pared de 3.0°C y 2.5°C para el mas alto y el mas bajo gradiente de salinidad. Las diferencias encontradas consisten en el tamaño de los espesores y las velocidades de avance de las celdas, observando menores espesores y menores velocidades de avance en el gradiente salino mayor. De sus observaciones se concluye que los espesores de las celdas corresponden satisfactoriamente con la escala vertical definida por Chen y Skok [18], además para los dos casos de paredes verticales y pared inclinada es posible la generación de celdas convectivas cuando se aplica un calentamiento lateral, obteniendo celdas apreciablemente más delgadas y menos activas en el caso de paredes verticales.

Otros estudios relacionados con fluidos estratificados calentados lateralmente son aquellos realizados por Wirtz y Reddy [24], cuyo objetivo es la cuantificación del transporte de sal y calor a través de una interfase difusiva estable que separa dos regiones convectivas de diferente concentración. Estos autores mostraron la formación de celdas convectivas circulares separadas por una interfase salina, a través de la cual el transporte vertical de calor y sal tenía lugar y era independiente del tamaño y número de celdas convectivas formadas.

En general, sistemas constituidos por fluidos homogéneos están más ampliamente estudiados y entendidos que aquellos formados por fluidos estratificados. Desde el punto de vista teórico y experimental, los fluidos homogéneos sometidos a condiciones de frontera con calentamiento lateral han sido caracterizados en conductivos, convectivos y de transición. La colaboración de Patterson e Imberger [7] en el estudio del fenómeno de convección natural bajo cualquiera de los tres regímenes ha sido de gran utilidad para la comprensión de estos flujos. El estudio de fluidos doblemente difusivos es más complejo. Las observaciones de estos flujos han sido principalmente enfocadas desde el punto de vista experimental [18, 21, 22], obteniendo empíricamente algunas correlaciones importantes. Respecto a la geometría, los sistemas doblemente difusivos han sido estudiados en cavidades con paredes verticales y paredes inclinadas, en el último caso aún falta un amplio rango de inclinaciones que analizar. Se han hecho varios trabajos a nivel de laboratorio con geometría de paredes inclinadas aplicados a los estanques solares [22, 23], sin embargo, se requieren estudios teóricos que complementen las observaciones hechas hasta el momento.

1.4 OBJETIVOS.

El objetivo general de esta tesis es hacer un estudio básico sobre la convección natural doblemente difusiva donde los componentes son el calor y la masa de la especie química A. Este sistema tiene aplicación a los estanques solares, específicamente a las inestabilidades sufridas debidas a un calentamiento lateral [22, 23]. Este estudio se lleva a cabo teórica y experimentalmente.

Respecto al estudio experimental se diseña y construye un dispositivo que permite hacer observaciones del fenómeno. Este dispositivo consiste de un tanque con una pared inclinada un ángulo de 30° , lo cual representa un valor nuevo a investigar. Además se desarrolla una técnica de visualización adecuada para determinar el campo de velocidades y el patrón de flujos.

El estudio teórico consiste en obtener la solución numérica de varios fenómenos relacionados que permitirán hacer comparaciones cualitativas y cuantitativas entre ellos y con las observaciones experimentales. Los fenómenos referidos no han sido tratados hasta el momento con un enfoque numérico, por tanto se espera que los resultados aporten información original para el mejor entendimiento de la física de los estanques solares.

Uno de los objetivos principales de la tesis es desarrollar un modelo teórico bidimensional en estado transitorio que resuelva un sistema doblemente difusivo, el cual, representa el fenómeno de convección natural debido a un calentamiento a temperatura constante a través de una pared lateral. La geometría utilizada es un prisma rectangular con superficie libre y paredes verticales. Los objetivos particulares de la tesis son:

- 1.- Construir un modelo que resuelva la difusión de masa de la especie química A para un sistema isotérmico constituido por un gradiente de concentración tipo escalón.

2.- Construir un modelo simplificado de convección natural para un fluido homogéneo con calentamiento lateral cuyo gradiente de temperatura es 5°C .

3.- Construir un modelo que resuelva la convección natural para un fluido no homogéneo con un gradiente de concentración tipo escalón. Se estudian los casos con gradientes de temperatura 2°C , 5°C y 10°C .

4.- Construir un modelo que resuelva la convección natural para un fluido no homogéneo con un gradiente de concentración tipo rampa para los mismos gradientes de temperatura mencionados en el punto 3.

Un análisis de los modelos mencionados anteriormente y una comparación de resultados teóricos y experimentales constituye el último objetivo de este trabajo.

1.5 PRESENTACION

A continuación se expone la forma en que está estructurado el contenido de esta tesis.

En el capítulo 2 se discute el modelo teórico general, anotando el sistema de ecuaciones de balance que resuelven el fenómeno en cuestión.

En el capítulo 3 se presentan resultados numéricos de los casos tratados (ver sección 1.4 de este capítulo).

En el capítulo 4 se describe la técnica experimental y el equipo empleado en la realización de los experimentos.

En el capítulo 5 se discuten los resultados experimentales para un sistema constituido por una región de gradiente salino, utilizando una geometría de pared lateral inclinada.

En el capítulo 6 se presenta la discusión de resultados teóricos y experimentales así como las conclusiones generales del trabajo.

Finalmente se tiene un apéndice donde se anexan los archivos de datos utilizados en el código numérico PHOENICS.

CAPITULO 2

MODELO TEORICO

2.1 INTRODUCCION.

En este capítulo se describe el modelo matemático cuyas ecuaciones gobiernan la dinámica del fluido, las condiciones iniciales y de frontera y su método de solución. Tales ecuaciones reflejan los principios de conservación de masa, cantidad de movimiento, energía y especies químicas, y su solución determina los campos de velocidad, presión, temperatura y concentración del sistema como funciones de la posición y del tiempo. Las ecuaciones se resuelven bidimensionalmente y en estado transitorio. La derivación detallada de las ecuaciones básicas de balance puede consultarse en las referencias [25,26].

Con el objeto de simplificar las ecuaciones, las siguientes suposiciones son aplicadas:

- El fluido se considera incompresible y todas sus propiedades como viscosidad, capacidad calorífica, etc. son constantes excepto la densidad en el término fuente de la ecuación de cantidad de movimiento, (aproximación de Boussinesq).
- El fluido se considera Newtoniano.

2.2 MODELO TEORICO.

El sistema coordenado utilizado es el cartesiano, la dirección horizontal se denota por x , y la dirección vertical por y como se muestra en la Figura 2.1. El origen se encuentra en el extremo inferior izquierdo, la longitud del dominio es l y la altura total h .

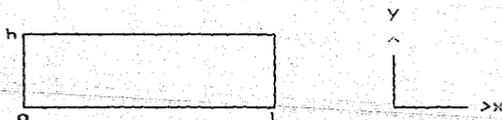


Figura 2.1. Dominio del sistema en estudio y ejes coordenados. También se muestra la altura h y la longitud l .

Ecuaciones Gobernantes:

Ecuaciones de Balance de Masa.

Debido a la relevancia de estas ecuaciones en el fenómeno que se estudia, es importante hacer una presentación detallada del desarrollo matemático y las bases físicas que las definen. En el capítulo 1 ya han sido discutidos algunos conceptos sobre mezclas

binarias, por ahora basta recordar que la mezcla que se utiliza está constituida por el soluto A (NaCl) y el solvente B (H₂O) y la concentración másica de la especie química A está definida por ρ_A ; la definición de la concentración de la especie química B, ρ_B se hace de manera análoga. En una mezcla binaria, se espera que los componentes se muevan a diferentes velocidades, pues de acuerdo a observaciones experimentales, los materiales tienden a reducir sus gradientes de concentración y distribuirse de manera homogénea. Debido a esto, es necesario definir la velocidad promedio local \bar{v} como:

$$\bar{v} = \frac{\rho_A \bar{v}_A + \rho_B \bar{v}_B}{\rho_A + \rho_B} \quad (2.1)$$

donde \bar{v}_A y \bar{v}_B son las velocidades locales de los componentes de la mezcla. Si el flujo másico \bar{n}_i se define como $\bar{n}_i = \rho_i v_i$ ($i=A,B$), la ecuación anterior toma la forma:

$$\bar{v} = \frac{\bar{n}_A + \bar{n}_B}{\rho} \quad (2.2)$$

En la ecuación anterior, se empleó la definición de la densidad de la mezcla $\rho = \rho_A + \rho_B$. La expresión formal de la observación experimental consistente en que el material A se mueve respecto a la mezcla tratando de reducir sus gradientes de concentración se le conoce como la primera ley de Fick, que escrita en el eje de coordenadas fijo al laboratorio tiene la forma:

$$\rho_A (\bar{v}_A - \bar{v}) = - \rho D_{AB} \nabla \frac{\rho_A}{\rho} \quad (2.3)$$

El factor D_{AB} se conoce como el coeficiente de difusión y el signo negativo indica que el flujo tiene lugar en dirección opuesta al gradiente. El flujo debido a gradientes recibe el nombre de flujo difusivo. En términos del flujo másico la expresión anterior toma la forma:

$$\bar{n}_A = \rho_A \bar{v} - \rho D_{AB} \nabla \frac{\rho_A}{\rho} \quad (2.4)$$

en esta expresión se muestra explícitamente que el flujo másico de A se debe al movimiento global de la mezcla y al movimiento difusivo debido a sus gradientes. Una expresión análoga se puede escribir para la componente B, el coeficiente D_{AB} es el mismo para las ecuaciones de ambos componentes. La ecuación de transporte se obtiene haciendo un balance de masa sobre un volumen de control e igualándolo el cambio respecto al tiempo de la masa contenida en él. La expresión diferencial de la ecuación de transporte toma la forma:

$$-\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{n}_A = 0 \quad (2.5)$$

para la componente A, y

$$\frac{\partial \rho_B}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{n}_B = 0 \quad (2.6)$$

para la componente B. En las dos ecuaciones anteriores, se ha supuesto que no existen fuentes o sumideros de las especies A o B. Sumando las ecuaciones 2.5 y 2.6 se tiene :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{n}_A + \bar{n}_B) = 0 \quad (2.7)$$

o bien, usando la definición de \bar{v} (ecuación 2.2), la ecuación anterior se puede escribir como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v}) = 0 \quad (2.8)$$

Esta expresión se conoce como la ecuación de balance global de masa o ecuación de continuidad. En el importante caso en el que la densidad ρ pueda considerarse constante, la ecuación 2.8 toma la forma:

$$\nabla \cdot \bar{v} = 0 \quad (2.9)$$

La ecuación de transporte de las especies A y B (ecuaciones 2.5 y 2.6) puede escribirse en términos de la velocidad promedio usando la ecuación 2.4:

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_A \bar{v}) = \nabla \cdot [\rho D_{AB} \nabla (\rho_A / \rho)] \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \rho_B}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_B \bar{v}) = \nabla \cdot [\rho D_{AB} \nabla (\rho_B / \rho)] \quad (2.11)$$

Cuando la densidad total ρ y el coeficiente de difusividad D_{AB} se pueden considerar constantes, las ecuaciones 2.10 y 2.11 pueden escribirse como:

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \rho_A = D_{AB} \nabla^2 \rho_A \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \rho_B}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \rho_B = D_{AB} \nabla^2 \rho_B \quad (2.13)$$

ρ_A y ρ_B se conservan; por consiguiente se deben resolver 2.12 y 2.13. Alternativamente se pueden resolver las ecuaciones 2.12 y 2.9 ya que la ecuación 2.9 es la suma de las ecuaciones 2.12 y 2.13. En este trabajo se resuelven las ecuaciones 2.9 y 2.12 en dos dimensiones, y escritas explícitamente estas ecuaciones son:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} + \frac{u \partial \rho_A}{\partial x} + \frac{v \partial \rho_A}{\partial y} = D_{AB} \left[\frac{\partial^2 \rho_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial y^2} \right] \quad (2.15)$$

donde u , y v son las velocidades promedio en dirección x , y respectivamente. Estas expresiones constituyen la ecuación de balance de masa global y la de especies químicas que forman parte del conjunto que gobierna el fenómeno.

Ecuación de Balance de Cantidad de Movimiento de la mezcla.

El principio de balance de cantidad de movimiento es la aplicación de la segunda ley de Newton a un fluido. Considerando la viscosidad dinámica constante la ecuación toma la forma:

En dirección x :

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \rho_0 \left[\frac{u \partial u}{\partial x} + \frac{v \partial u}{\partial y} \right] = \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2.16)$$

En dirección y :

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \rho_0 \left[\frac{u \partial v}{\partial x} + \frac{v \partial v}{\partial y} \right] = \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial y} - g(\rho - \rho_0) \quad (2.17)$$

donde:

- u = velocidad en dirección horizontal
- v = velocidad en dirección vertical
- P = presión del sistema
- ρ_0 = densidad de referencia de la mezcla
- μ = viscosidad dinámica de la mezcla
- g = fuerza de gravedad

Ecuación de Balance de Energía de la mezcla:

El principio de balance de energía está basado en la primera ley de la Termodinámica aplicada a un fluido en movimiento. Si se considera la conductividad térmica constante y los efectos de disipación viscosa despreciables, la ecuación de balance de energía está dada por:

$$\rho_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \rho_0 \left[\frac{u \partial E}{\partial x} + \frac{v \partial E}{\partial y} \right] = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (2.18)$$

donde la Ley de Fourier:

$$q = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (2.19)$$

ha sido aplicada considerando la conductividad térmica de la mezcla k como independiente de la posición. En las ecuaciones anteriores E y T son la entalpía y la temperatura de la mezcla.

Por otra parte, si el calor específico C_p de la mezcla se considera independiente de la posición y del tiempo, se tiene entonces la siguiente definición para C_p :

$$C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial E}{\partial y} \quad (2.20)$$

Aplicando la definición anterior a la ecuación 2.18 se obtiene finalmente:

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \left(\frac{u \partial T}{\partial x} + \frac{v \partial T}{\partial y} \right) = \frac{k}{C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.21)$$

que es la ecuación de balance de energía en términos de la temperatura.

Haciendo un análisis de las ecuaciones de balance se observa que todas ellas excepto la ecuación de balance de masa (ecuación 2.14) están constituidas por términos similares:

Primer término:

Es el término temporal y considera la variación de una propiedad escalar, (componente velocidad, temperatura, o concentración) con respecto al tiempo.

Segundo término:

Involucra la variación de la propiedad respecto a su posición en el espacio. Este término se conoce como convectivo y describe el transporte por efecto de un campo de velocidades.

Tercer término:

Variación del flujo de la propiedad en cuestión respecto a su posición en el espacio. Término difusivo que rige el transporte molecular de la propiedad.

Cuarto Término:

Agrupar los términos restantes que representan la generación o consumo de la propiedad. Los términos fuente de las ecuaciones de balance de energía y especies químicas son igual a cero. El término fuente de la ecuación de balance de cantidad de movimiento para la componente x es la derivada parcial de la presión respecto

al eje coordenado x. Para la componente y es la derivada parcial de la presión respecto al eje correspondiente más las fuerzas de cuerpo.

Relaciones Auxiliares.

Fuerzas de Cuerpo.

Las fuerzas de cuerpo consideradas en el problema son la flotación que actúa como una fuente y el peso que actúa como un sumidero, ambas en la componente vertical de la ecuación de cantidad de movimiento.

Efecto de flotación y efecto de peso.

La generación de cantidad de movimiento tiene lugar debido a la flotación de los componentes de fluido caliente, que son menos densos respecto a los fríos. Los flujos gobernados por fuerzas de flotación generalmente son analizados con la aplicación de la aproximación de Boussinesq. Esta aproximación consiste de lo siguiente:

1.- La densidad se considera constante excepto cuando directamente causa las fuerzas de flotación.

2.- Todas las otras propiedades del fluido son constantes.

El primer punto significa que la ecuación de balance de masa se resuelve en la forma aplicada a un fluido incompresible (ecuación 2.14), y la densidad solo se considera variable en el término fuente de la componente vertical de la ecuación de balance de cantidad de movimiento. El otro punto simplifica las ecuaciones.

Haciendo una extensión a la aproximación de Boussinesq, la variación de densidad de la mezcla por efecto de la concentración ocasionará una pérdida de cantidad de movimiento en la componente vertical de la ecuación de balance de cantidad de movimiento. Se considera que la dependencia de la densidad con respecto a la concentración tiene la misma forma matemática que existe con respecto a la temperatura.

A partir de la definición del coeficiente de dilatación térmica β_T y el coeficiente de concentración β_C definidas en el capítulo 1 (ecuaciones 1.2 y 1.3), la densidad de la mezcla como función de la temperatura y la concentración $\rho = \rho(T, p_A)$ puede expresarse usando su expansión en series de Taylor a primer orden alrededor del punto ρ_0 , como fue discutido en el capítulo 1 donde se definió la ecuación 1.4. Es importante notar que las variaciones de la densidad se consideran lineales con respecto a la temperatura y a la concentración. La parte del término fuente debida a flotación de la ecuación (2.17) tiene la forma $-g(\rho - \rho_0)$ usando la expresión para la densidad de la ecuación 1.4 se tiene finalmente:

$$-g(\rho - \rho_0) = -g\rho_0 [\beta_T(T_0 - T) + \beta_C(p_A - p_{A0})] \quad (2.22)$$

2.3 CONDICIONES INICIALES Y DE FRONTERA.

Condiciones Iniciales.

- a) Velocidades: Se supone un estado estático de la mezcla con velocidad cero tanto en dirección x como en dirección y .
- b) Temperatura: La mezcla en todo el volumen está a temperatura constante T_0 que es igual a la temperatura ambiente.
- c) Concentración: Las condiciones iniciales sobre la concentración se explican con detalle en el capítulo 3, debido a que se estudian varios casos diferentes.

Condiciones de Frontera.

Las condiciones de frontera son las siguientes:

- a) Base del tanque: Para un fluido viscoso las componentes vertical y horizontal de la velocidad del fluido en una superficie sólida son cero.

$$u \Big|_{y=0} = v \Big|_{y=0} = 0 \quad 0 \leq x \leq l \quad (2.23)$$

El transporte de calor y masa a través de la frontera es nulo, por tanto:

$$\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{\partial \rho A}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad 0 \leq x \leq l \quad (2.24)$$

- b) Superficie del tanque: Se supone que la componente vertical de la velocidad en esta superficie así como los esfuerzos cortantes son cero.

$$v \Big|_{y=h} = 0 \quad 0 \leq x \leq l \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=h} = 0 \quad 0 \leq x \leq l \quad (2.26)$$

La temperatura en la superficie se considera constante e igual a la temperatura inicial del fluido:

$$T \Big|_{y=h} = T_0 \quad 0 \leq x \leq l \quad (2.27)$$

El transporte de masa a través de esta frontera es nulo por tanto:

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial y} \Big|_{y=h} = 0 \quad 0 \leq x \leq l \quad (2.28)$$

Es importante hacer notar que los efectos de tensión superficial en la frontera superior se desprecian.

c) Pared lateral derecha: Debido a que se trata de una frontera rígida, las velocidades se anulan:

$$u \Big|_{x=l} = v \Big|_{x=l} = 0 \quad 0 \leq y \leq h \quad (2.29)$$

Esta frontera permite el transporte de calor, y se mantiene a una temperatura constante mayor a la temperatura del fluido de trabajo:

$$T \Big|_{x=l} = T_0 + \Delta T \quad 0 \leq y \leq h \quad (2.30)$$

donde ΔT se define en el capítulo 3 debido a que se resuelven varios casos. El transporte de masa a través de esta frontera es nulo por tanto:

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0 \quad 0 \leq y \leq h \quad (2.31)$$

d) Pared vertical izquierda: Las condiciones de frontera son similares que en (a), ambas componentes de la velocidad se anulan y no hay flujo de calor o masa:

$$u \Big|_{x=0} = v \Big|_{x=0} = 0 \quad 0 \leq y \leq h \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial \rho_A}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad 0 \leq y \leq h \quad (2.33)$$

2.4 ECUACIONES ADIMENSIONALES.

Las ecuaciones adimensionales pueden ser obtenidas de muy diversos modos dependiendo del tipo de escalamiento que se proponga. En este caso se proponen las siguientes relaciones:

Para las variables espaciales:

$$x' = \frac{x}{H} ; \quad y' = \frac{y}{H}$$

Para la variable temporal:

$$t' = \frac{t}{H/\alpha}$$

Para las velocidades:

$$u' = \frac{u}{\alpha/H} ; \quad v' = \frac{v}{\alpha/H}$$

Para la temperatura:

$$T' = \frac{T}{\Delta T} \quad \text{donde } \Delta T = T_1 - T_0$$

Para la concentración:

$$\rho_A' = \frac{\rho_A}{\Delta \rho_A} \quad \text{donde } \Delta \rho_A = \rho_{A1} - \rho_{A2}$$

H se ha definido como $h/2$, es decir la mitad de la altura del dominio. α es la difusividad térmica de la mezcla, T_1 es la temperatura de la pared lateral derecha y T_0 la temperatura de la superficie libre del tanque, ρ_{A1} y ρ_{A2} son las concentraciones máxima y mínima de la mezcla. Sustituyendo estas relaciones en las ecuaciones de balance, se obtiene:

Ecuación de balance de masa

$$\frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{\partial v'}{\partial y'} = 0 \quad (2.34)$$

Ecuación de balance de Especies Químicas

$$\frac{\partial \rho_A'}{\partial t'} + \left[u' \frac{\partial \rho_A'}{\partial x'} + v' \frac{\partial \rho_A'}{\partial y'} \right] = \frac{1}{Le} \left[\frac{\partial^2 \rho_A'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 \rho_A'}{\partial y'^2} \right] \quad (2.35)$$

donde $Le = \alpha/D$ es conocido como el número de Lewis, cuyo significado físico se discute en la sección 2.6.

Ecuación de balance de cantidad de movimiento

En dirección x

$$\frac{1}{Pr} \left(\frac{\partial u'}{\partial t'} + u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \frac{\partial u'}{\partial y'} \right) = \left(\frac{\partial^2 u'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} \right) - \frac{\partial P'}{\partial x'} \quad (2.36)$$

En dirección y

$$\frac{1}{Pr} \left(\frac{\partial v'}{\partial t'} + u' \frac{\partial v'}{\partial x'} + v' \frac{\partial v'}{\partial y'} \right) = \left(\frac{\partial^2 v'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 v'}{\partial y'^2} \right) - \frac{\partial P'}{\partial y'} + R_T \Delta T + R_c \Delta \rho_A \quad (2.37)$$

donde $P' = (H^2 / \rho \alpha \nu) P$, Pr el número de Prandtl, R_T el número de Rayleigh térmico y R_c el número de Rayleigh salino. Estos números adimensionales se encuentran también definidos en la sección 2.6.

Ecuación de balance de energía

$$\frac{\partial T'}{\partial t'} + \left(u' \frac{\partial T'}{\partial x'} + v' \frac{\partial T'}{\partial y'} \right) = \left(\frac{\partial^2 T'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 T'}{\partial y'^2} \right) \quad (2.38)$$

2.5 CONDICIONES A LA FRONTERA ADIMENSIONALES.

1) Paredes Horizontales.

$$0 \leq x' \leq 6$$

$$y' = 0$$

a) Velocidad $u' = v' = 0$

b) Temperatura $\frac{\partial T'}{\partial y'} = 0$

c) Concentración $\frac{\partial \rho_A'}{\partial y'} = 0$

$$y' = 2$$

a) Velocidad $v' = 0$; $\frac{\partial u'}{\partial y'} = 0$

b) Temperatura $T' = \frac{1}{T^* - 1}$

c) Concentración $\frac{\partial \rho A'}{\partial y'} = 0$

2) Paredes Verticales

$0 \leq y' \leq 2$

$x' = 0$

a) Velocidad $u' = v' = 0$

b) Temperatura $\frac{\partial T'}{\partial x'} = 0$

c) Concentración $\frac{\partial \rho A'}{\partial x'} = 0$

$x' = b$

a) Velocidad $u' = v' = 0$

b) Temperatura $T' = \frac{1}{1 - (1/T^*)}$

c) Concentración $\frac{\partial \rho A'}{\partial x'} = 0$

2.6 DEFINICION DE PARAMETROS ADIMENSIONALES.

Número de Rayleigh Térmico R_T :

Para que la flotación genere movimiento de un fluido no-isotérmico en presencia de fuerzas de cuerpo, es necesario que los gradientes térmicos excedan los efectos viscosos y los difusivos. La energía potencial gravitacional liberada por el hundimiento de fluido frío y el movimiento ascendente del caliente debe ser más grande que la energía disipada por el arrastre y la difusión. La relación de estos efectos puede ser expresada como la razón adimensional entre las fuerzas de flotación divididas entre el producto de las fuerzas viscosas de arrastre y de difusión de calor. Esta razón es llamada número de Rayleigh térmico y es el parámetro más importante en los procesos de convección natural. En símbolos se expresa como:

$$R_T = \frac{g\beta\tau\Delta T H^3}{\alpha\nu} \quad (2.39)$$

donde: $\beta\tau$ = coeficiente de expansión térmica

α = difusividad térmica

ν = viscosidad cinemática

ΔT = diferencia de temperaturas característica

H = distancia característica

Número de Rayleigh Salino Rc :

Otro parámetro adimensional importante en sistemas doblemente difusivos es el número de Rayleigh salino, el cual relaciona el gradiente de concentración o salinidad con los efectos viscosos y difusivos.

$$Rc = \frac{g\beta c\Delta\rho H^3}{\alpha\nu} \quad (2.40)$$

donde: βc = coeficiente de salinidad
 $\Delta\rho$ = gradiente de concentración

Es importante mencionar que la definición del número de Rayleigh térmico está basado en el problema de Bénard, el cual considera una cavidad con gradiente de temperatura vertical, calentada en su frontera inferior, donde H representa la distancia vertical entre placas caliente y fría. Así mismo, al número de Rayleigh salino se le ha dado una connotación similar que al Rayleigh térmico cuando se tratan fenómenos doblemente difusivos que requieren de dos parámetros adimensionales que caractericen el movimiento del fluido. En estos problemas, el gradiente de concentración es vertical. El fenómeno aquí estudiado, como se describió anteriormente está caracterizado por gradientes de concentración y temperatura perpendiculares, es decir, mientras el gradiente de concentración es vertical, el gradiente de temperatura es horizontal. La altura H se ha definido como una distancia vertical igual a la mitad de la altura del dominio. Esta definición no es estrictamente correcta, sin embargo, el sistema es doblemente difusivo y la convección natural que se presenta está asociada con los efectos de temperatura y concentración, y la distancia H se ha definido de la manera que se considera mas adecuada.

Número de Prandtl:

El patrón de movimiento convectivo depende de otro número adimensional conocido como el número de Prandtl. Este parámetro adimensional se define como la razón entre la viscosidad cinemática y la difusividad térmica (difusividad de cantidad de movimiento/difusividad de calor).

Para entender este concepto se considera el siguiente experimento. Se tiene una capa de cualquier fluido confinada entre dos placas horizontales de alta conductividad térmica y una temperatura constante en ambas placas. Si se le aplica una diferencia de temperaturas ΔT tal que la superficie inferior sea la temperatura fría, el flujo de calor (Q) que cruza la capa establece un perfil de temperatura lineal. El flujo de calor que se requiere para mantener la diferencia de temperaturas constante es:

$$Q = A_c k \frac{\Delta T}{\Delta y}$$

donde: k = conductividad térmica
 ΔT = diferencia de temperaturas
 ΔY = distancia entre placas
 A_t = Área de transferencia.

Del mismo modo, si se aplica una diferencia de velocidades entre la frontera superior e inferior, se establece un perfil de velocidades lineal cuando la velocidad es constante y la distancia ΔY pequeña. La fuerza requerida para mantener la frontera superior en movimiento esta dada por:

$$F = \mu A_t \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

donde: μ = viscosidad dinámica
 Δv = gradiente de velocidad en la dirección y
 Δy = distancia en la dirección y
 A_t = Área de aplicación de la fuerza

Por otro lado imagínese que se tienen las mismas condiciones en cuanto a la geometría, pero que la diferencia de temperaturas o la diferencia de velocidades se aplica súbitamente. Al principio solo la región de fluido que se encuentra contigua a la placa se calentará o para el caso de la diferencia de velocidades se deformará, formando una pequeña capa límite en donde se tendrá un pequeño perfil lineal. La propagación de este gradiente localizado a través de toda la capa de fluido hasta la placa fría o bien en reposo, está gobernado por la ecuación de difusión. El coeficiente de difusión térmica es:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

y el coeficiente de difusión del gradiente de velocidades es:

$$\nu = \mu/\rho$$

Estos coeficientes permiten calcular la magnitud del tiempo de relajación característico τ de los gradientes a la profundidad ΔY . Para la temperatura $\tau_T = (\Delta Y)^2/\alpha$; y para la velocidad $\tau_v = (\Delta Y)^2/\nu$. La razón de estos tiempos es el número de Prandtl que da idea del comportamiento temporal de la capa de fluido sometida a dos clases de gradientes.

$$Pr = \frac{\tau_T}{\tau_v} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.41)$$

Esta relación contempla dos situaciones opuestas:

a) Fluidos con números de Prandtl mayores que la unidad: la difusión de cantidad de movimiento es más rápida que la difusión de calor. Entonces, los perfiles dinámicos se establecen rápidamente seguidos por el acomodo de las distribuciones de campos de temperatura.

b) Fluidos con números de Prandtl menores que la unidad: la distribución de temperaturas se establece antes que el campo de velocidades.

Número de Lewis:

Cuando un sistema está constituido por un fluido no homogéneo se precisa tener un parámetro que compare los coeficientes de transporte de las ecuaciones de balance de energía y especies químicas. El número de Lewis es un parámetro adimensional definido como la razón entre la difusividad térmica y la difusividad salina, y por tanto es un parámetro análogo al número de Prandtl. Este parámetro se aplica a sistemas doblemente difusivos que experimentan la competencia entre la difusión de calor y la difusión de especies químicas. Para la mejor comprensión de este número adimensional se describirá un ejemplo sencillo.

Supóngase que se tiene una cavidad en forma de prisma rectangular cuya cubierta superior es una placa mantenida a temperatura constante y en la que de alguna manera es posible mantener constante su concentración salina*, la cubierta inferior es una placa con alta concentración salina, (esto se consigue por ejemplo con cristales compactos de cloruro de sodio) y mantenida a la misma temperatura de la placa superior. De esta manera se mantienen ambas fronteras a temperatura y concentración constantes. La distancia entre placas es ΔY . Después de un tiempo bastante grande el flujo de sal que atraviesa la cavidad establecerá un perfil de concentración lineal, siendo el flujo másico salino requerido para mantener constante la diferencia de concentraciones igual a:

$$J = -A_t D \frac{\Delta c}{\Delta Y}$$

donde Δc es la diferencia de concentraciones y D es el coeficiente de difusividad salina. Por otro lado, debido al gradiente de temperaturas entre las dos placas, se espera también que después de un tiempo grande se presente un perfil de temperatura lineal, el calor que se requiere para mantener constante la diferencia de temperaturas es:

$$Q = A_t k \frac{\Delta T}{\Delta Y}$$

Si la diferencia de temperaturas y concentraciones pudiera aplicarse súbitamente, al principio solo una pequeña capa de fluido contiguo a la placa correspondiente se calentaría o modificaría su composición, formando ambas una capa límite de perfil lineal. La propagación de estos gradientes a través de toda la capa de fluido está regida por la ecuación de difusión. Los tiempos de relajación característicos τ de los gradientes a la profundidad ΔY , se tiene para la temperatura $\tau_T = (\Delta Y)^2 / \alpha$ y para la concentración $\tau_c = (\Delta Y)^2 / D$.

*Experimentalmente, se puede mantener condición de concentración salina igual a cero, desplazando constantemente el fluido situado en la frontera superior con fluido sin soluto.

La razón de estos tiempos es el número de Lewis:

$$Le = \frac{\tau T}{\tau_s} = \frac{\alpha}{D} \quad (2.42)$$

Para el número de Lewis, se encuentran dos casos interesantes:

a) fluidos con número de Lewis mayor que la unidad: la distribución de temperatura se establece antes que el campo de concentración.

b) fluidos con número de Lewis menor que la unidad: La difusión de masa es más rápida que la difusión de calor. Se establece más rápidamente el perfil de concentraciones que el perfil de temperaturas.

2.7 METODO DE SOLUCION.

En muchos problemas de convección natural, es extremadamente difícil obtener soluciones analíticas, por lo que es necesario hacer uso de métodos numéricos que permitan obtener soluciones con alto grado de confiabilidad. Para la solución del problema planteado en la sección 2.2, se utiliza el paquete comercial PHOENICS (Parabolic Hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Code Series), que está codificado para la integración de las ecuaciones de balance y es capaz de simular problemas de flujo de fluidos, transferencia de calor, reacciones químicas y fenómenos relacionados. PHOENICS se compone esencialmente de dos códigos base y dos auxiliares. Uno de los códigos base es un preprocesador denominado SATELLITE, el otro es el procesador denominado EARTH. Los códigos auxiliares son un posprocesador llamado PHOTON y un programa de ayuda llamado GUIDE. SATELLITE es un intérprete entre la información que el usuario manda a través de un archivo de datos denominado Q1, y EARTH que es el código que integra las ecuaciones de balance. Los resultados se encuentran en los archivos de salida RESULT y PHIDA, el primero puede ser leído por el usuario, mientras que el segundo es leído por el código auxiliar PHOTON, mediante el cual es posible obtener la información en forma gráfica. Además el archivo PHIDA puede ser leído por EARTH cuando se requiere empezar una nueva integración a partir de los resultados finales de la integración anterior. Cuando es necesario interactuar con EARTH, PHOENICS permite esto a través de subrutinas contenidas en GROUND [27].

PHOENICS utiliza el esquema de volumen finito para la discretización de las ecuaciones de transporte [28]. Para obtener la solución numérica de los campos de velocidad, temperatura y concentración con este esquema, el dominio se divide en celdas o volúmenes de control como el que se muestra en la Figura 2.2 para el caso de un dominio bidimensional.

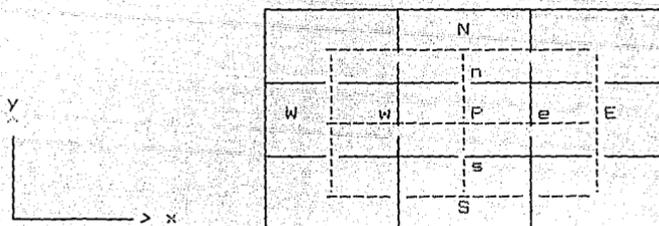


Figura 2.2. Geometría de un dominio bidimensional, las líneas continuas forman los volúmenes en cuyos centros se calculan las variables escalares (P, E, W, N, S), las líneas punteadas que atraviesan los lados de los volúmenes de control indican donde se calculan las componentes de la velocidad (e, w, s, n).

Lo más atractivo del método de volumen finito es que las integrales en todo el dominio, se obtienen a partir de la consumación de la integral de masa, cantidad de movimiento, energía y especies químicas para cada volumen. Es conveniente escribir las ecuaciones de balance en forma general de la siguiente manera:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(u\rho\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(v\rho\phi)}{\partial y} = \Gamma \left[\frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} \right] + S_\phi \quad (2.43)$$

donde ϕ es cualquier variable escalar, incluyendo componentes de variables vectoriales. Γ es el coeficiente de transporte considerado constante y S es el término fuente para la variable ϕ .

Las ecuaciones de balance empleadas en el presente modelo pueden obtenerse a partir de la ecuación 2.43, (ecuaciones 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, 2.21) sustituyendo las variables indicadas en la Tabla 2.1, y considerando la densidad constante excepto en el término de fuerzas de cuerpo.

ECUACION	ϕ	S_ϕ
BALANCE DE MASA	1	0
CANTIDAD DE MOVIMIENTO EN X	u	$\mu - \partial P / \partial x$
CANTIDAD DE MOVIMIENTO EN Y	v	$\mu - \partial P / \partial y - g(\rho - \rho_0)$
BALANCE DE ENERGIA	T	α
BALANCE DE ESPECIES QUIMICAS	ρA	DAB

Tabla 2.1 Variables de las ecuaciones de transporte.

Integrando la ecuación 2.43 sobre cada celda del dominio, se obtiene el siguiente conjunto de ecuaciones algebraicas para cada una de las componentes de la velocidad (u, v), presión P , temperatura T y concentración ρA .

$$(\sum_i A_i + A_p^0) \phi_p = A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + b \quad (2.44)$$

donde las A 's son los coeficientes que resultan de integrar las ecuaciones en el volumen centrado en P , los subíndices E, W, N, S , indican las posiciones de los nodos de los volúmenes vecinos, y b el término fuente que incluye el término que contiene a ϕ evaluado en el tiempo anterior. Al centro de cada lado de la celda se evalúa la velocidad normal correspondiente, mientras que la presión, la temperatura y la concentración, o cualquier propiedad escalar son evaluadas al centro de la celda (Figura 2.2). La ecuación (2.44) se puede reescribir usando notación indicial de la siguiente manera:

$$(\sum_i A_i + A_p^0) \phi_p = \sum A_i \phi_i + b \quad (2.45)$$

despejando ϕ_p se tiene:

$$\phi_p = \frac{\sum_i A_i \phi_i + b}{A_p} \quad (2.46)$$

donde:

$$A_p = \sum_i A_i + A_p^0$$

$$i = E, W, N, S$$

El conjunto de ecuaciones algebraicas lineales (2.46) es resuelto iterativamente usando algunos de los métodos tradicionales como TDMA (método de matriz tridiagonal), Jacobi (punto por punto), Gauss-Seidel (punto por punto), o SOR (sobre-relajaciones sucesivas).

PHOENICS emplea el procedimiento iterativo conocido con el nombre de SIMPLER (Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations Revised), propuesto por Patankar [28]. A grandes rasgos SIMPLER se compone de los siguientes pasos:

- 1.- Sugierase una distribución inicial de presiones. Esta distribución es arbitraria, pero una distribución similar a la distribución verdadera ayudaría a acelerar la convergencia. Llámese a este campo de presiones p^* .
- 2.- Resuélvase las ecuaciones de balance de cantidad de movimiento para encontrar las componentes de velocidad correspondientes al campo de presiones propuesto en 1. Llámese a este campo de velocidades u^* .
- 3.- Resuélvase la ecuación de balance de masa en términos de la presión. Para efectuar este paso, se requiere discretizar la ecuación de balance de masa (que solo involucra a la densidad y las

componentes de la velocidad) y proponer una relación entre la presión y la velocidad invocando argumentos de plausibilidad, Patankar y Spalding [29] proponen una relación lineal entre las dos variables. A esta expresión se le llamaría relación de corrección.

4.- Corrijase el campo de presiones p^* , sumando la corrección de presión.

5.- Corrijase el campo de velocidades empleando la corrección de presión.

6.- Resuélvase la ecuación de balance de energía usando los valores de velocidad encontrados en el paso 5.

7.- Considerese el campo de presión corregido como la distribución inicial de presiones y repítanse los pasos 2 a 6 hasta que el error en el balance sea menor a algún criterio pre-establecido.

Para flujos no-isotérmicos y con concentración variable, el campo de velocidades es el primero en calcularse, posteriormente se calcula el campo de temperaturas y finalmente el campo de concentraciones.

Se consideran dos criterios de convergencia en el procedimiento de solución. El primero se refiere a la convergencia en las iteraciones y está caracterizado por la magnitud de los residuales. Con el fin de clarificar la definición de residual, considérese el balance de alguna variable conservada; el flujo que cruza las fronteras integrado sobre éstas, debe ser igual a las fuentes integradas sobre el volumen. Al hacer la integración numérica, las cantidades referidas no siempre son iguales, y su diferencia se conoce como residual sobre el volumen. El residual global es la suma de los residuales de todos los volúmenes del dominio. En los procesos iterativos convergentes se encuentra que el residual es una función decreciente del número de iteraciones. Se considera que una solución está convergida respecto a este criterio, cuando el residual es menor que un cierto valor prefijado. El segundo criterio se relaciona a la exactitud de la solución con respecto al tamaño de los volúmenes de la malla y al incremento del paso de tiempo de la integración y la independencia de los resultados respecto a estos. En principio, entre más pequeños sean el tamaño de los volúmenes de la malla y el incremento del paso de tiempo, menor el error involucrado a causa de la discretización, aunque el tiempo de procesamiento se incrementa entre más fina sea la malla y más pequeño el paso de tiempo. Debe encontrarse una malla suficientemente fina y un incremento de paso de tiempo pequeño que permitan obtener resultados precisos pero tal que la solución pueda ser encontrada en un tiempo de procesamiento razonable. Cuando ambos criterios se satisfacen la solución numérica será una buena aproximación a la solución de las ecuaciones diferenciales.

2.8 CARACTERISTICAS DE LA SOLUCION NUMERICA.

Con el fin de resolver el problema planteado en la sección 2.2 usando el código PHOENICS, se debe proporcionar información

respecto a la geometría del dominio, propiedades físicas del fluido, características de la malla, incremento del paso tiempo, condiciones iniciales y de frontera, parámetros de integración etc. Como se mencionó en la sección anterior, esto se hace por medio del código Q1 que permite introducir cómodamente esta información. Un ejemplo del código Q1 usado en este estudio se presenta en el apéndice.

El estudio de independencia de malla se llevó a cabo haciendo integraciones con mallas uniformes de 20×20 , 30×30 , y 40×40 volúmenes en las direcciones x , y , respectivamente. Se encontró que las características cualitativas de las soluciones son las mismas en todos los casos y que los valores de las variables tienen una tendencia monótona convergente. Al comparar las mallas 20×20 y 30×30 se encuentra una diferencia máxima del 9% para valores de velocidad y concentración en varios puntos del dominio, y para valores de temperatura la diferencia máxima encontrada es del 5%; mientras que una comparación de las mallas 30×30 y 40×40 arroja una diferencia máxima del 4% para valores de velocidad y concentración en los mismos puntos y para valores de temperatura del 2%. Las Figuras 2.3 a 2.5 muestran resultados de velocidad, temperatura, y concentración para uno de los puntos del dominio que muestran mayor diferencia en sus valores. Aunque hubiera sido deseable obtener resultados con mallas más finas, no fue posible efectuar este tipo de análisis debido a limitaciones en memoria de cómputo y al aumento en el tiempo de procesamiento conforme se incrementa el número de volúmenes; el tiempo requerido para resolver la malla 20×20 es de 15629 s, para la malla 30×30 es de 22325 s, y para la malla 40×40 es de 25404 s. Debido a que el carácter de este estudio es mayormente cualitativo, se considera que los resultados obtenidos con la malla de 40×40 son satisfactorios. Recordando las magnitudes del dominio, en el eje horizontal se tiene una longitud $l = 0.3$ mts y en el eje vertical una altura $h = 0.1$ mts, si se aplica una malla regular de 40×40 al eje x se observa que el tamaño de los nodos es de 7.5 mm, por tanto se podrían obtener valores de las variables escalares a una distancia de 3.75 mm de la pared caliente. El cálculo de la capa límite hidrodinámica y térmica de acuerdo con Patterson e Imberger [7] indica que los espesores son de 2.0mm y 1.0mm respectivamente, por tanto, no existe ningún punto de la capa límite que pueda proporcionar información sobre el comportamiento de la misma. Observando este hecho, se decidió hacer una corrida con una malla irregular de 40×40 volúmenes, con el propósito de incluir al menos dos puntos en la región de la capa límite, esta corrida se hizo solo para el caso debilmente difusivo con distribución de concentración inicial tipo escalón y con un gradiente $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ (ver sección 3.4 del capítulo 3). Los resultados obtenidos muestran que desde el punto de vista cualitativo no hay cambios importantes, mientras que los valores de temperatura y velocidad presentan variaciones máximas del 15.0% cerca de la capa límite.

Respecto al incremento del paso de tiempo también se presenta un estudio de independencia de resultados utilizando la malla 40×40 . Los incrementos analizados son $\Delta t = 1.0s.$, $\Delta t = 0.5s.$, $\Delta t = 0.2s.$, y $\Delta t = 0.1s.$ Se obtuvieron valores de velocidad vertical, velocidad horizontal y temperatura en distintos puntos del dominio. Las Figuras 2.6 y 2.7 indican un comportamiento de la

velocidad para ciertos puntos del dominio tendiente a constante a medida que el incremento en el paso de tiempo disminuye, así, al hacer una comparación entre $\Delta t=1.0s$ y $\Delta t=0.1s$ las diferencias máximas obtenidas son del 12.0%, una comparación entre $\Delta t=0.5s$ y $\Delta t=0.1s$ arroja diferencias máximas del 7.0%, mientras que una comparación entre $\Delta t=0.2s$ y $\Delta t=0.1s$ presenta diferencias máximas del 4.0%. Una conducta similar se presenta al comparar valores de temperatura, obteniendo diferencias máximas del 3.0% para $\Delta t=0.2s$ y $\Delta t=0.1s$. Tal como se muestra en la Figura 2.8 los tiempos de cómputo para los incrementos analizados son desde 18200s. para $\Delta t=1.0s$. hasta 43300s. para $\Delta t=0.1s$. Haciendo un balance entre el tiempo de cómputo y la precisión de los resultados, se decidió utilizar el incremento del paso de tiempo de 0.2s.

COMPARACION DE VELOCIDADES A $Y=0.06$ MTS. PARA MALLAS DISTINTAS DE 20×20 , 30×30 Y 40×40 .

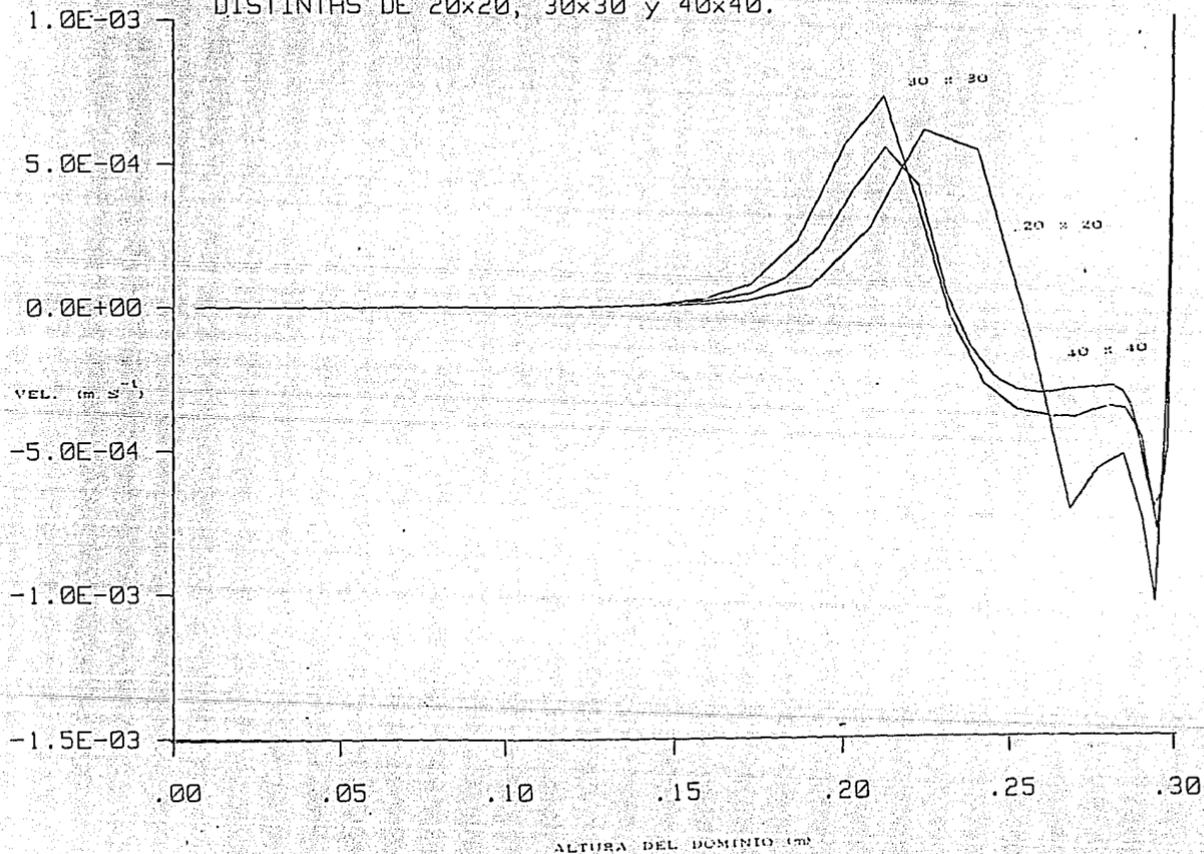


FIGURA 2.3.

COMPARACION DE TEMPERATURA EN $Y = 0.05$ MTS. PARA MALLAS DISTINTAS DE 20×20 , 30×30 , 40×40 .

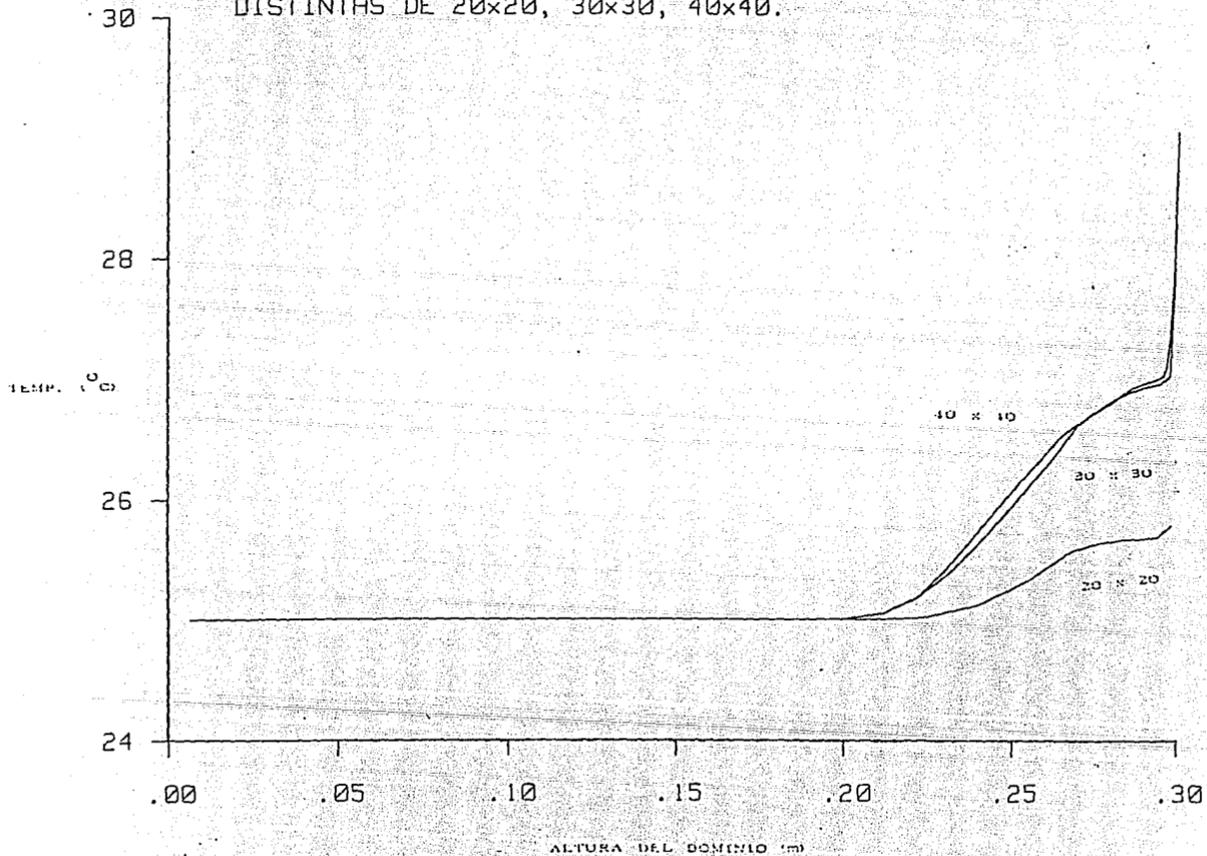


FIGURA 2.4.

COMPARACION DE TEMPERATURA EN $Y = 0.05$ MTS. PARA MALLAS DISTINTAS DE 20×20 , 30×30 , 40×40 .

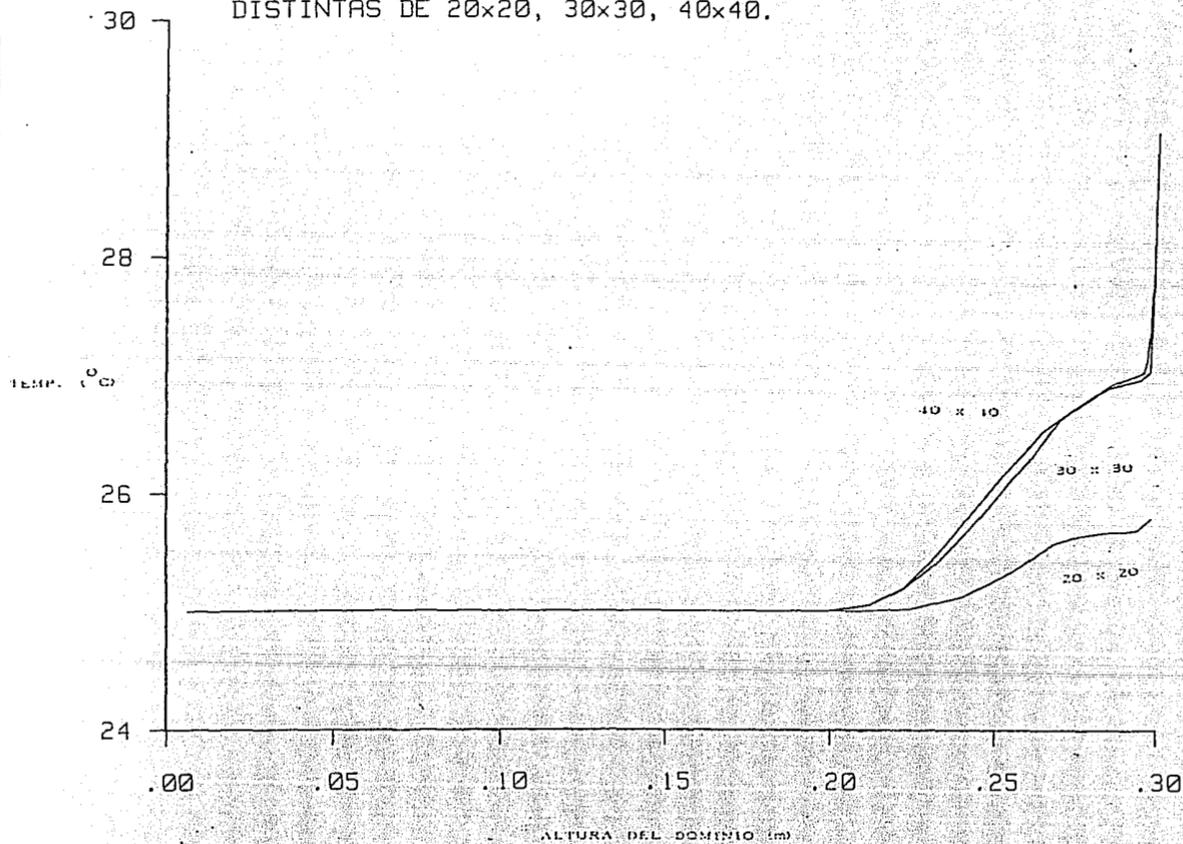


FIGURA 2.4.

COMPARACION DE CONCENTRACION EN $Y=0.04$ MTS. PARA MALLAS DE 20×20 , 30×30 Y 40×40 .

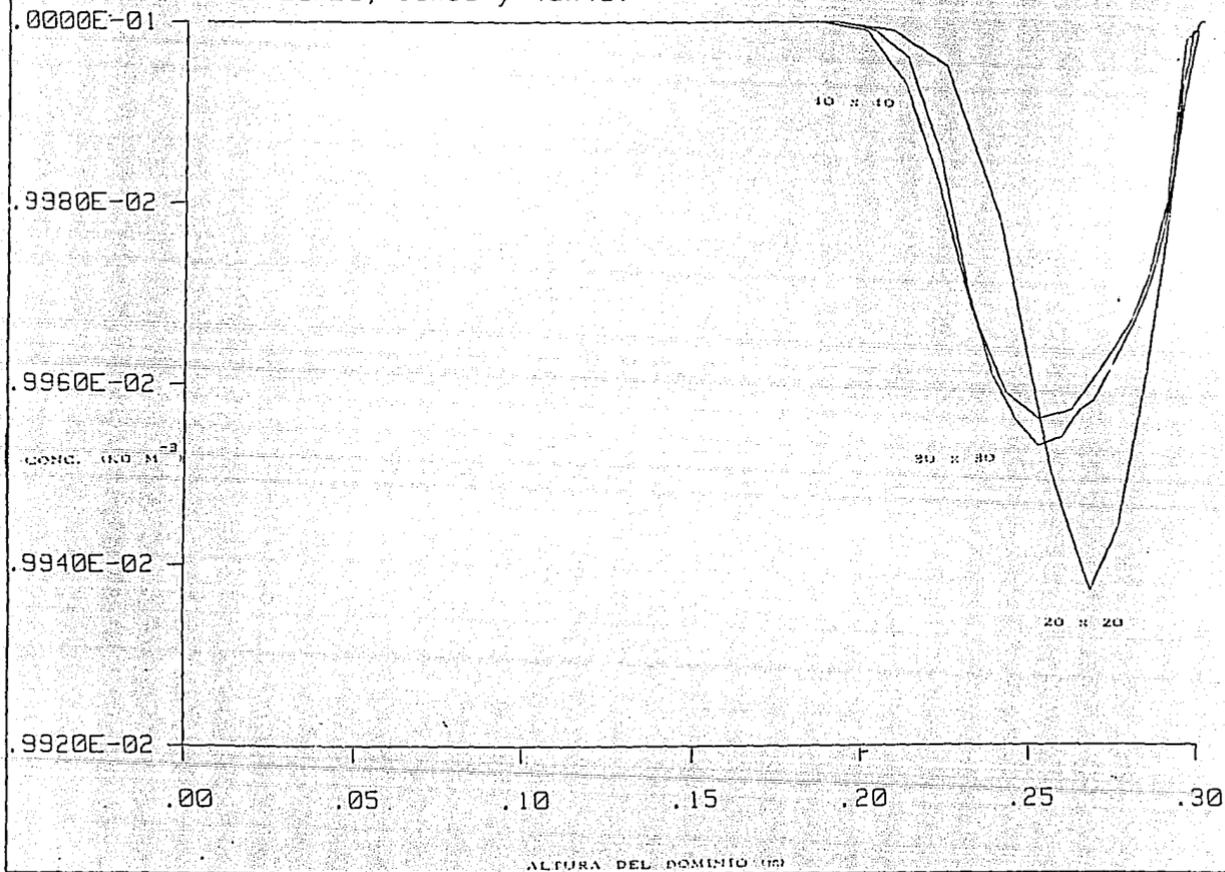


FIGURA 2.5.

GRAFICA DE VELOCIDAD EN EL PUNTO Y-23 A

TODOS X PARA DISTINTAS DELTAS DE TIEMPO.

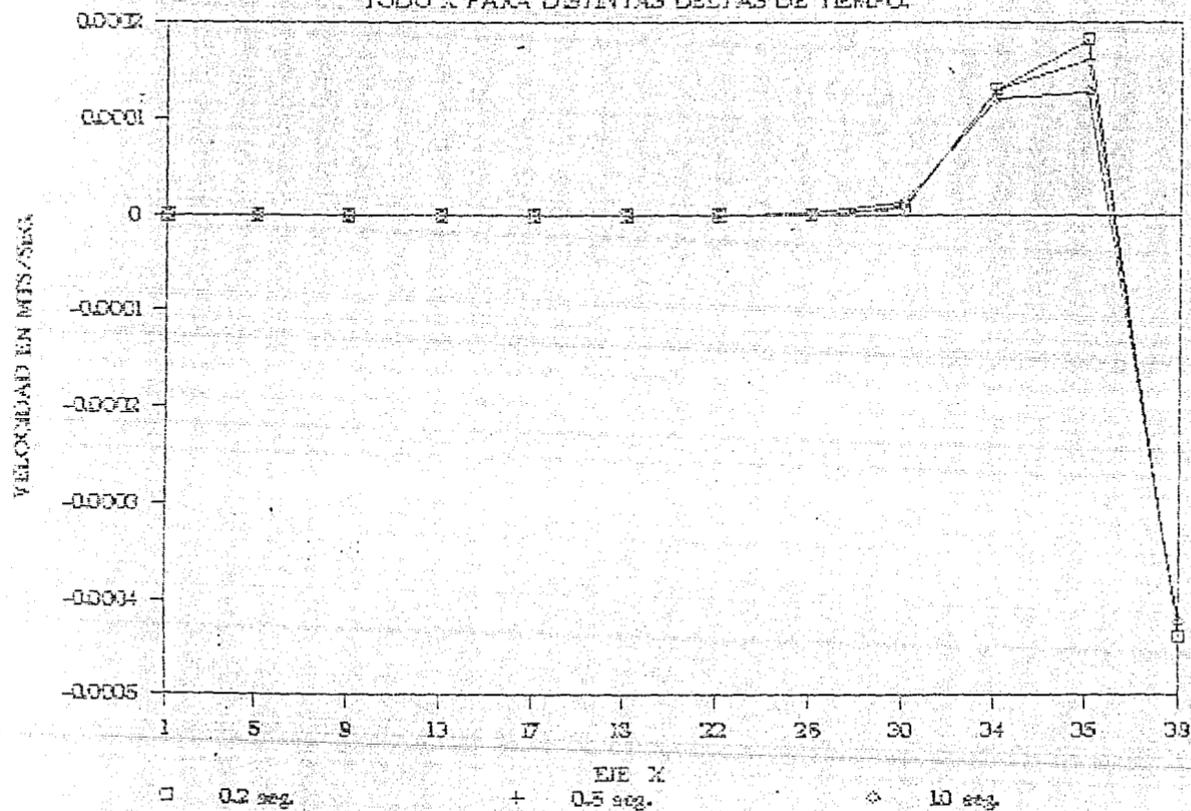


FIGURA 2.6.

VELOCIDADES HORIZONTALES Y-36 A TODA X PARA DISTINTAS DELTAS DE TIEMPO.

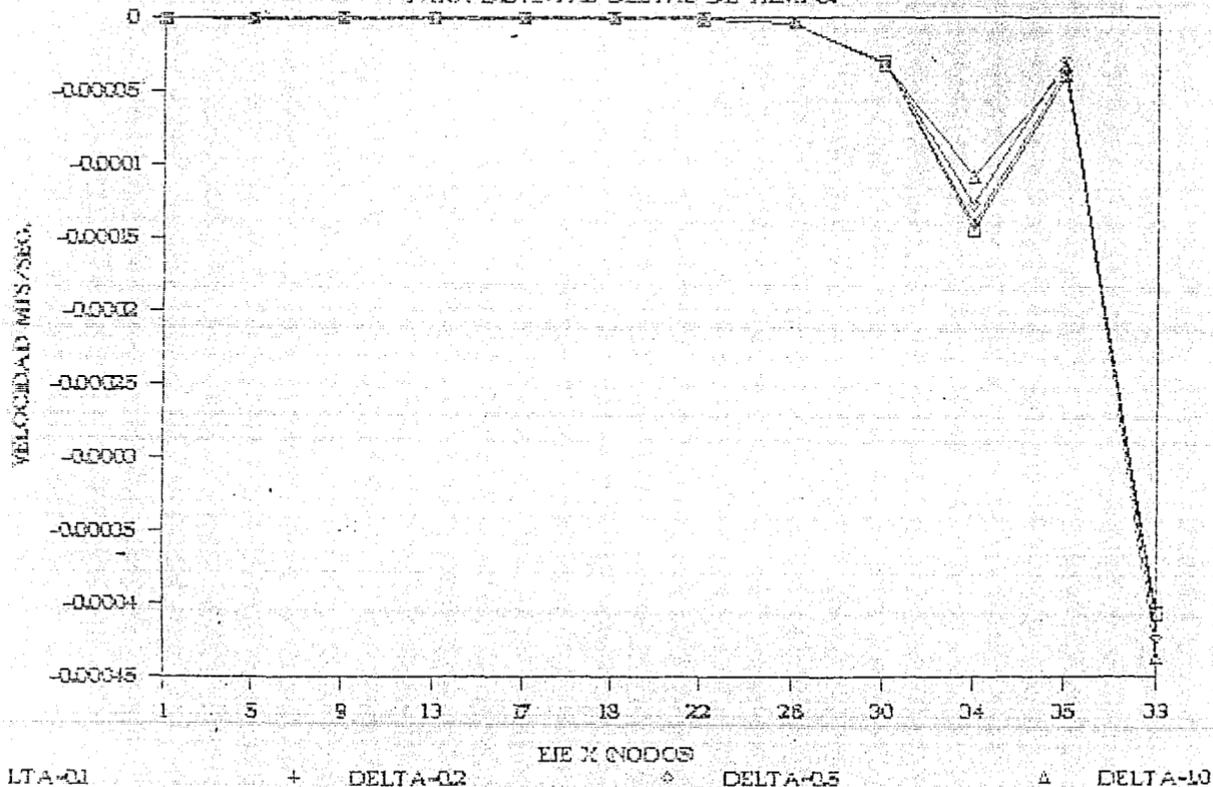


FIGURA 2.7.

TIEMPO DE COMPUTO PARA DISTINTAS DELTAS DE TIEMPO PARA UN LAPSO DE 10 SEGS.

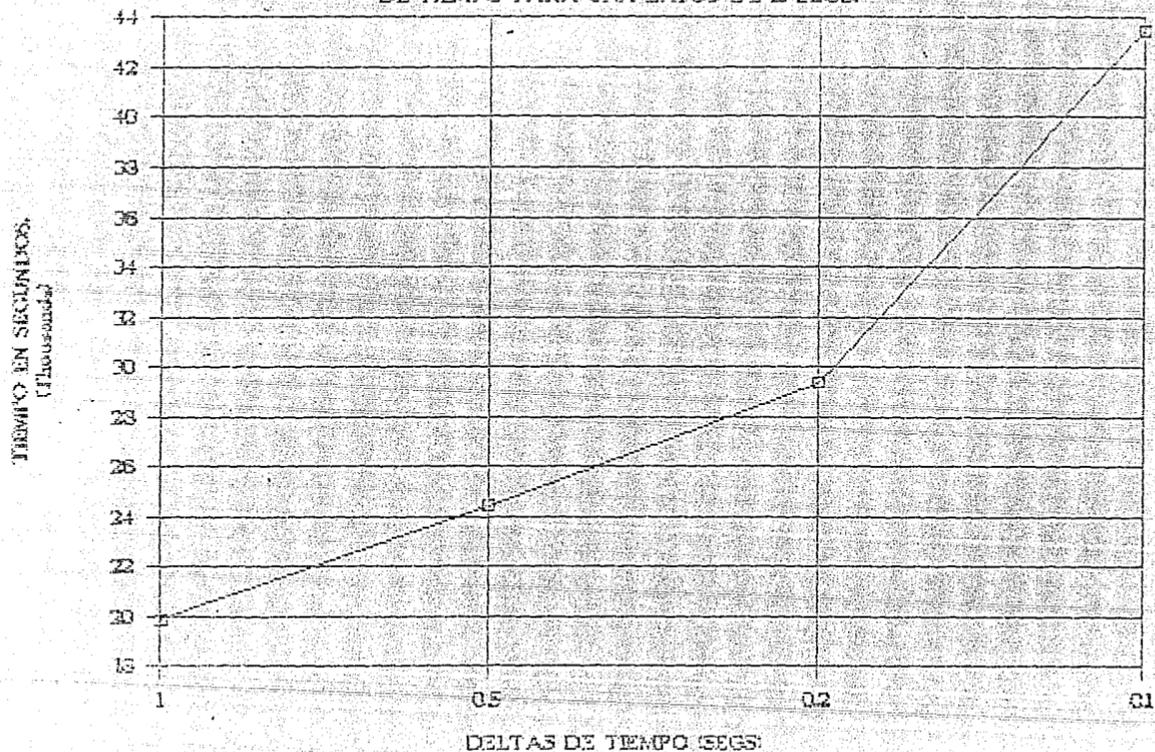


FIGURA 2.8.

CAPITULO 3

RESULTADOS TEORICOS

3.1 INTRODUCCION

Este capítulo está destinado a la descripción y análisis de los resultados obtenidos con la solución numérica de las ecuaciones de transporte y condiciones a la frontera descritas en el capítulo 2. Antes de analizar estos resultados, se considera importante tener una idea de algunos fenómenos obtenidos con modelos más simples que puedan ayudar a entender con mayor claridad el estudio principal de esta tesis. Los fenómenos referidos se describen en las dos siguientes secciones. En la sección 3.2 se presenta la solución analítica unidimensional transitoria de la ecuación de difusión de especies químicas, a la cual a partir de este punto se le denominará DEQ. En la sección 3.3 se describen cualitativamente los resultados numéricos del fenómeno de convección natural para un fluido homogéneo contenido en un tanque rectangular con calentamiento en una de sus paredes verticales, teniendo un gradiente de temperatura inicial de 5°C ., a este caso se le asignará el nombre de CDPH. Posteriormente se presenta el estudio doblemente difusivo con condiciones iniciales para la concentración de dos tipos, uno con distribución tipo escalón (DDTE) y otro con distribución tipo rampa (DDTR).

El estudio de convección natural presentado en este trabajo se hace en estado transitorio hasta un tiempo en el que el flujo tiene interacción con la pared vertical opuesta, y la razón es que interesa observar el fenómeno en el inicio del calentamiento sin importar los efectos de la pared opuesta. Por otra parte el estado estable se espera cuando el fluido presenta una concentración homogénea en todo el dominio, es decir, cuando haya ocurrido un completo mezclado de las dos regiones inicialmente a distintas concentraciones; el tiempo en el que ocurre esto puede ser tan grande que requeriría de trabajo adicional que está fuera del alcance de esta tesis. Los casos doblemente difusivos y el caso puramente difusivo se resolvieron para un gradiente salino del 3.0% en peso; el caso de convección natural para un fluido homogéneo se resolvió para el agua pura.

Respecto a la condición inicial de la temperatura de calentamiento, el estudio doblemente difusivo se extiende a tres distintos gradientes tomando como referencia la temperatura del fluido. Los gradientes elegidos son: $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$, $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ y $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, cuyos números de Rayleigh en base a una altura equivalente del dominio definida por H (ver sección 3.2) son: $5.53\text{E}+06$, $1.38\text{E}+07$ y $2.76\text{E}+07$ respectivamente. Estos valores están calculados para las propiedades del agua, señalando que existe una diferencia menor al 1.0% respecto a aquellos calculados con las propiedades de la mezcla salina. Se resolvió un solo número de Rayleigh salino, cuyo valor en base a la altura equivalente H es $1.98\text{E}+08$. El número de Prandtl Pr y la razón de aspecto A permanecen constantes en los tres casos, siendo $\text{Pr}=6.0$ y $\text{A}=0.333$. Los gradientes iniciales de temperatura, el número de Prandtl y la razón de aspecto son los mismos para los dos casos doblemente difusivos. La descripción de los resultados se hace primero para el caso DDTE seguida del caso

DDTR, enfatizando las propiedades globales del patrón de flujo bidimensional transitorio en forma mayormente cualitativa. La presentación tiene tres formas básicas: campos de velocidad, campos de temperatura y campos de concentración, los cuales se presentan en forma gráfica. En la sección 3.4 se analiza el caso DDTE para $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$, el cual se utiliza posteriormente como referencia para la subsecuente presentación de los casos $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$ y $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$. Finalmente en la sección 3.5 se describe el caso DDTR solo para el gradiente de temperatura $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ haciendo una comparación con el caso DDTE para el mismo gradiente.

3.2 ANALISIS DE LA SOLUCION ANALITICA DE LA ECUACION DE DIFUSION DE ESPECIES QUIMICAS.

Como un modelo simplificado del problema analizado en la tesis, se presenta la solución analítica de la ecuación de difusión en una dimensión y en estado transitorio. Este modelo refleja el comportamiento de un estanque solar con paredes laterales muy alejadas en ausencia de movimiento y en estado isotérmico (ver Figura 3.1).

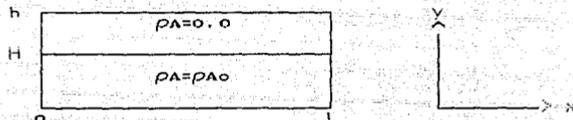


Figura 3.1. Dominio del sistema para el caso DEQ que presenta dos regiones de distintas concentraciones.

Es claro que este modelo sobre-simplificado no corresponde a la realidad, pero su solución indica algunas propiedades que serán útiles en la interpretación de modelos mas completos. La ecuación que rige el fenómeno puramente difusivo es la ecuación de balance de especies químicas (ecuación 2.15) con velocidad nula. En una dimensión esta ecuación toma la forma:

$$\frac{\partial \rho_A}{\partial t} = D_{AB} \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial y^2} \quad (3.1)$$

los símbolos fueron definidos en el capítulo 2. Para el caso en que se tienen dos regiones de igual altura, la inferior formada por una mezcla de cloruro de sodio y la superior por agua pura, ambas confinadas en un tanque en forma de prisma rectangular cuya altura está definida por h , la condición inicial se define de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} 0 \leq y \leq h & \quad \rho_A = \rho_{A0} & \quad t = 0.0 \\ h \leq y \leq H & \quad \rho_A = 0.0 & \quad t = 0.0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

siendo $H = h/2$. Como condiciones a la frontera se tienen paredes impermeables, esto se expresa de la siguiente manera:

$$\left. \frac{\partial \rho_A}{\partial y} \right|_{y=0.0} = 0.0 \quad t \geq 0.0 \quad (3.3)$$

$$\left. \frac{\partial \rho_A}{\partial y} \right|_{y=h} = 0.0 \quad t \geq 0.0$$

ambas regiones forman una interfase definida. La ecuación de difusión permite definir el tiempo característico del fenómeno como $\tau_d = h^2 / D_{AB}$. La solución analítica de la ecuación de difusión (3.1) con condiciones iniciales y a la frontera (3.2) y (3.3) respectivamente, presentada por Crank [30] es:

$$\rho_A(y,t) = \rho_{A0} \left[\frac{H}{h} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi H}{h} \exp \frac{-D_{AB} n^2 \pi^2 t}{h^2} \cos \frac{n\pi y}{h} \right] \quad (3.4)$$

Esta ecuación indica la concentración como función de la posición y del tiempo, mostrando cuantitativamente el comportamiento de la composición del sistema debido al fenómeno de difusión.

La Figura 3.2 muestra la distribución de concentraciones como función de la altura para un tiempo igual a cero (condición inicial) y a tiempos posteriores de una, cinco, diez y veinticuatro horas, que corresponden a $5.58E-04\tau_d$, $2.78E-03\tau_d$, $5.58E-03\tau_d$ y $0.0134\tau_d$ respectivamente. Estas curvas muestran una conducta tendiente a disminuir la concentración de la región inferior cerca de la interfase, y aumentar la concentración de la región superior también cerca de la interfase. Si se analiza la curva de la primera hora se observa que a un centímetro de cada lado de la interfase ya ha habido una transferencia sustancial de moléculas de sal de la región de mayor concentración a la región de menor concentración, por tanto la sal se ha difundido dentro del agua en ausencia de movimientos convectivos. Fuera de estos dos centímetros la concentración es prácticamente igual a la definida por la condición inicial.

La Figura 3.3 muestra varias curvas de concentración en función de la altura a tiempos mayores. Las curvas de los primeros días tienen una forma de S invertida, pero a medida que el tiempo crece esta forma se va perdiendo hasta convertirse en una línea horizontal en un tiempo aproximado de 75 días (τ_d). Se puede considerar que el sistema está formado por un fluido aproximadamente homogéneo cuya composición es el promedio aritmético de las concentraciones iniciales de las dos regiones y con gradientes menores a $1.17E-04\rho_{A0}$. Este sencillo tratamiento de la ecuación de difusión de masa puede dar una idea de la velocidad de transporte de la sal dentro del agua cuando no existen movimientos convectivos, además da la pauta para hacer una

FIG. 3.2. CONCENTRACION DEL SISTEMA A

DISTINTOS TIEMPOS, FENOMENO DE DIFUSION

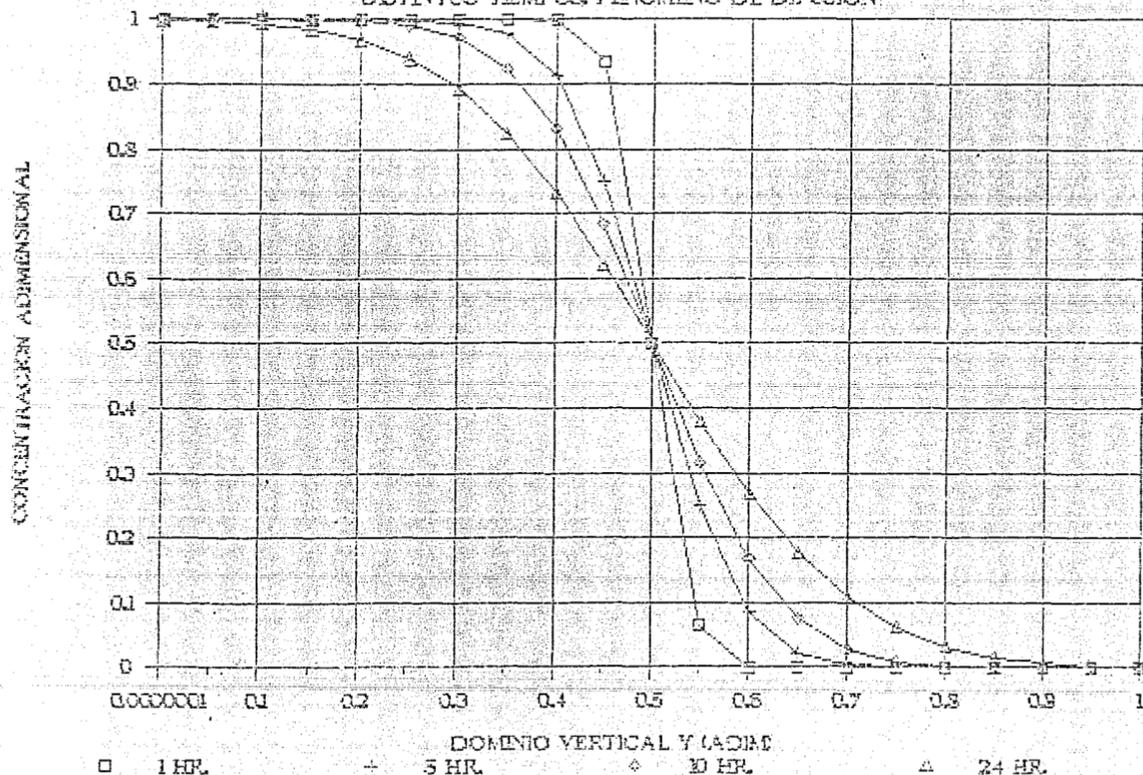
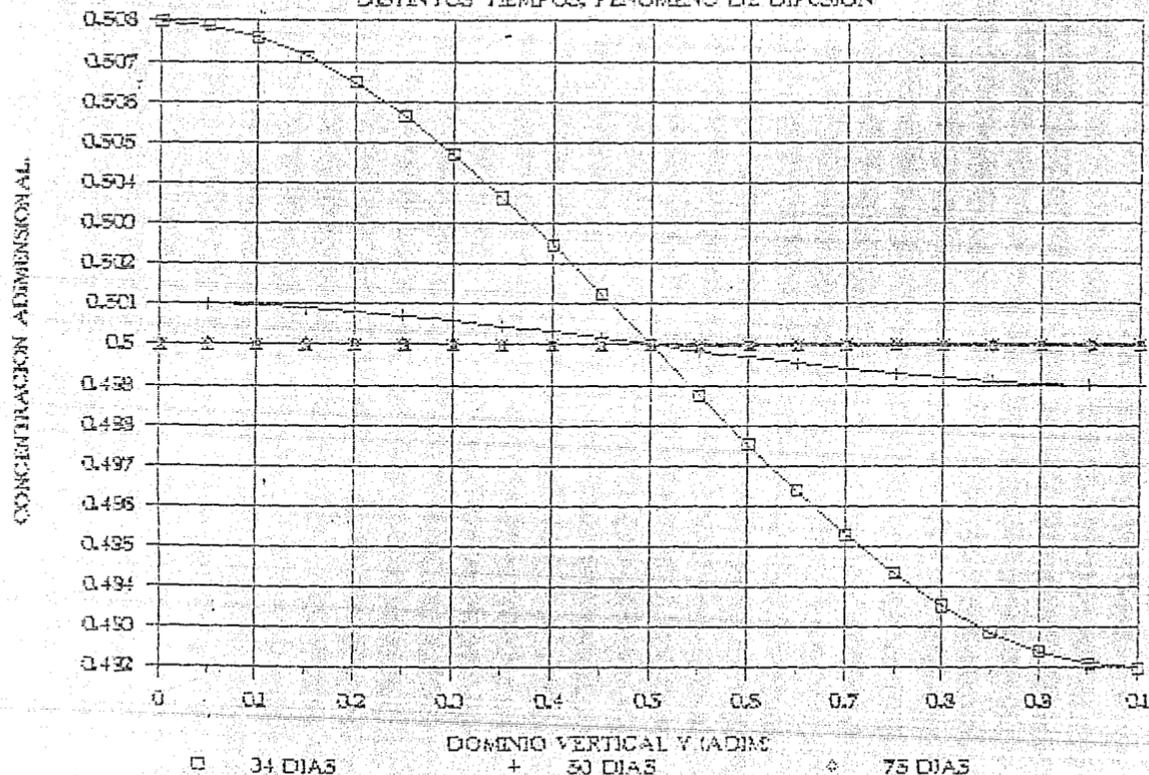


FIG. 3.3. CONCENTRACION DEL SISTEMA A

DISTINTOS TIEMPOS, FENOMENO DE DIFUSION



comparación con aquéllos casos que presentan el fenómeno de convección natural en medios doblemente difusivos.

3.3 ANALISIS DE LA SOLUCION NUMERICA DEL FENOMENO DE CONVECCION NATURAL PARA UN FLUIDO HOMOGENEO.

Se presenta este caso como referencia para el análisis y descripción de los casos con dos capas de fluido homogéneo a distintas concentraciones. No es el objetivo hacer un análisis exhaustivo de la convección natural transitoria en un fluido homogéneo, solo se pretende describir cualitativamente su comportamiento cuando es sometido a un calentamiento lateral a temperatura constante con un gradiente $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$. Este estudio se hace en estado transitorio sin llegar al estado estable, ya que solo interesa la observación del fenómeno al inicio del calentamiento. Las ecuaciones que rigen este fenómeno son la ecuación de balance de masa (2.14) cantidad de movimiento (2.16 y 2.17), y energía (2.21) con condiciones a la frontera iguales a las presentadas en la sección 2 del capítulo 2, para la velocidad y temperatura. La ecuación de balance de especies químicas (2.15) se resuelve trivialmente considerando $\rho a=0.0$ en todo el dominio. Las ecuaciones de balance constituyen un sistema acoplado, el cual se resolvió numéricamente en dos dimensiones y en estado transitorio con propiedades físicas correspondientes a las del agua a una temperatura de referencia de 25.0°C . La razón de aspecto utilizada es $A=0.333$, el número de Prandtl $Pr=6.0$ y el número de Rayleigh térmico $Rt=1.38E+07$. En la Figura 3.4 (5s. de calentamiento) se observa que aún no existen movimientos del fluido, el fenómeno de convección natural no se ha manifestado. La Figura 3.5 muestra el calentamiento hasta 10s., a este tiempo el flujo consiste de una sola celda, cuyo centro está localizado cerca de la mitad de la altura del dominio y a 3.0cm. de la pared caliente. Al tiempo $t=20s.$ de calentamiento (Figura 3.6), la celda convectiva se ha introducido al cuerpo del fluido una distancia de 9.0cm. Una observación interesante es el desplazamiento que ha sufrido su centro respecto al tiempo $t=10s.$, ubicándose ahora cerca de la frontera superior a una distancia de 1.5cm., de la pared caliente. Cuando la celda alcanza la pared vertical opuesta (Figura 3.7), se observa que su centro se encuentra ubicado aproximadamente a 2.5 cm. abajo de la frontera superior y desplazado hacia la pared caliente. La capa límite hidrodinámica a lo largo de la pared caliente posee las máximas velocidades, mientras que la capa de intrusión horizontal debida a la descarga de las capas límites hidrodinámica y térmica, presenta velocidades aproximadas a 1.0mm/s., las cuales también son favorecidas debido a que la frontera superior es libre. En las fronteras rígidas inferior y lateral izquierda se observan las velocidades mínimas tendientes a cero, lo cual es esperado debido a la condición de frontera presente en esta pared (velocidad nula). Es importante mencionar que esta conducta no se observa en el fenómeno de convección natural para un fluido homogéneo presentado por Patterson e Imberger [7] discutida en el capítulo 1, ya que en el caso estudiado por estos autores se consideró una pared caliente y una fría comparadas con la temperatura inicial del fluido y al haber una diferencia de temperaturas entre las paredes verticales, existen fuerzas que obligan al fluido a descender

cerca de la pared fría con velocidades comparables con aquellas que se presentan en la pared caliente. Respecto al campo de temperaturas, las isotermas mostradas en la Figura 3.8 presentan al principio un desarrollo similar al problema de pura conducción, y gradualmente adquieren una pequeña inclinación hacia la izquierda cerca de la superficie del dominio debida al movimiento del fluido, esto puede observarse en las Figuras 3.9 y 3.10. La Figura 3.11 muestra el campo de temperaturas a un tiempo de 120s. Nótese que cerca de la pared adiabática vertical las isolíneas de temperatura terminan perpendiculares a ella. El fluido que se encuentra abajo de la isoterma de 25.0°C conserva su temperatura inicial, y su movimiento hacia el núcleo y parte inferior del dominio solo se debe a la diferencia de presiones que se origina en la capa límite vertical y en la capa de intrusión, mientras que el fluido que se encuentra por arriba de ella es el fluido calentado que viaja en la región cercana a la superficie del dominio formando una capa horizontal (capa de intrusión) de aproximadamente 1.5cm. de espesor. De acuerdo a la teoría de Patterson e Imberger la capa de intrusión toma un tiempo de 88s. para alcanzar la pared vertical opuesta, mientras que el resultado numérico arroja un tiempo de 100s., encontrándose una diferencia del 12.0% entre los dos resultados. Con lo cual se concluye que la teoría de Patterson e Imberger predice aproximadamente bien el desplazamiento de la capa límite.

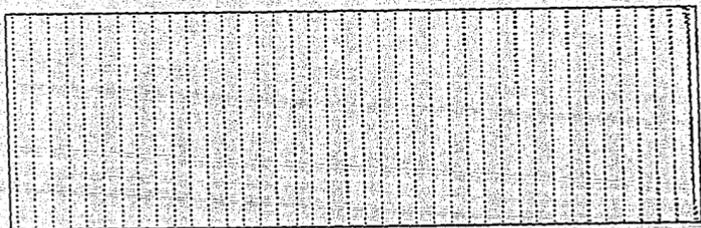
3.4 ANALISIS DE LA SOLUCION NUMERICA DEL FENOMENO DOBLENENTE DIFUSIVO CON DISTRIBUCION DE CONCENTRACION TIPO ESCALON. GRADIENTE DE TEMPERATURA 5°C . ($R=1.38E+07$)

Debido a que se estudia el estado transitorio, el análisis se hace a distintos tiempos. Es importante recordar que los ejes utilizados son el x para la longitud y el y para la altura; la pared caliente está ubicada en $x=30.0\text{cm}$, $0 \leq y \leq 10.0\text{cm}$ y la pared vertical opuesta se encuentra en $x=0$, $0 \leq y \leq 10.0\text{cm}$. La región inferior posee una concentración salina de 30.0 Kg/m^3 y tiene como límites $0 \leq y \leq 5.0\text{cm}$, $0 \leq x \leq 30.0\text{cm}$, la región superior constituida de agua pura tiene como límites $5.0\text{cm} \leq y \leq 10.0\text{cm}$, $0 \leq x \leq 30.0\text{cm}$.

La característica principal del flujo es la formación de dos celdas con movimiento del fluido ascendente en la vecindad de la pared caliente, lo cual contrasta con el sistema formado por un fluido homogéneo donde solo se forma una celda convectiva. La formación de dos celdas se debe a la estratificación del fluido de trabajo sometido a gradientes de temperatura pequeños. A los 5s. de iniciado el calentamiento, se observan movimientos ascendentes cerca de la pared caliente, con la subsecuente formación de una celda convectiva en cada región de concentración constante, (ver Figura 3.12). En las dos celdas el flujo forma una capa límite de espesor 0.7cm. aproximadamente, donde se generan las velocidades máximas que rigen el comportamiento en el resto del dominio. El centro de giro de las celdas está ubicado cerca de la parte superior de cada región. El avance horizontal de las celdas es a velocidades iguales, y en este tiempo se han introducido al cuerpo del fluido 2.0cm. A los 10s. de calentamiento, Figura 3.13, las celdas tienen un avance horizontal de 3.0cm. y las velocidades se han incrementado. Una diferencia cualitativa que empieza a ser notoria en este tiempo es la formación de capas horizontales de

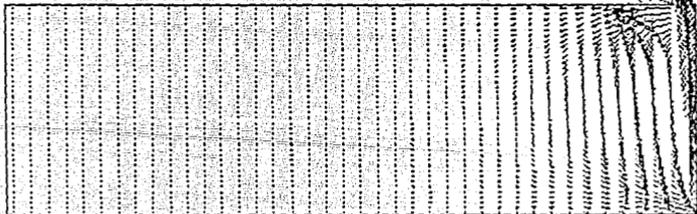
FIGURAS 3.4-3.5. CAMPOS DE VELOCIDAD A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO COFH.

$t = 5 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



→ : $1.1000E-02 \text{ m/s.}$

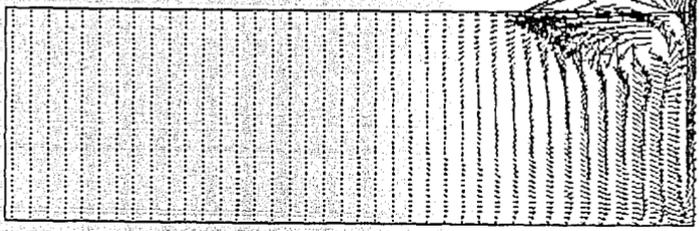
$t = 10 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



→ : $1.0000E-03 \text{ m/s.}$

20 20

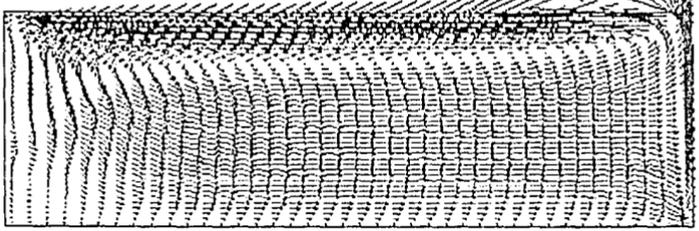
$t = 20 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



→ : $1.0000E-03 \text{ m/s.}$



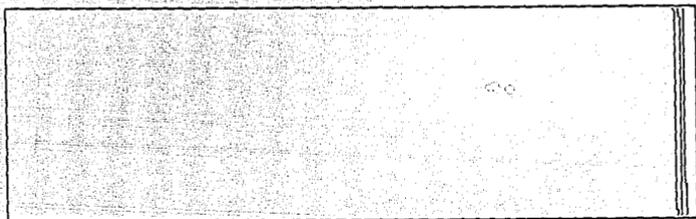
$t = 120 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C. FLUIDO HOMOGENEO}$



→ : $1.0000E-03 \text{ m/s.}$



$t = 5 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C. FLUIDO HOMOGENEO.}$



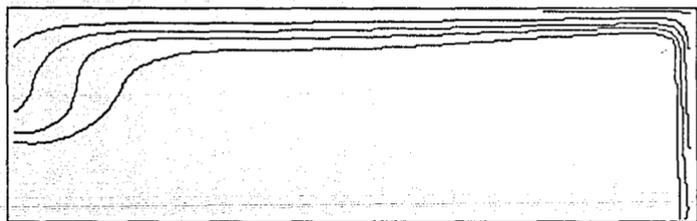
$t = 10 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$t = 20 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$t = 120 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C. FLUIDO HOMOGENEO.}$



flujo cerca de la frontera superior en dirección x que tienen un espesor aproximado a 1.0cm., estos flujos son producidos por la descarga del fluido de la capa límite. Las capas horizontales semejan a pequeños chorros (jets), cuyos frentes poseen velocidades de magnitud menor a las velocidades de la capa límite, pero mayores a aquellas en cualquier otro punto de la celda. A los 30s., Figura 3.14, la estructura de las celdas está perfectamente desarrollada y es importante describirla en detalle. Cerca de la pared caliente el movimiento vertical del fluido es generado por un gradiente de densidades que a su vez ha sido producido por el aumento de temperatura sufrido por las capas de fluido adyacentes a la pared caliente. Las celdas son prácticamente iguales, por tanto la descripción general se hace únicamente para la celda superior, en el entendimiento de que la explicación se aplica a ambas, y las diferencias entre las características de las celdas se discuten posteriormente. El fluido proveniente de la capa límite que se mueve en dirección vertical, gira 90° continuando su trayectoria horizontalmente y formando una capa que ha sido denominada por Patterson e Imberger [7] capa de intrusión. El fluido que no ha sido calentado tiende a introducirse al centro y zona inferior de la región en dirección a la pared caliente, donde es succionado por las fuerzas de arrastre del fluido que forma parte de la capa límite. El centro de la celda es de forma alargada y se halla localizado abajo de la capa de intrusión y por arriba de la mitad de la celda. Una observación interesante que empieza a ser evidente en este tiempo es la existencia de una región de esfuerzo cortante originada por el movimiento en sentido contrario que poseen las celdas a una altura cercana a la interfase salina. En esta zona se forma una región de transición donde las velocidades son iguales a cero.

Las diferencias entre las dos celdas son las siguientes:

a) Fronteras superiores: la celda correspondiente a la región de agua pura tiene una frontera libre donde se considera que hay deslizamiento del fluido; mientras que la frontera de la celda inferior es la región de transición que puede ser comparada con cierta aproximación a una frontera rígida.

b) Fronteras inferiores: la región de transición es la frontera inferior de la celda superior; la pared rígida que forma la base del dominio es la frontera inferior de la celda que se forma en la región constituida por la mezcla salina.

c) Capas de intrusión: la celda superior posee una capa de intrusión donde el perfil de velocidades toma la forma de media parábola, encontrándose las velocidades máximas adyacentes a la superficie libre. La capa de intrusión de la celda inferior tiene la forma de una parábola prácticamente completa encontrando las velocidades máximas a la mitad de la parábola, la velocidad mínima en esta capa de intrusión es cercana a cero y se encuentra en su extremo superior. Esta zona constituye la frontera entre las dos celdas.

d) Longitud de la capa de intrusión: hasta antes de los 30s. los frentes de las celdas avanzan a velocidades iguales, a los 30s. el frente de la celda inferior se ha adelantado ligeramente.

Entre los 30s. y 100s. de calentamiento (Figuras 3.14-3.16) se observa la formación de un pequeño vórtice localizado en la región de transición, por encima del final de la capa de intrusión de la celda inferior. Tal región se denota por un círculo en la Figura 3.15. Este vórtice se origina debido a fuerzas viscosas provenientes de la capa de intrusión inferior y se complementa con el flujo de regreso a la pared caliente de la celda superior, además se ve favorecido por la diferencia en el desplazamiento horizontal de las celdas que está presente hasta los 100s., tiempo en el que también se suscita la interacción de la celda inferior con la pared vertical opuesta. A los 60s. y hasta los 100s. de calentamiento (Figuras 3.15 y 3.16), el patrón de flujos es el mismo que el encontrado a los 30s., excepto que los espesores de las capas de intrusión son aproximadamente iguales. Posteriormente y hasta los 140s. (Figuras 3.17-3-20) el flujo de la celda inferior permanece casi inalterado, modificándose ligeramente hacia abajo cerca de la pared vertical opuesta. Esta modificación se debe a que la celda superior continúa avanzando y requiere espacio para acomodarse por encima de la interfase. A los 140s. (Figura 3.20), la celda superior tiene contacto con la pared vertical opuesta observando una conformación completa de su estructura. En la Tabla 3.1 se presentan datos comparativos de las celdas inferior y superior a los tiempos que se citan en la descripción del flujo.

TIEMPO DE CALENTAMIENTO (SEGUNDOS)	AVANCE Y ESPESOR DE LA CAPA INTRUSION C. INF. (CENTIMETROS)		AVANCE Y ESPESOR DE LA CAPA INTRUSION C. SUP. (CENTIMETROS)	
		INDEFINIDO		INDEFINIDO
5	2.0	INDEFINIDO	2.0	INDEFINIDO
10	3.6	0.9	3.6	0.9
30	9.5	0.9	7.0	1.5
60	19.0	1.1	14.7	1.6
100	30.0	1.4	23.0	1.6
110	29.2	1.4	25.0	1.8
120	29.2	1.5	27.0	1.8
130	29.2	1.5	28.8	1.8
140	28.5	1.5	30.0	1.8

Tabla 3.1. Datos comparativos de las celdas inferior y superior a los tiempos que se citan en la descripción y análisis de este caso.

El análisis del campo de velocidades hecho hasta ahora ha sido a distintos tiempos, los cuales han sido elegidos para hacer una descripción global del desarrollo del flujo con un enfoque principalmente espacial. A continuación se presenta una descripción de la velocidad en función del tiempo en varios puntos (x,y) del dominio. La Figura 3.21 muestra el dominio del sistema en el cual se han señalado los puntos analizados.

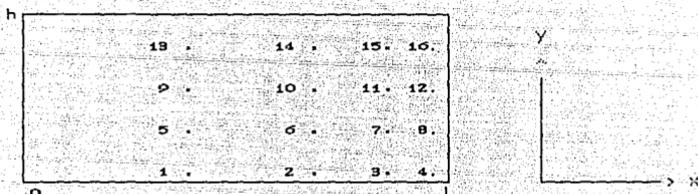


Figura 3.21. Dominio del sistema donde se indican los puntos (x,y) analizados.

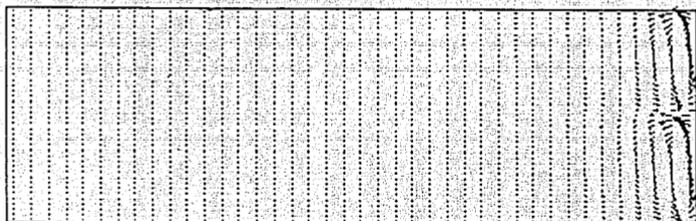
Los puntos señalados (x,y) tienen los siguientes valores en centímetros:

1 (14.25, 0.75)	9 (14.25, 6.25)
2 (21.75, 0.75)	10 (21.75, 6.25)
3 (26.25, 0.75)	11 (26.25, 6.25)
4 (29.25, 0.75)	12 (29.25, 6.25)
5 (14.25, 4.50)	13 (14.25, 9.25)
6 (21.75, 4.50)	14 (21.75, 9.25)
7 (26.25, 4.50)	15 (26.25, 9.25)
8 (29.25, 4.50)	16 (29.25, 9.25)

donde $h=10.0\text{cm.}$ y $t=30.0\text{cm.}$

Las Figuras 3.22-3.25 presentan la componente de las velocidades horizontales y verticales como función del tiempo para los puntos señalados anteriormente, donde los puntos 1-8 corresponden a la celda inferior, los cuatro primeros al flujo de regreso hacia la pared caliente y los cuatro últimos a la capa de intrusión, de la misma forma los puntos 9-16 corresponden a la celda superior. La observación más importante es el fenómeno oscilatorio que se presenta en todos los puntos que se analizan. Al tiempo inicial la velocidad en todos los puntos es cero (condición inicial), posteriormente aumenta gradualmente a una razón promedio de $7.0E-05\text{m/s}^2$ alcanzando un valor superior para formar un máximo cuya ubicación depende de la posición de los puntos en el eje x. En la mayoría de los casos las curvas muestran una función monótona decreciente, excepto para los puntos 1, 3, 9, y 13 cuya ordenada es $x=14.25\text{cm.}$, en los cuales se presenta una oscilación enfatizando la naturaleza oscilatoria del fenómeno. Las Figuras 3.26-3.27 muestran el comportamiento de la velocidad en los puntos 5-8 y 13-16, (puntos correspondientes a las capas de intrusión de las celdas inferior y superior respectivamente) en función del eje horizontal x y a distintos tiempos. La conclusión más sobresaliente que se presenta es la conducta oscilatoria del fenómeno, observando la trayectoria de una onda interna a medida que transcurre el tiempo de calentamiento. En general, los cuatro tiempos analizados muestran la misma conducta. Cerca de la pared caliente $x=30.0\text{cm.}$ se aprecia lo que parece ser la capa límite hidrodinámica con un espesor aproximado a 7.0mm. , posteriormente

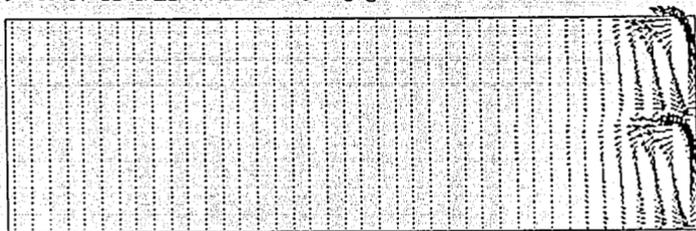
$t = 5 \text{ s. DE CALENTAMIENTO. } T = 5 \text{ C}$



$\longrightarrow : 1.0000E-03 \text{ m/s.}$



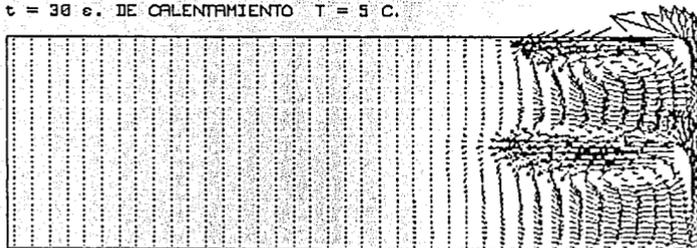
$t = 10 \text{ s. DE CALENTAMIENTO. } T = 5 \text{ C}$



$\longrightarrow : 1.0000E-03 \text{ m/s.}$



$t = 30 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

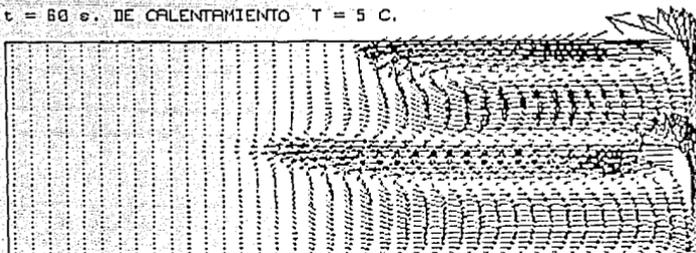


$\longrightarrow : 1.0000E-03 \text{ m/s.}$

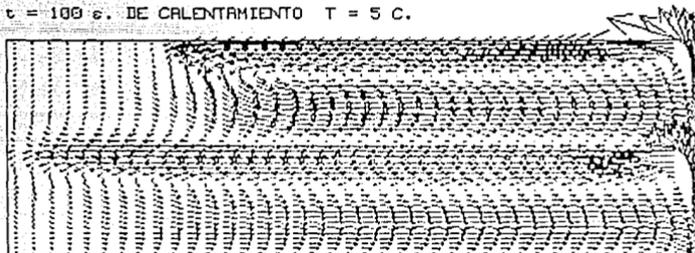


FIGURAS 3.15-3.17. CAMPOS DE VELOCIDAD A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTE PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 5°C.

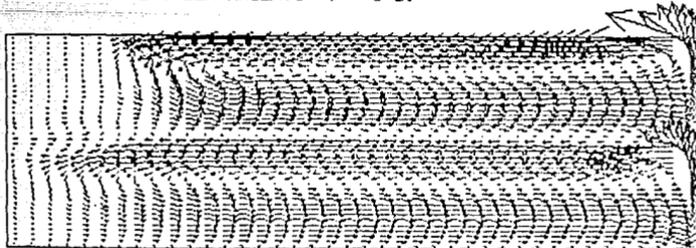
$t = 60$ s. DE CALENTAMIENTO $T = 5$ C.



$t = 100$ s. DE CALENTAMIENTO $T = 5$ C.

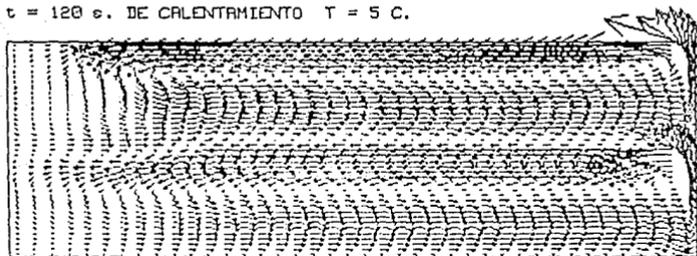


$t = 110$ s. DE CALENTAMIENTO $T = 5$ C.



FIGURAS 3.18-3.20. CAMPOS DE VELOCIDAD A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTE PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 5°C.

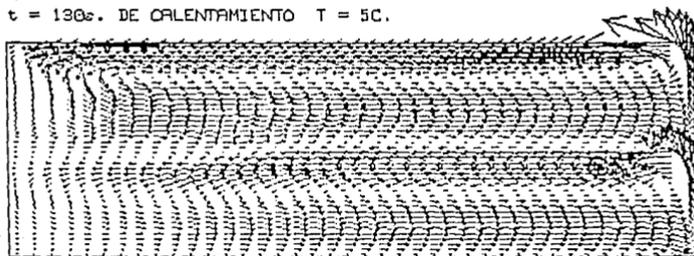
$t = 120$ s. DE CALENTAMIENTO $T = 5$ C.



→ : $1.0000E-03$ m/s.



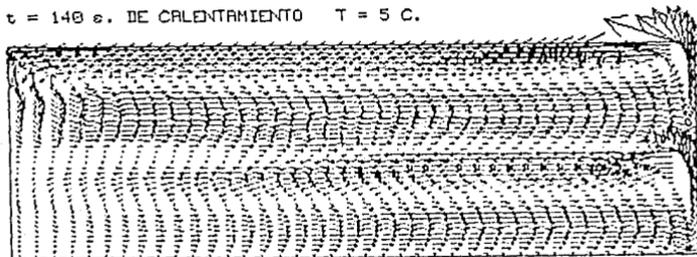
$t = 130$ s. DE CALENTAMIENTO $T = 5$ C.



→ : $1.0000E-03$ m/s.



$t = 140$ s. DE CALENTAMIENTO $T = 5$ C.



→ : $1.0000E-03$ m/s.



VELOCIDAD EN FUNCION DEL TIEMPO PARA DISTINTOS PUNTOS
DEL EJE VERTICAL Y, Y EL PUNTO X=14.25 cm.

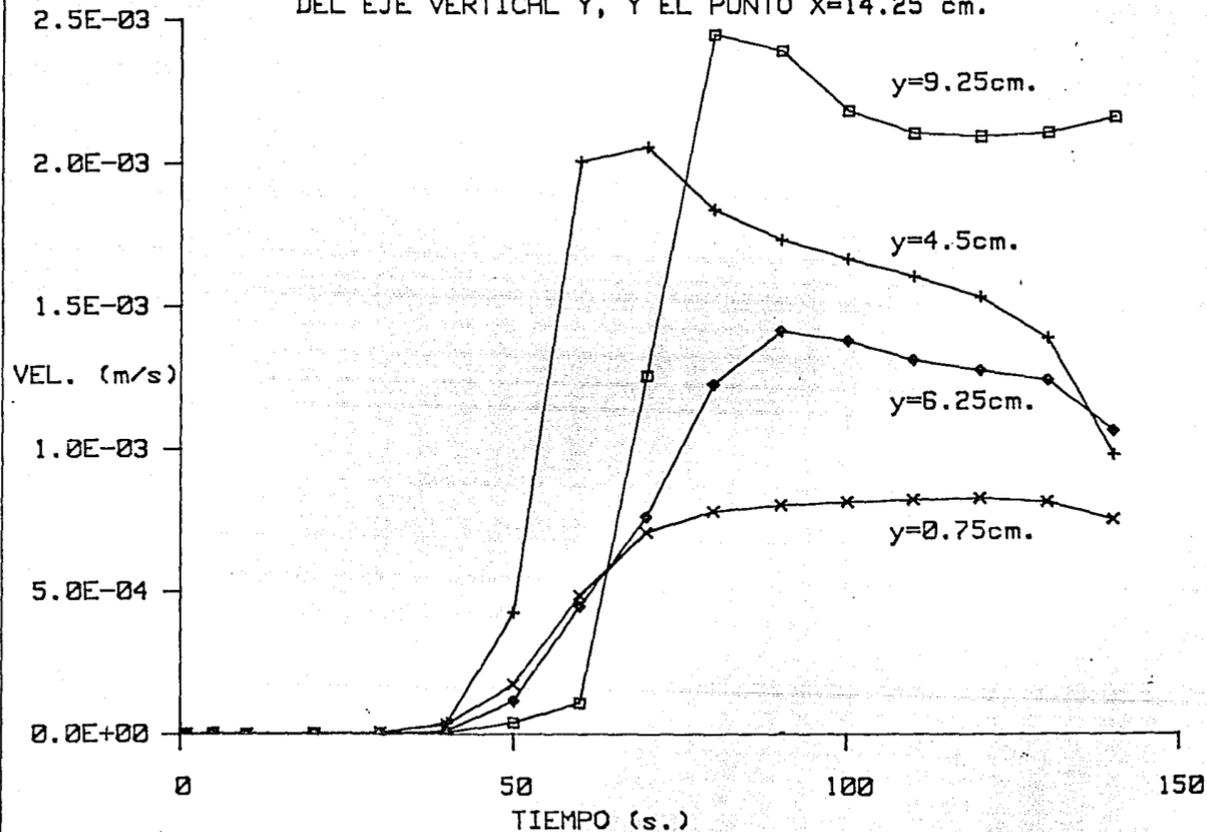


FIGURA 3.22.

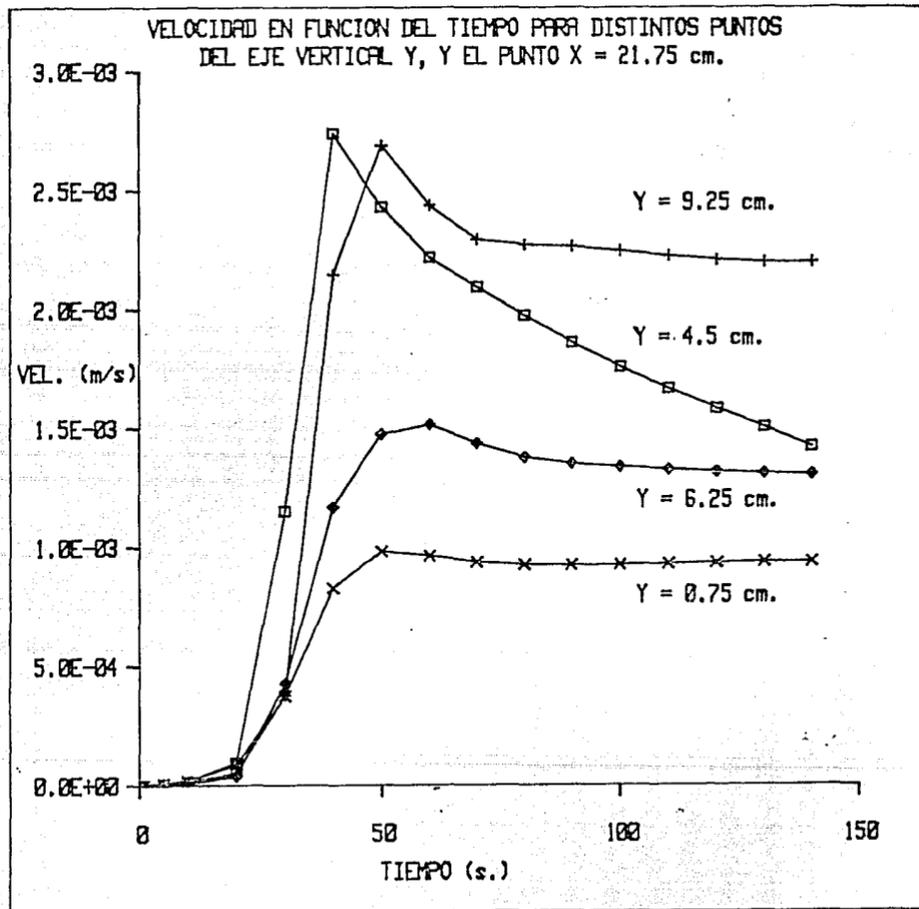


FIGURA 3.23.

VELOCIDAD EN FUNCION DEL TIEMPO PARA DISTINTOS PUNTOS
DEL EJE VERTICAL Y, Y EL PUNTO X = 26.25 cm.

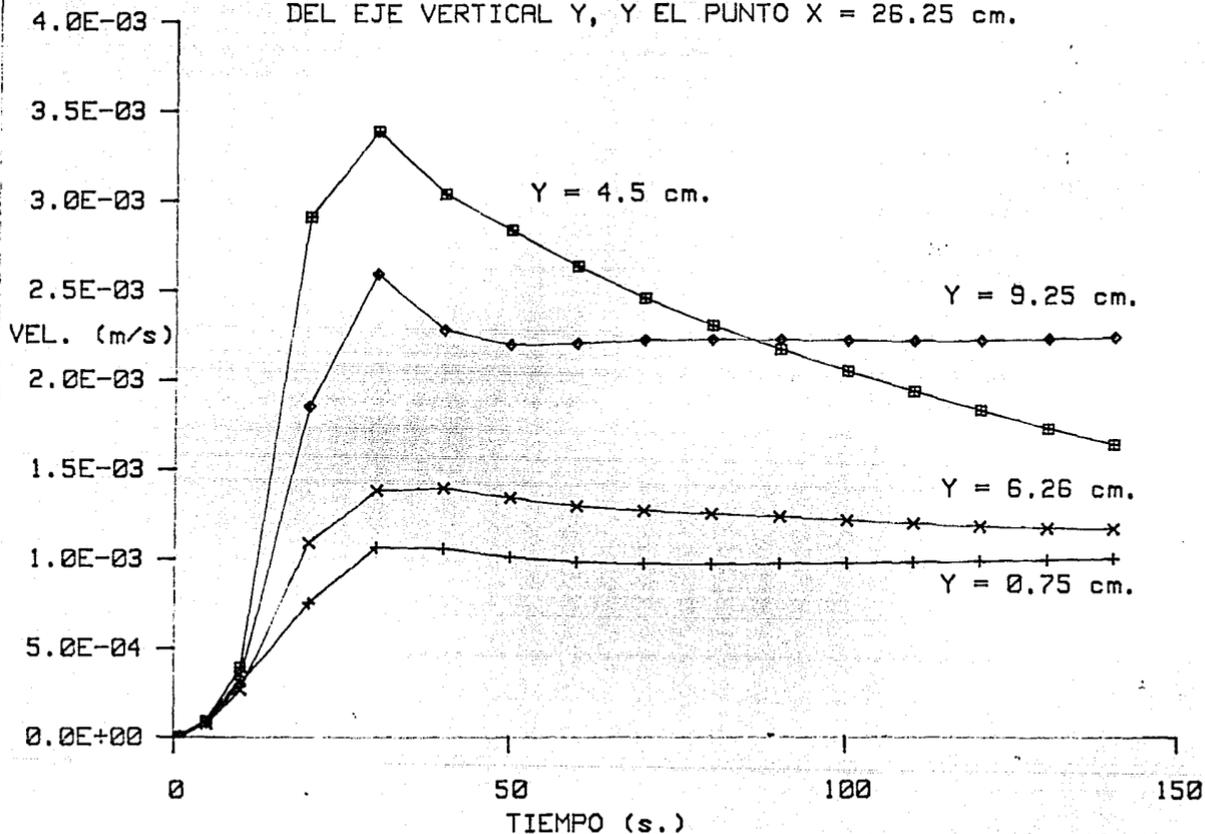


FIGURA 3.24.

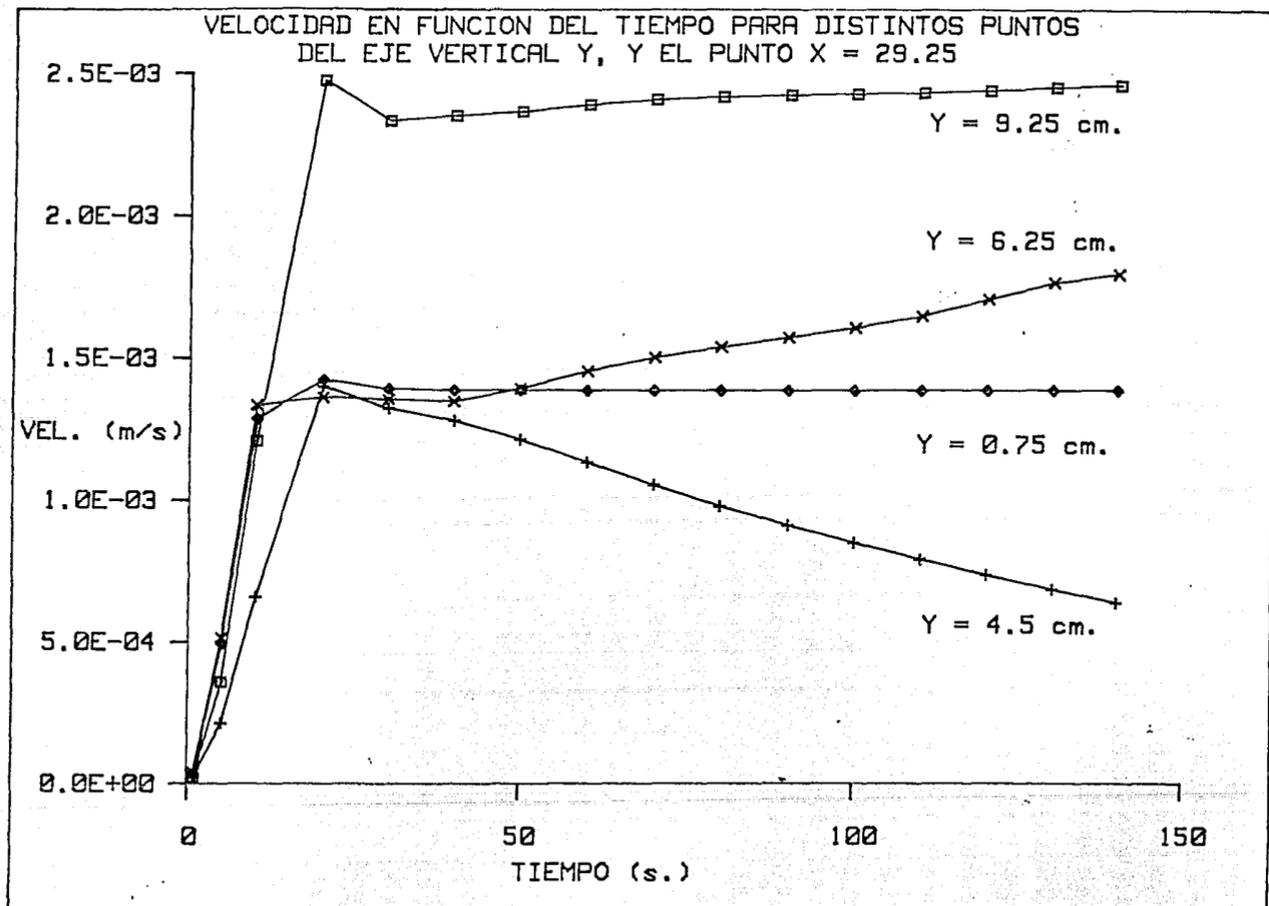


FIGURA 3.25.

VELOCIDAD EN FUNCION DEL EJE X PARA EL PUNTO Y=4.5 cm.
A DISTINTOS TIEMPOS.

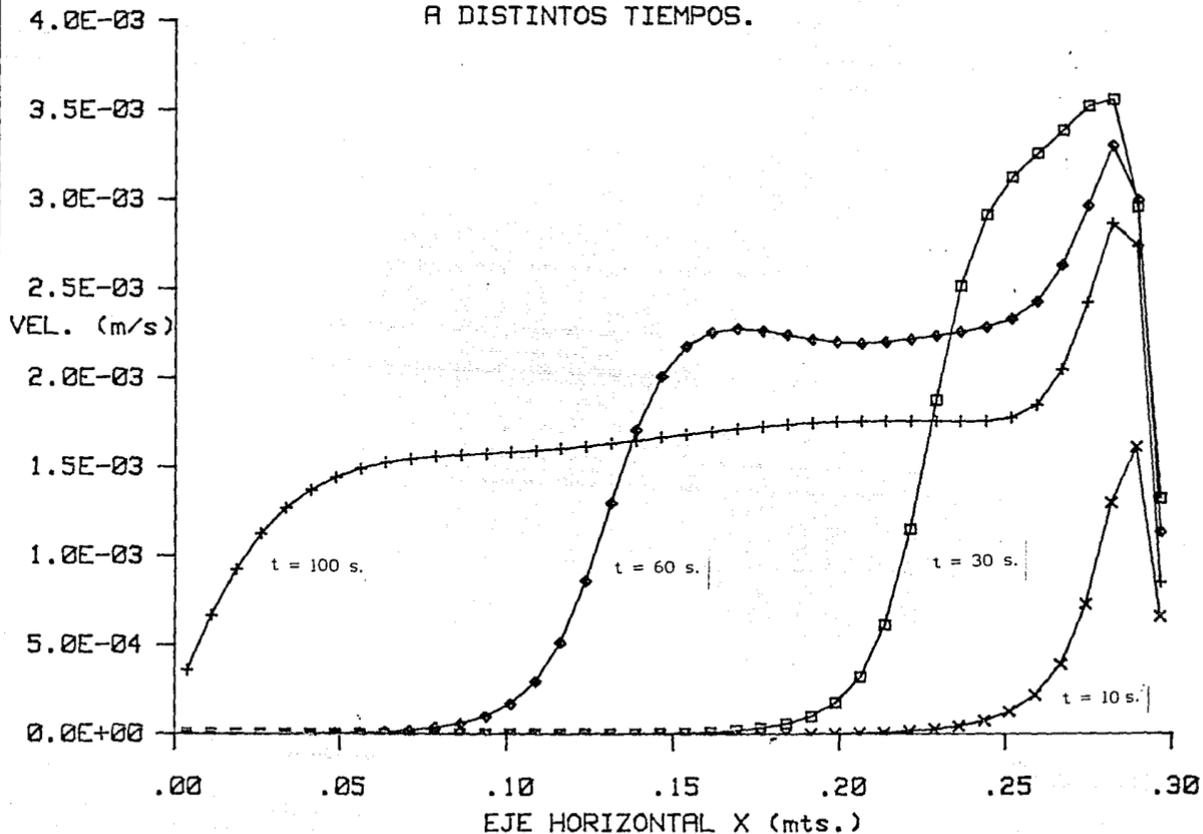


FIGURA 3.26.

VELOCIDAD EN FUNCION DEL EJE X PARA EL PUNTO Y = 9.25 cm.
A DISTINTOS TIEMPOS.

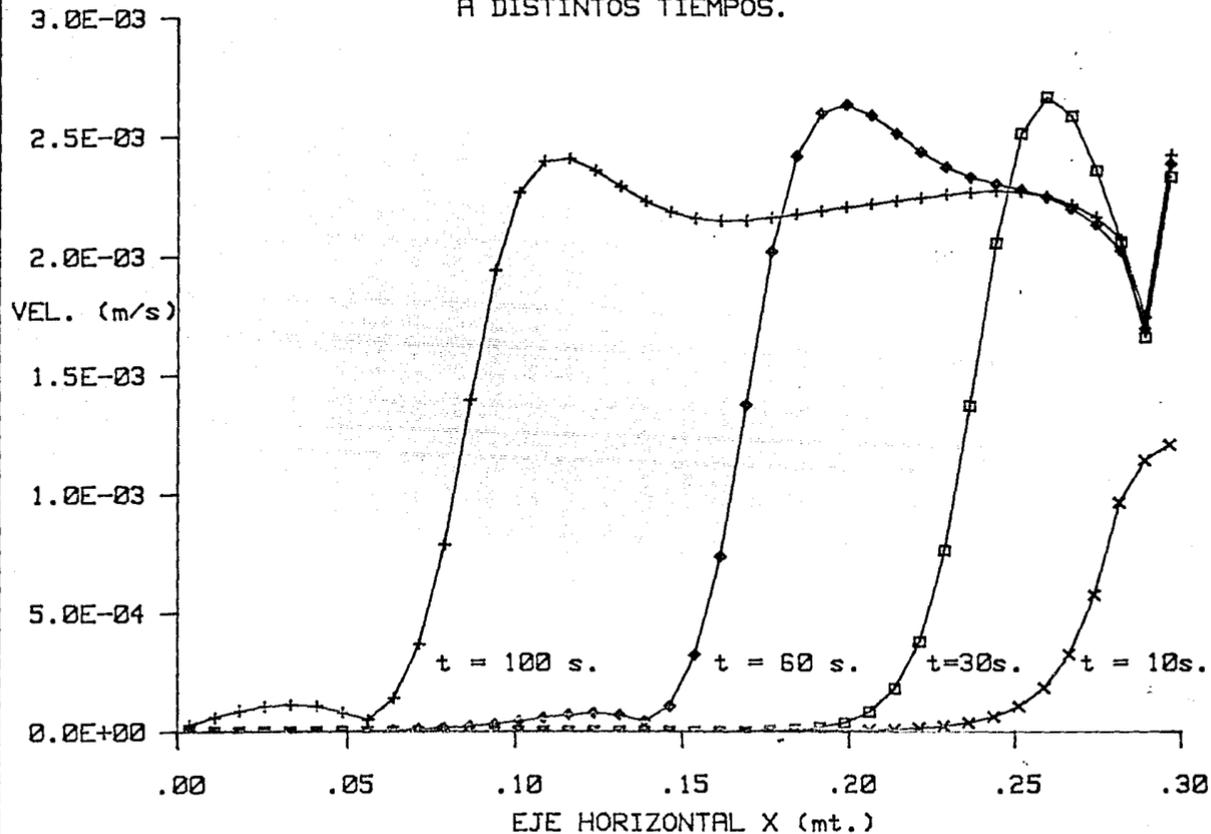


FIGURA 3.2.

las curvas presentan un decrecimiento en su velocidad alcanzando el cero en distintos puntos del eje x según el tiempo que se trate. A partir de los campos de velocidad mostrados anteriormente, se obtienen longitudes de avance de las celdas respecto a la pared caliente, observando que la celda inferior alcanza más rápidamente la pared vertical opuesta, en estas gráficas se aprecia otra vez esta particularidad.

El siguiente campo que se analiza es el de temperaturas. A los 5s. de calentamiento se observa un fenómeno claramente conductivo, con isotermas verticales cerca de la pared caliente (Figura 3.28). Hasta aquí los efectos de arrastre no parecen ser dominantes respecto a los efectos difusivos térmicos. A los 10s. se presentan pequeñas deformaciones en las isotermas, lo cual indica que la conducta dinámica del fluido ha empezado a tener importancia sobre la distribución de temperaturas debida únicamente a los efectos difusivos térmicos. Las deformaciones sufridas por las isotermas se encuentran en la región donde el sistema presenta la interfase salina, observando pequeñas salientes en forma de un semicírculo alargado (Figura 3.29). De acuerdo a la Figura 3.30, a los 30s. de calentamiento las isotermas están claramente deformadas conforme a la estructura del flujo de las celdas convectivas. Cerca de la pared caliente hasta dos tercios de la altura de la región inferior, las isotermas permanecen verticales (movimiento del fluido ascendente), en seguida cambian drásticamente en dirección horizontal (x) hasta una longitud de 6.7cm. Las isotermas correspondientes a la celda inferior tienen una forma aproximada al número 9 siendo la parte ovalada la correspondiente a la capa de intrusión horizontal, las isotermas de la celda superior tienen una forma parecida. La tabla 3.2 muestra datos cuantitativos del campo de temperaturas a distintos tiempos.

TIEMPO DE CALENTAMIENTO (SEGUNDOS)	AVANCE DE LAS ISOTERMAS CELDA INFERIOR. (CM.)	AVANCE DE LAS ISOTERMAS CELDA SUPERIOR (CM.)	RANGO DE TEMPERATURAS (°C)
5	0.9	0.9	25.0-25.2
10	1.8	1.8	25.0-25.3
30	6.7	6.7	25.0-25.4
60	14.2	13.5	25.0-25.4
100	20.5	21.6	25.0-25.6
110	21.8	23.6	25.0-25.6
120	21.6	25.5	25.0-25.7
130	21.9	27.3	25.0-25.8
140	22.3	29.1	25.0-25.8

Tabla 3.2. Datos comparativos de las isotermas a distintos tiempos de las dos celdas convectivas.

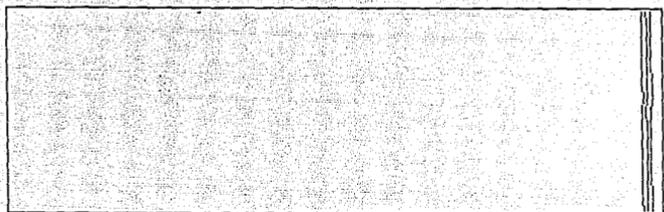
Una observación interesante es que hasta los 60s. de calentamiento (Figura 3.31), el avance horizontal de las isotermas es aproximadamente el mismo para las dos celdas. Posteriormente las isotermas de la celda superior alcanzan longitudes apreciablemente mayores, manteniendo este comportamiento hasta los 140s. de calentamiento (Figura 3.36). Cuando la celda inferior ha alcanzado la pared vertical adiabática, el avance de sus isotermas se frena completamente llegando a una longitud de 22.0cm. de la pared caliente. Mientras tanto, las isotermas de la celda superior

continúan avanzando gradualmente hasta llegar a 1.0cm. de la pared vertical adiabática, lo cual sucede cuando la capa de intrusión de esta celda interacciona con dicha pared. Una observación que compete tanto a los campos de velocidad como a los de temperatura es la siguiente: ya se ha dicho que a partir de los 30s. el avance de la celda inferior es mayor que el de la celda superior, encontrándose un comportamiento contrario en las isoclinas de temperatura, es decir, el avance de las isotermas de la celda inferior es menor que el de la celda superior. Es claro que debido a las propiedades de transporte del fluido y a las condiciones a la frontera del sistema (refiriéndose principalmente a la temperatura de la pared caliente), no necesariamente los frentes del flujo y los frentes de las isotermas deben tener la misma velocidad de avance. En este caso particular las dos celdas se hallan bajo distintas condiciones que originan los efectos descritos. El flujo de regreso de la celda superior recibe una pequeña cantidad de calor proveniente de la capa de intrusión de la celda inferior donde se observa que hay un fuerte gradiente de temperatura, que se acentúa cerca de la pared caliente. Este calor produce un aumento de temperatura en el fluido, y por tanto el gradiente de temperatura que se manifiesta cerca de la pared caliente decrece, con la subsecuente disminución de las fuerzas de flotación. Estas a su vez originan las velocidades ascendentes que rigen el comportamiento en el resto del dominio. Así, al disminuir las velocidades, la celda superior se ve frenada con el subsecuente decremento en el avance horizontal de la misma. Por otro lado el fluido de las capas adyacentes a la pared caliente que va a formar parte de la capa de intrusión posee una mayor temperatura lo cual provoca un avance mayor de las isotermas comparado con el avance del flujo. Respecto a la celda inferior, el flujo de regreso a la pared caliente no recibe calor adicional ya que tiene contacto con una frontera adiabática, por tanto, el gradiente que se produce cerca de la pared caliente es mayor y origina velocidades ascendentes más grandes con el consiguiente aumento en el avance horizontal de la capa de intrusión y la disminución en el avance de las isotermas respecto al de la celda superior.

A continuación se presenta un análisis de la temperatura en función del tiempo para los mismos puntos que se muestran en la Figura 3.21. Como se observa en las Figuras 3.37-3.40, la temperatura también muestra un fenómeno oscilatorio. El comportamiento global de esta variable está constituida por tres etapas, la primera consiste de un tiempo en el que el frente de onda térmica proveniente de la pared caliente aún no llega al punto en cuestión. Esto se observa en todos los puntos con excepción de $x=29.25\text{cm}$. (cerca de la pared caliente), donde el cambio en temperatura se presenta a tiempos menores a 10s. La segunda etapa se caracteriza por un aumento de la temperatura a una razón promedio de $1.38E-02^{\circ}\text{C}/\text{seg}$, formando un máximo que, como el encontrado en la velocidad, depende de la localización de los puntos en el eje x . En la tercera etapa el aumento de la temperatura continúa pero a una razón promedio más pequeña de $5.91E-4^{\circ}\text{C}/\text{seg}$. Los puntos $y=0.75\text{cm}$. y $y=6.25\text{cm}$. correspondientes a $x=14.25$, 21.75 y 26.25 , que están localizados en el flujo de regreso a la pared caliente, no sufren ningún cambio respecto a su condición inicial, lo cual indica que el transporte de calor no se

FIGURAS 3.28-3.30. CAMPOS DE TEMPERATURA A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTE PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 5°C .

$t = 5 \text{ s. DE CALENTAMIENTO. } T = 5 \text{ C}$



$t = 10 \text{ s. DE CALENTAMIENTO. } T = 5 \text{ C}$

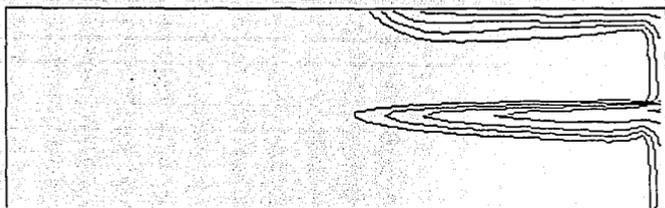


$t = 30 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

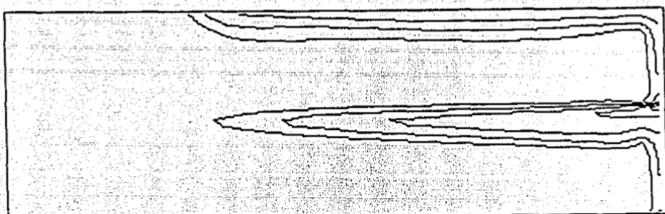


FIGURAS 3.31-3.33. CAMPOS DE TEMPERATURA A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTE PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 5°C .

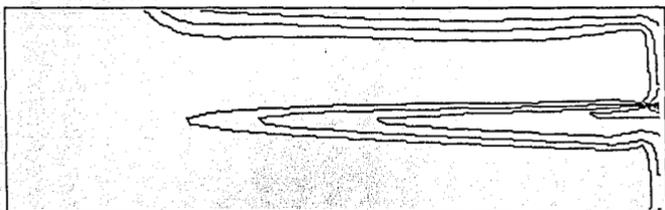
$t = 60 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$t = 100 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

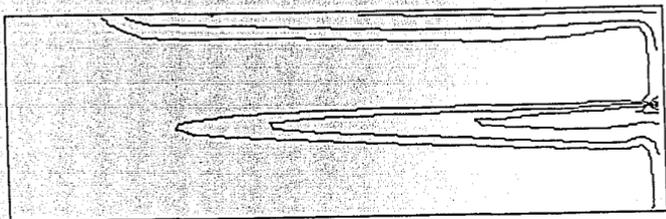


$t = 110 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

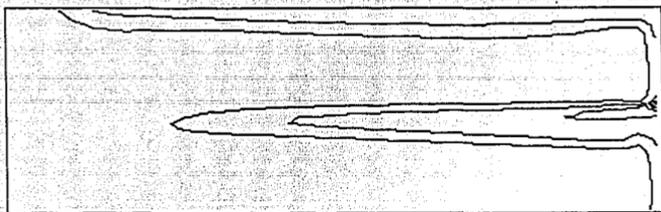


FIGURAS 3.34-3.36. CAMPOS DE TEMPERATURA A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTE PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 5°C .

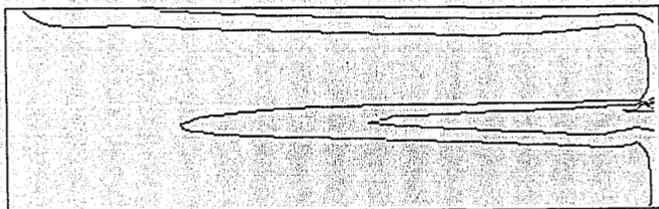
$t = 120 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$t = 130 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$t = 140 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



TEMPERATURA EN FUNCION DEL TIEMPO PARA DISTINTOS PUNTOS
DEL EJE VERTICAL Y, Y EL PUNTO X = 14.25 cm.

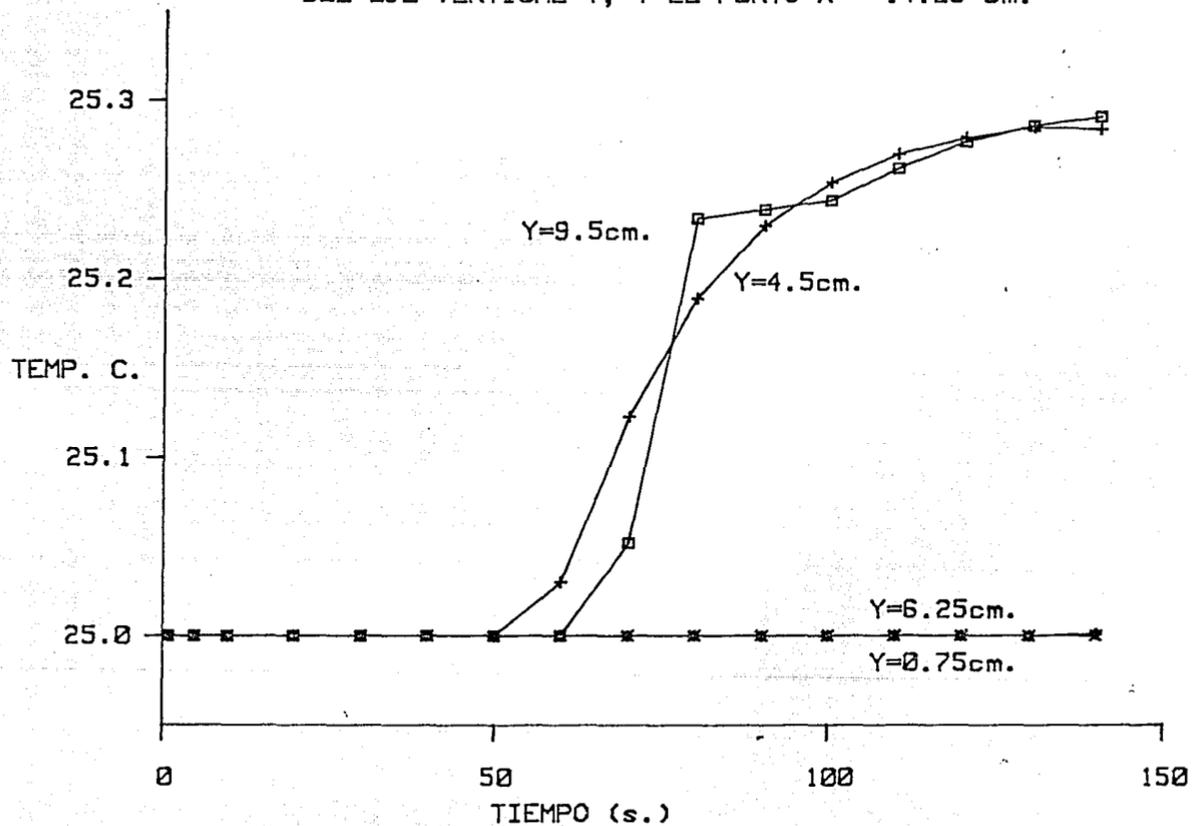


FIGURA 3.37.

TEMPERATURA EN FUNCION DEL TIEMPO PARA DISTINTOS PUNTOS
DEL EJE VERTICAL Y, Y EL PUNTO X = 21.75 cm.

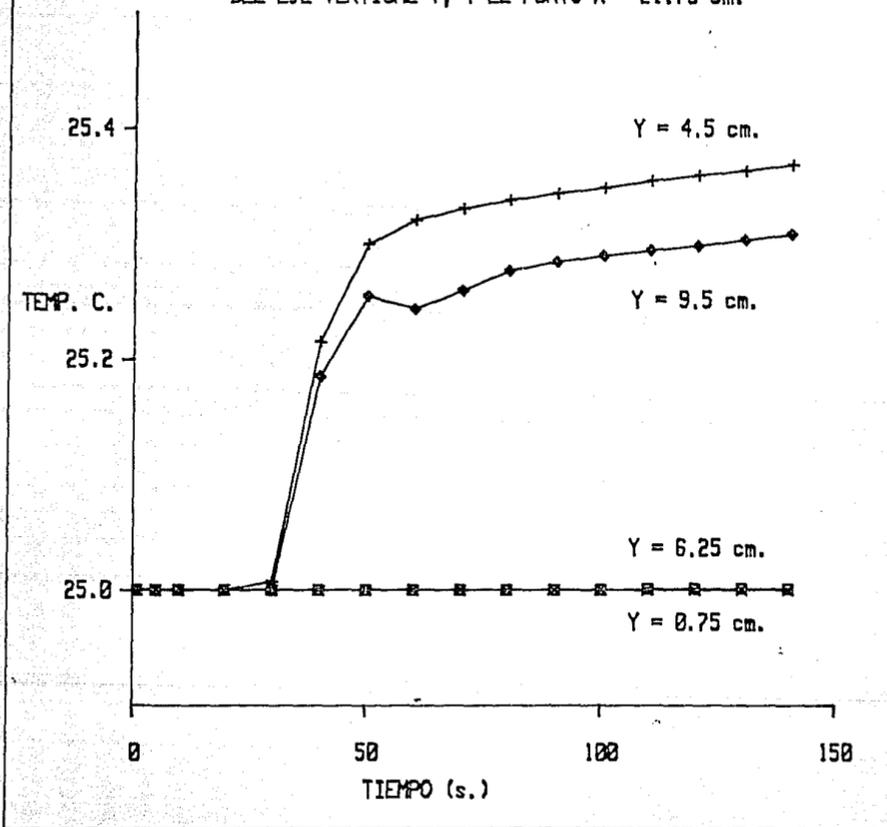


FIGURA 3.38.

TEMPERATURA EN FUNCION DEL TIEMPO PARA DISTINTOS PUNTOS
DEL EJE VERTICAL Y, Y EL PUNTO X = 26.25 cm.

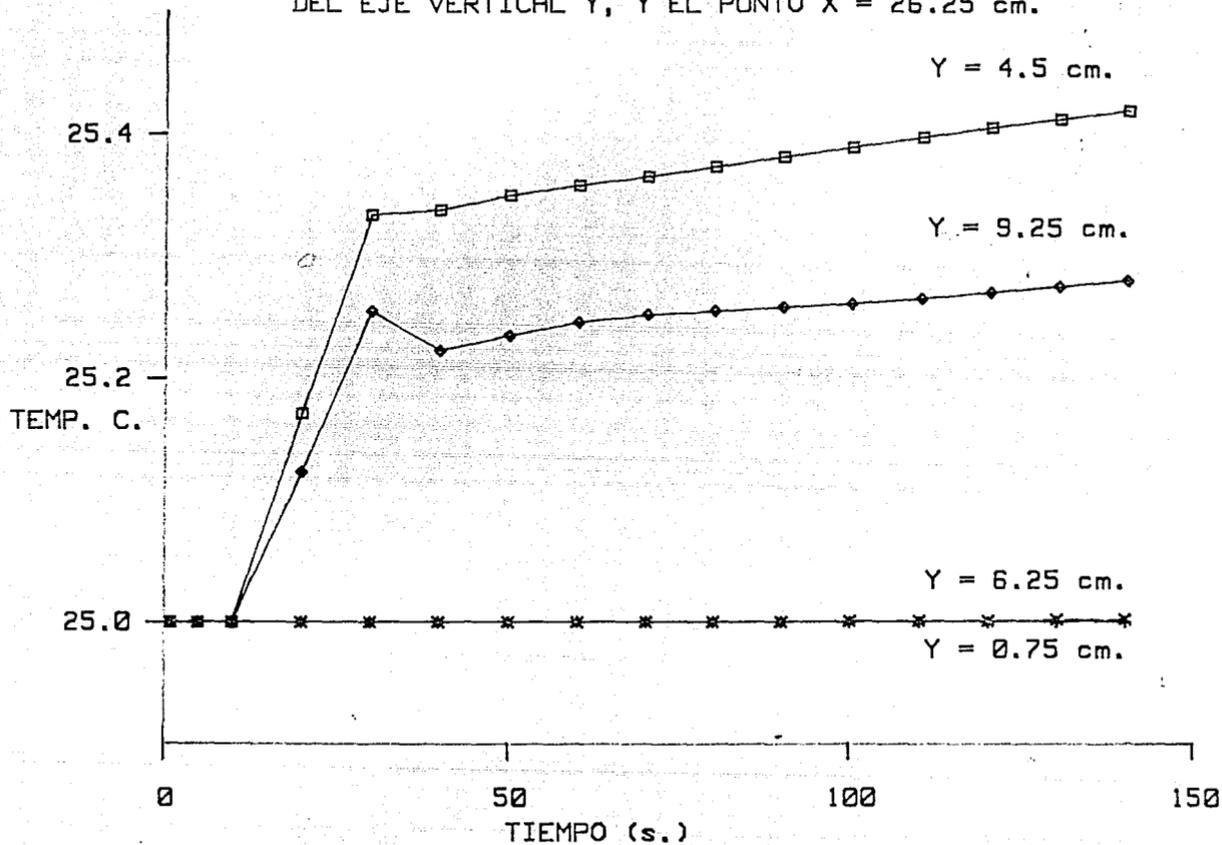


FIGURA 3.39.

TEMPERATURA EN FUNCION DEL TIEMPO PARA DISTINTOS PUNTOS
DEL EJE VERTICAL Y, Y EL PUNTO X = 29.25 cm.

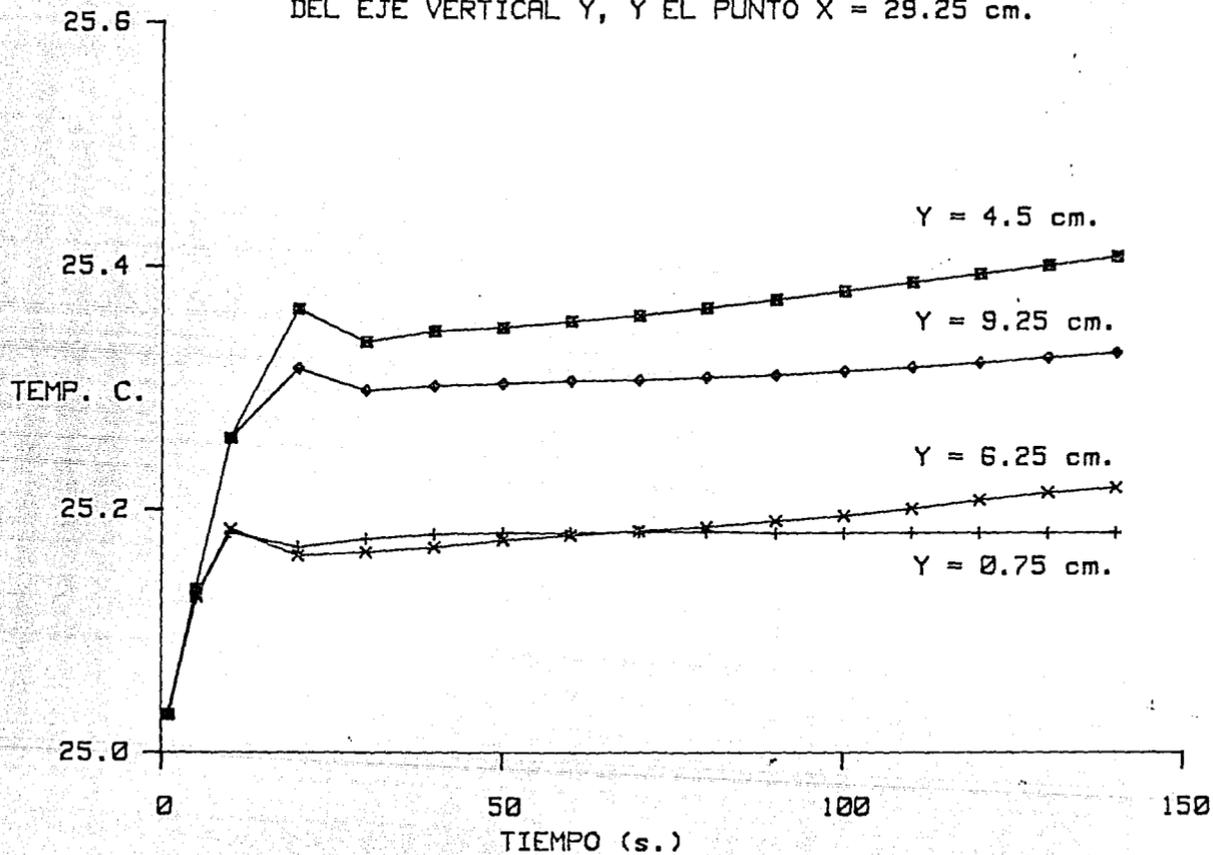


FIGURA 3.40.

ha manifestado en esas regiones de las celdas. Por otra parte, la Figura 3.37 muestra que cerca de la pared caliente ($x=29.25\text{cm.}$) el flujo de regreso a la pared caliente ha aumentado su temperatura de manera apreciable.

Respecto al campo de concentraciones se presentan las Figuras 3.41-3.49 que muestran la conducta de la composición del sistema hasta los 140s. Bajo las condiciones que se utilizan en este estudio y hasta el tiempo de observación del fenómeno no se aprecia un mayor deterioro en la distribución de concentración, por tanto, se concluye que en la región superior formada por agua pura se mantiene una celda convectiva sin tener interacción notable con la región inferior que también posee una celda convectiva que se mantiene dentro de su dominio. El cambio máximo de la concentración es del 3.0%.

GRADIENTES DE TEMPERATURA 2°C Y 10°C . ($Rt=5.53E+06$ y $Rt=2.76E+07$).

A continuación se procede a hacer una comparación del comportamiento de los distintos gradientes de temperatura contemplados en este estudio. Esta variación enriquece el estudio del fenómeno doblemente difusivo y permite mostrar conclusiones interesantes aplicables a sistemas que son factibles de sufrir calentamiento lateral de distintas magnitudes. No se pretende hacer una descripción detallada como la presentada para el gradiente $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$, sino más bien enfatizar en las diferencias y analogías encontradas. Los resultados obtenidos muestran un comportamiento cualitativo del patrón de flujos similar en los tres casos, es decir, formación de una celda convectiva en cada región de concentración constante. Los tiempos característicos de interacción de las celdas con la pared vertical opuesta son diferentes, y se muestran en la Tabla 3.3.

CASOS ESTUDIADOS	$\Delta T=2.0\text{ C}$ $Rt=5.53E+06$	$\Delta T=5.0\text{ C}$ $Rt=1.38E+07$	$\Delta T=10.0\text{ C}$ $Rt=2.76E+07$
CELDA INFERIOR	110.0s	100.0s	80.0s
CELDA SUPERIOR	190.0s	140.0s	100.0s

Tabla 3.3. Tiempos en los que se suscita la interacción de las celdas con la pared vertical opuesta a la pared inclinada de los tres casos DDTE con distintos gradientes de temperatura.

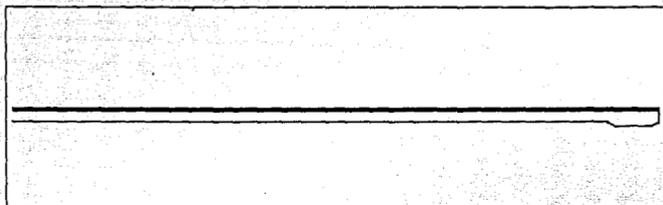
Tal como se esperaba, para un gradiente de temperatura mayor $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ (número de Rayleigh mayor), la generación de movimiento es mas apreciable, el caso contrario se presenta para $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$ donde el número de Rayleigh es prácticamente un orden de magnitud menor.

Bajo las condiciones estudiadas aquí, se observa que a los 5s. de iniciado el calentamiento el caso $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$ aún no muestra efectos de flotación debidos a la pared caliente, mientras que para los otros casos ya hay indicios de pequeñas velocidades, siendo mas

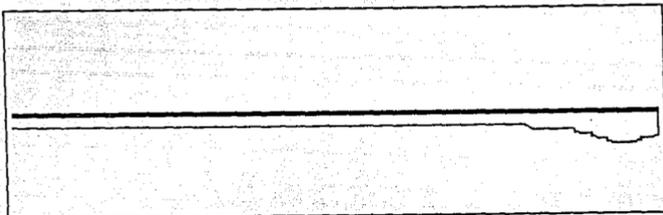
FIGURAS 3.41-3.43. CAMPOS DE CONCENTRACION A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTE PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 5°C .

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

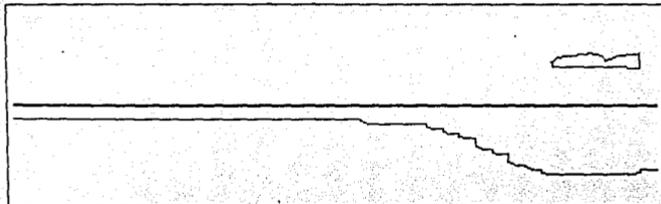
$t = 5 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$t = 10 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

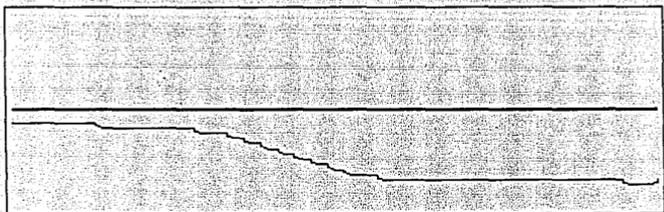


$t = 30 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

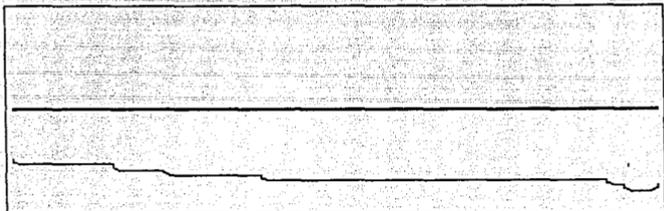


FIGURAS 3.44-3.46. CAMPOS DE CONCENTRACION A DISTINTOS TIEMPOS
PARA EL CASO DDTE PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 5°C .

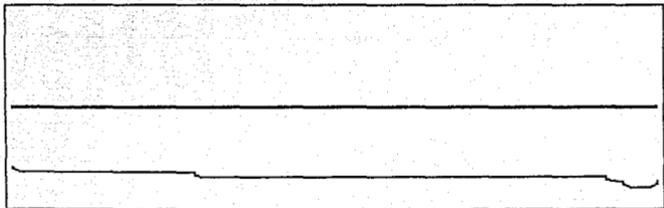
$t = 60 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$t = 100 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

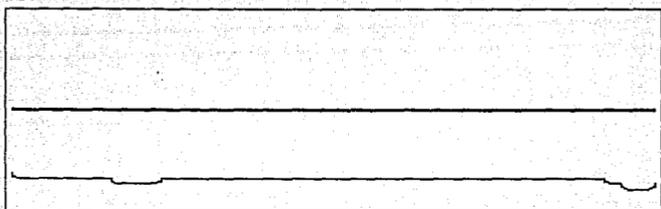


$t = 110 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

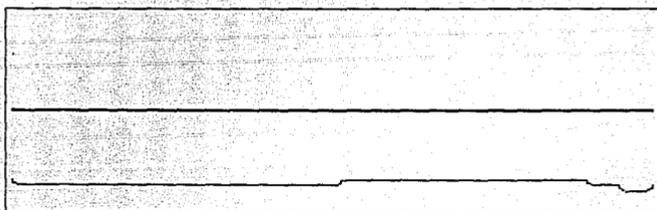


FIGURAS 3.47-3.49. CAMPOS DE CONCENTRACION A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTE PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 5°C .

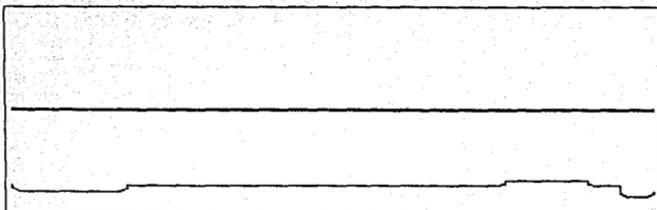
$t = 120 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$t = 130 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$t = 140 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



acentuadas en el caso $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$. Los espesores de las capas de intrusión son aproximadamente iguales. Si se comparan campos de velocidades al mismo tiempo de calentamiento, las velocidades máximas encontradas poseen valores mas grandes para $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, y los valores mas pequeños corresponden al gradiente $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$. El pequeño vórtice en la interfase observado en los resultados del gradiente $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$, vuelve a encontrarse en los otros dos casos, localizándose temporalmente entre 100s.-120s. para $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$ y entre 60s.-80s. para $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$. En este último caso, el fenómeno del vórtice es mas notable, y su identidad incuestionable. Respecto a los campos de temperatura, la diferencia mas notable es el tiempo en el que se presenta el comportamiento puramente conductivo, siendo hasta 8s. para $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$, hasta 5s. para $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ y hasta 3s. para $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$. Este resultado es consecuencia de la razón de generación de movimiento convectivo observado en los campos de velocidad para los diferentes números de Rayleigh. Aspectos diferentes a los observados hasta aquí no sufrieron cambios, por tanto puede concluirse que en los tres casos estudiados la conducta cualitativa de los campos de temperatura es similar. Se presentan las Figuras 3.50-3.61 que muestran los campos de velocidad y temperatura a algunos tiempos, para los gradientes de temperatura antes descritos.

Como ya se mencionó en el análisis del caso $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$, los campos de concentración no sufren cambios significativos, al menos hasta el tiempo que aquí interesa observar el fenómeno, el mismo comportamiento vuelve a presentarse en los dos casos adicionales estudiados. La formación de las celdas convectivas se presenta en las regiones de concentración constante sin encontrar cambios importantes en la composición del sistema. Al final de esta sección se muestran las diferencias máximas en la composición del sistema que resultan al comparar los casos DDTE y el caso DEQ, esto proporciona una idea mas clara de las magnitudes del cambio que aquí se menciona.

De los casos analizados hasta ahora resulta natural nacer una comparación del fenómeno isotérmico difusivo salino (DEQ), con los fenómenos doblemente difusivos sometidos a un calentamiento vertical a distintas temperaturas (DDTE). Aunque el primer caso es un modelo unidimensional, la comparación es válida puesto que el gradiente de concentración para los dos casos es vertical y para calentamientos con gradientes de temperatura pequeños la distribución salina es aproximadamente unidimensional. El objetivo de esta comparación es tener una idea de la velocidad de mezcla de dos medios de distinta concentración cuando son sometidos a efectos de convección natural. Esto está relacionado con la inestabilidad que presentan los estanques solares cuando sus paredes laterales son calentadas por la radiación solar recibida (Akbarzadeh [23]).

La Figura 3.62 muestra en su abscisa la altura del dominio que contiene a los fluidos que forman el gradiente salino, y en la ordenada la concentración (Kg/m^3). Las curvas muestran la concentración entre los casos DDTE y el caso DEQ. Como se esperaba, las diferencias máximas se obtienen para el gradiente de temperatura mayor $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, y los mínimos para el gradiente de temperatura menor $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$. A un gradiente de temperatura mayor

corresponde un número de Rayleigh mayor, por tanto para el caso $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ los efectos de flotación son mas importantes que los efectos viscosos y difusivos térmicos, por tal motivo, se espera que el movimiento del fluido sea mas apreciable y provoque mayor mezclado de las dos regiones de distinta concentración, variando mas significativamente la composición del sistema. Las diferencias máximas de concentración se encuentran alrededor de la interfase salina entre la altura de 4.0cm. y 6.0cm., siendo del 2.5% para $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$, 1.0% para $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ y 0.5% para $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$, hasta el tiempo final del análisis.

3.5 ANALISIS DE LA SOLUCION NUMERICA DEL FENOMENO DOBLEMENTE DIFUSIVO CON DISTRIBUCION INICIAL DE CONCENTRACION TIPO RAMPA.

El último caso que se analiza con geometría rectangular y paredes verticales paralelas es el de concentración inicial tipo rampa. Estrictamente hablando el sistema está constituido por una región inferior de 4.0cm. de altura a concentración 3.0% en peso (30.5 kg/m^3), en seguida una región intermedia de 2.0cm. de altura formada por un gradiente de concentración aproximadamente lineal generado por difusión, y por último una región superior formada por agua pura cuya altura es de 4.0cm. El dominio del sistema es igual al de los casos DDIE y DED, longitud $l=30.0\text{cm.}$ y altura $h=10.0\text{cm.}$, con número de Prandtl $Pr=6.0$ constante con respecto a la posición y al tiempo; los números de Rayleigh térmico y salino para la zona de gradiente lineal en base a la altura de la región correspondiente son $Rt=8.88E+05$ y $Rc=1.27E+07$ respectivamente, calculados para las propiedades físicas del agua, para un gradiente de temperatura $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ y un gradiente salino $\Delta \rho=30.6\text{kg/m}^3$. El sistema de ecuaciones y las condiciones a la frontera descritas en el capítulo 2 se resuelven para los mismos gradientes de temperatura que el caso DDTE.

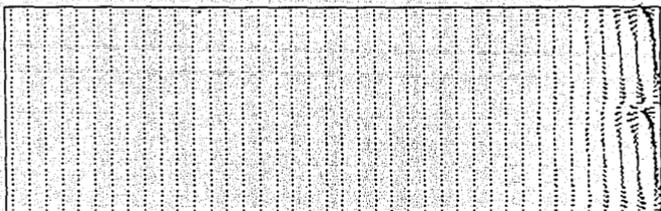
La importancia del estudio de este sistema se basa principalmente en la aplicación a los estanques solares, recordando lo descrito en el capítulo 1, estos sistemas están constituidos por tres regiones, una inferior convectiva con una concentración salina alta, una intermedia no convectiva que posee un gradiente salino lineal y una superior convectiva formada por agua pura. Aunque la altura de las regiones es distinta, en términos cualitativos la presentación es similar.

A continuación se describen y analizan los resultados obtenidos con la solución numérica en estado transitorio hasta un tiempo $t=100\text{s.}$, tiempo en el cual se observa la interacción del flujo con la pared vertical opuesta. La formación de una celda convectiva en cada región de composición constante (fluido homogéneo) se vuelve a presentar. En la región de gradiente se observa una zona de estancamiento donde las velocidades son casi cero, el espesor de esta zona a los 5s. (Figura 3.63) de iniciado el calentamiento es de 1.0cm. aproximadamente y va aumentando hasta llegar a 2.0cm. a un tiempo $t=100\text{s.}$ (Figura 3.67) conservando este espesor en el resto del tiempo de interés. Debido a que las regiones de composición constante poseen una altura menor respecto a los casos DDTE, las celdas convectivas se encuentran adelgazadas, sin embargo el avance de las celdas se muestra prácticamente igual, la celda inferior avanza mas rápido

que la celda superior, mientras que las isotermas presentan un comportamiento contrario, es decir, las isotermas de la celda superior poseen un avance mayor a las isotermas de la celda inferior. Respecto a esta observación, la explicación presentada en la sección 3.4 se aprecia con más claridad en este caso ya que los campos de temperatura muestran nítidamente un foco caliente en la región de estancamiento cerca de la pared caliente, donde se genera una región de alto gradiente térmico que disipa calor por conducción al flujo de regreso a la pared caliente de la celda superior, lo cual genera velocidades más pequeñas que reducen el avance de la celda pero que favorecen el avance de las isotermas debido al calentamiento adicional del fluido. Se presentan las Figuras 3.83-3.89 de los campos de velocidad, temperatura y concentración, donde puede observarse el comportamiento del fenómeno para este caso. La conducta cualitativa de los casos $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$ y $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ es análoga y no se discutirá en detalle, solo se mostrarán las Figuras 3.81-3.88 que indican diferencias cuantitativas de los campos de velocidad y temperatura propias de los distintos gradientes de temperatura estudiados.

FIGURAS 3.50-3.52. CAMPOS DE VELOCIDAD A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTE PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 2°C .

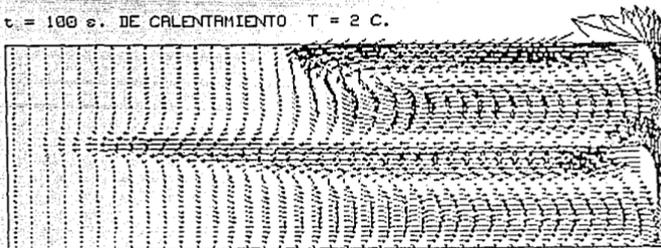
$t = 10 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 2 \text{ C.}$



→ : $1.0000\text{E}-03 \text{ m/s.}$



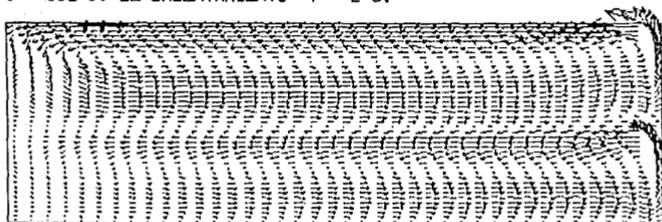
$t = 100 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 2 \text{ C.}$



→ : $1.0000\text{E}-03 \text{ m/s.}$



$t = 190 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 2 \text{ C.}$

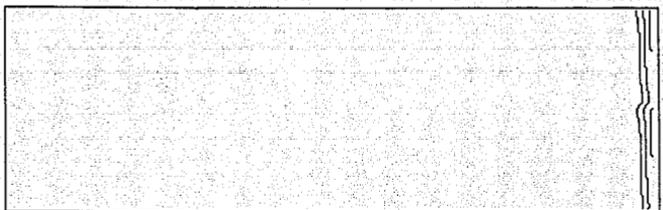


→ : $1.0000\text{E}-03 \text{ m/s.}$

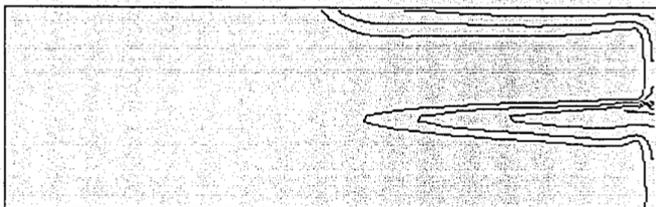


FIGURAS 3.53-3.55. CAMPOS DE TEMPERATURA A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTE PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 2°C .

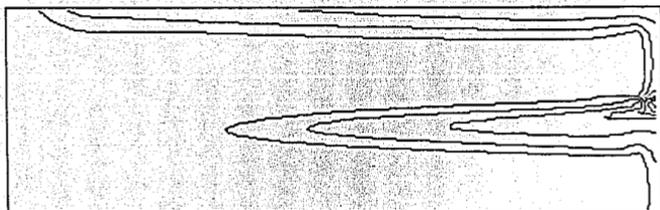
$t = 10 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 2 \text{ C.}$



$t = 100 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 2$

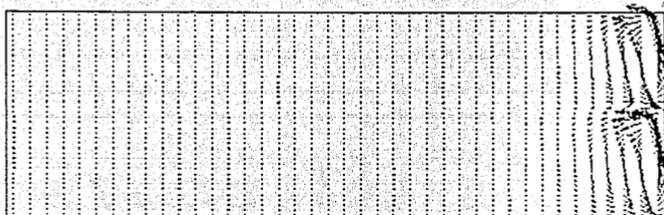


$t = 190 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 2 \text{ C.}$



FIGURAS 3.56-3.58. CAMPOS DE VELOCIDAD A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTE PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 10°C .

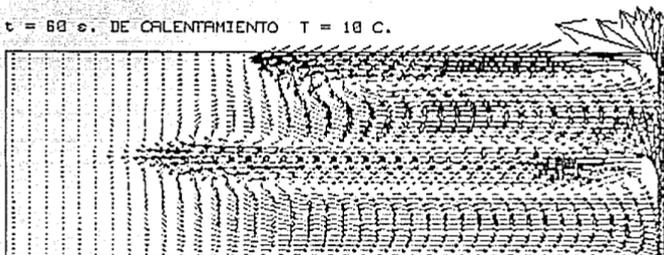
$t = 5 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 10 \text{ C.}$



→ : $1.0000\text{E}-03 \text{ m/s.}$



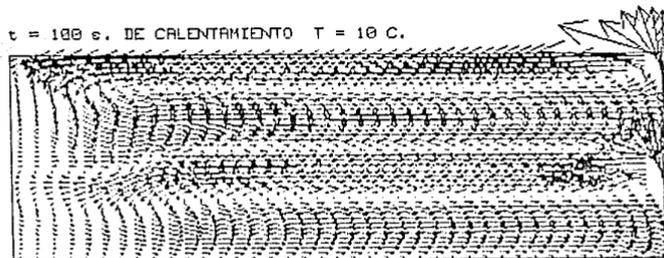
$t = 50 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 10 \text{ C.}$



→ : $1.0000\text{E}-03 \text{ m/s.}$



$t = 100 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 10 \text{ C.}$

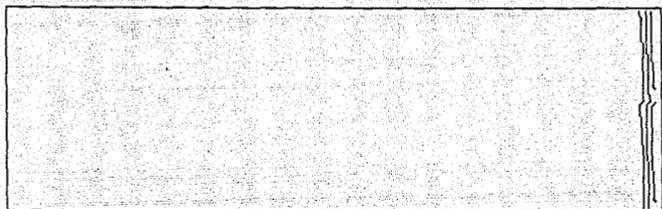


→ : $1.0000\text{E}-03 \text{ m/s.}$

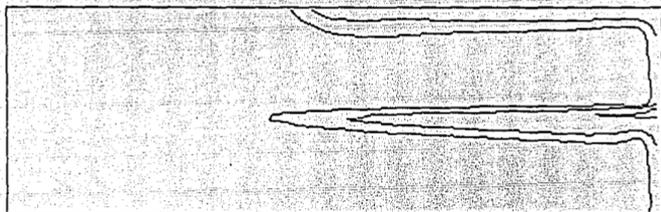


FIGURAS 3.59-3.61. CAMPOS DE TEMPERATURA A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTE PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 10°C .

$t = 5 \text{ s. DE ENFRIAMIENTO } T = 10 \text{ C.}$



$t = 50 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 10 \text{ C.}$



$t = 100 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 10 \text{ C.}$

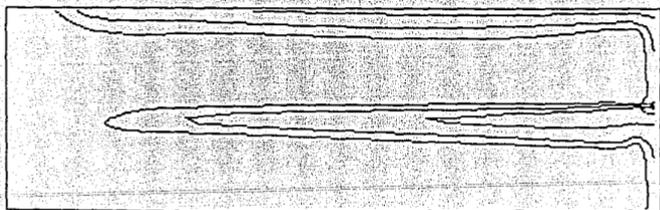
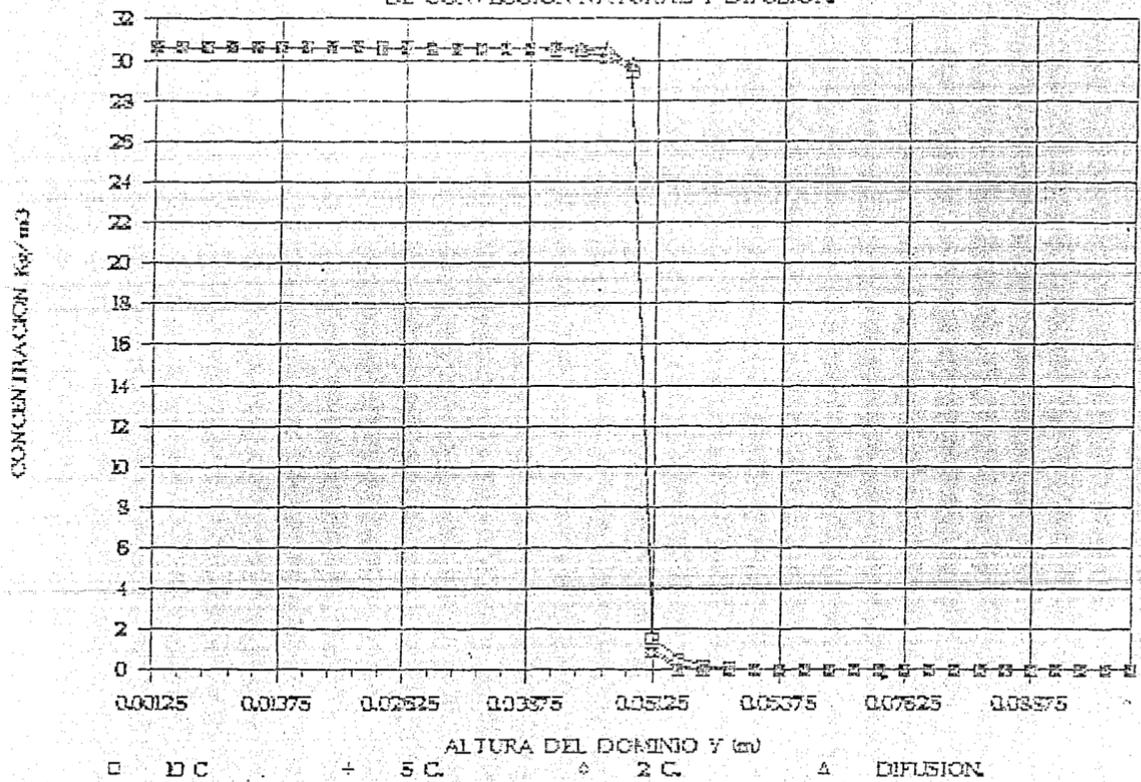
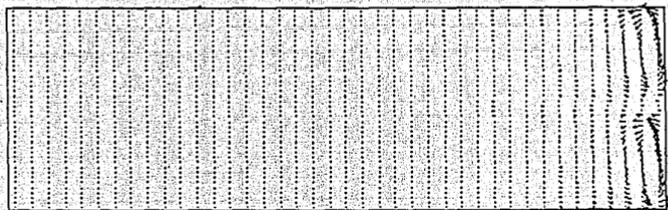


FIG. 3.62. COMPARACION DE CONCENTRACION
DE CONVECCION NATURAL Y DIFUSION



FIGURAS 3.63-3.65. CAMPOS DE VELOCIDAD A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTR PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 5°C .

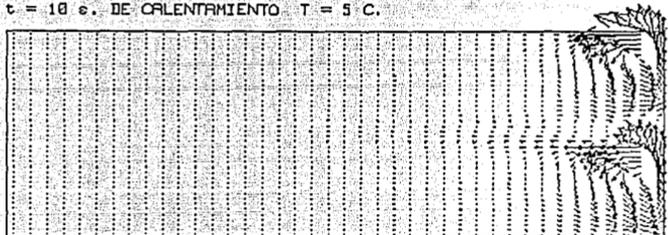
$t = 5 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$\rightarrow 1.0000E-03 \text{ m/s.}$



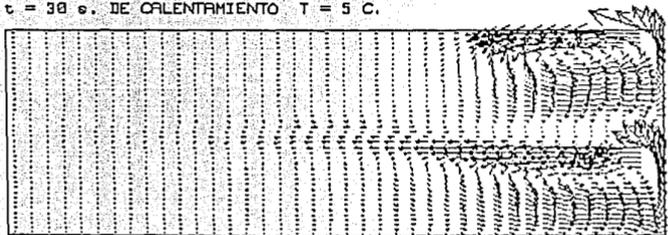
$t = 10 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$\rightarrow 1.0000E-03 \text{ m/s.}$



$t = 30 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

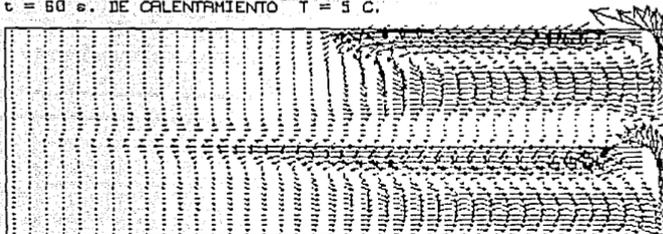


$\rightarrow 1.0000E-03 \text{ m/s.}$



FIGURAS 3.66-3.68. CAMPOS DE VELOCIDAD A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTR PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 5°C .

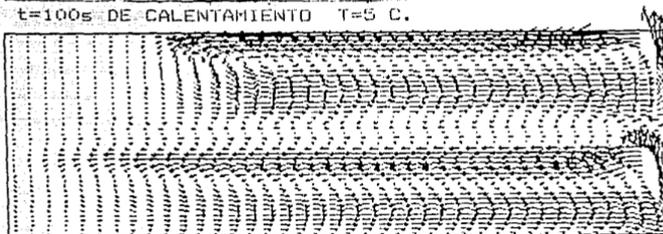
$t = 60 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



→ : $1.0000\text{E}-03 \text{ m/s.}$



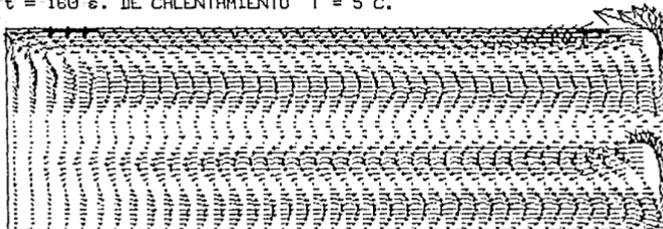
$t = 100 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



*t=100
DT=5*



$t = 160 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

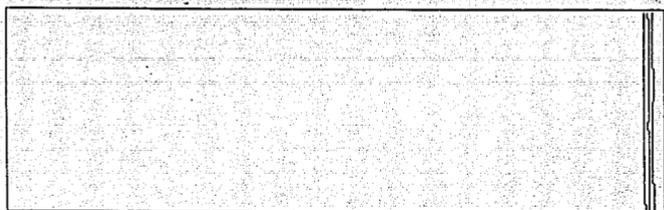


→ : $1.0000\text{E}-03 \text{ m/s.}$

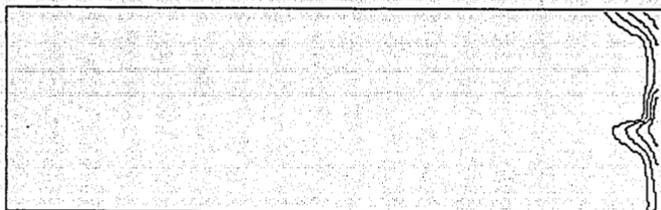


FIGURAS 3.69-3.71. CAMPOS DE TEMPERATURA A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTR PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 5°C .

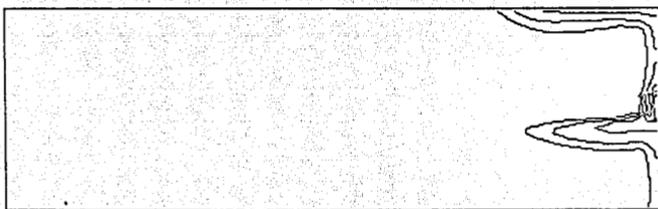
$t = 5 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$t = 10 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$t = 30 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

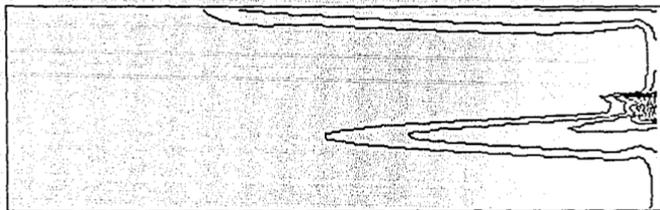


FIGURAS 3.72-3.74. CAMPOS DE TEMPERATURA A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTR PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 5°C .

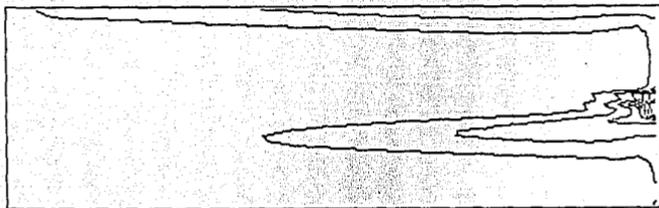
$t = 60 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$t = 100 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

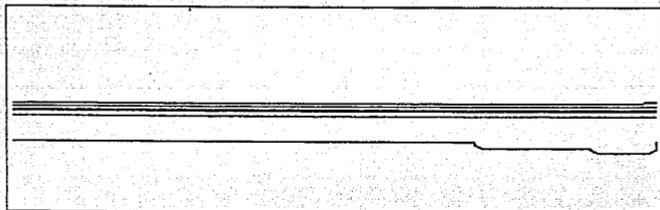


$t = 160 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

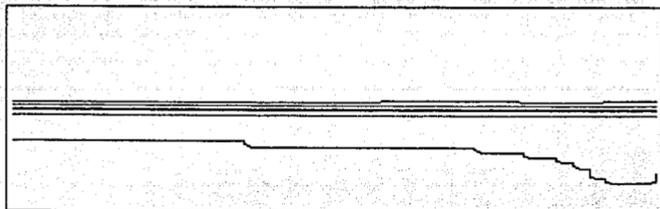


FIGURAS 3.75-3.77. CAMPOS DE CONCENTRACION A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTR PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 5°C .

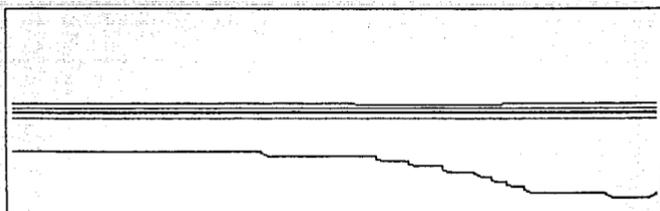
$t = 5 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$



$t = 18 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

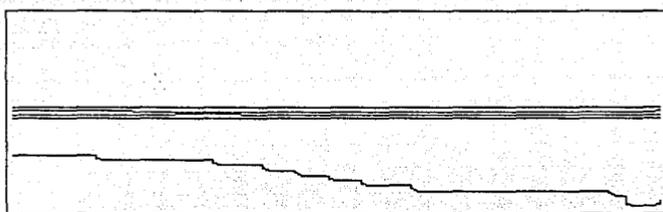


$t = 38 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 5 \text{ C.}$

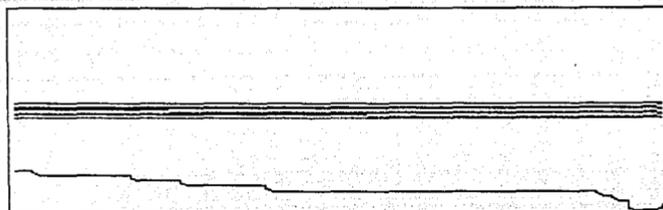


FIGURAS 3.78-3.80. CAMPOS DE CONCENTRACION A DISTINTOS TIEMPOS
PARA EL CASO DDTR PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 5°C.

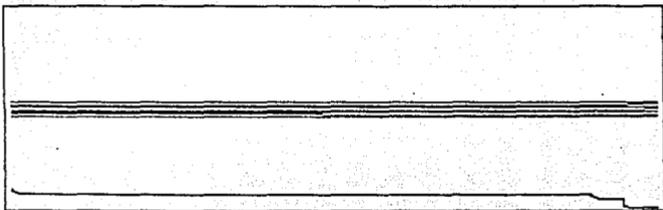
$t = 60$ s. DE CALENTAMIENTO $T = 5$ C.



$t = 100$ s. DE CALENTAMIENTO $T = 5$ C.

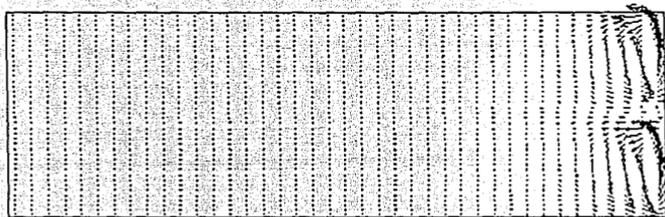


$t = 160$ s. DE CALENTAMIENTO $T = 5$ C.



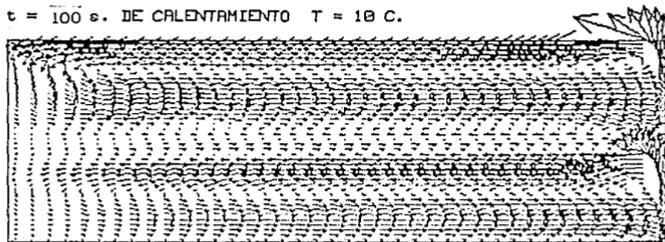
FIGURAS 3.81-3.82. CAMPOS DE VELOCIDAD A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTR PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 10°C .

$t = 5 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 10 \text{ C.}$



$\rightarrow : 1.0000\text{E}-03 \text{ m/s.}$

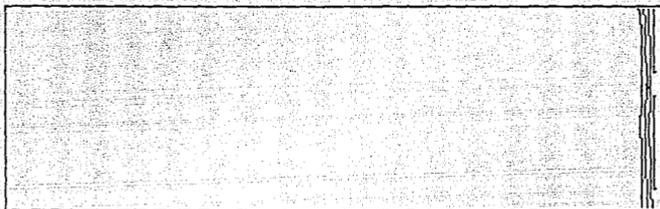
$t = 100 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 10 \text{ C.}$



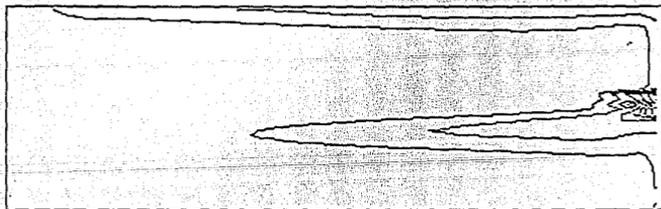
$\rightarrow : 1.0000\text{E}-03 \text{ m/s.}$

FIGURAS 3.83-3.84. CAMPOS DE TEMPERATURA A DISTINTOS TIEMPOS PARA
EL CASO DDTR PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 10°C .

$t = 5 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 10 \text{ C.}$

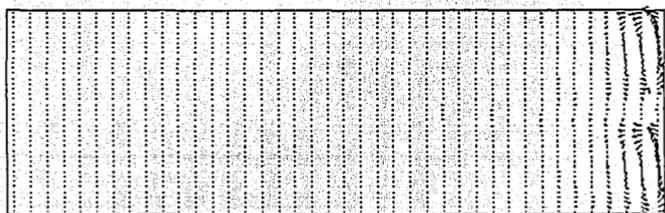


$t = 100 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 10 \text{ C.}$



FIGURAS 3.85-3.86. CAMPOS DE VELOCIDAD A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTR PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 2.0°C .

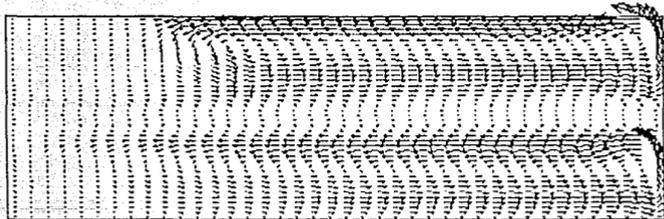
$t = 10 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 2 \text{ C.}$



→ : $1.0000\text{E}-03 \text{ m/s.}$



$t = 160 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 2 \text{ C.}$

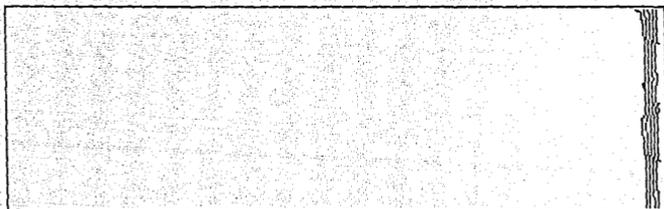


→ : $1.0000\text{E}-03 \text{ m/s.}$

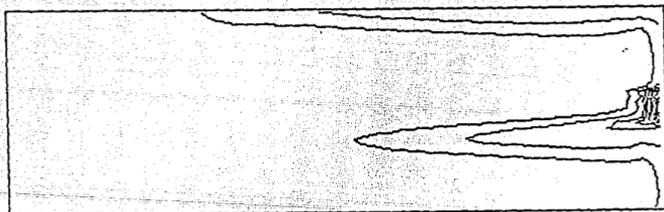


FIGURAS 3.87-3.88. CAMPOS DE TEMPERATURA A DISTINTOS TIEMPOS PARA EL CASO DDTR PARA UN GRADIENTE DE TEMPERATURA DE 2.0°C.

$t = 10 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 2 \text{ C.}$



$t = 160 \text{ s. DE CALENTAMIENTO } T = 2 \text{ C.}$



CAPÍTULO 4

EQUIPO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describe el equipo y metodología experimental que proporciona información cualitativa y cuantitativa del fenómeno estudiado en esta tesis. El objetivo del trabajo experimental es la obtención del patrón de flujos e información sobre los campos de velocidad, temperatura y concentración que se producen en la convección natural en un sistema doblemente difusivo.

4.1 EQUIPO EXPERIMENTAL

El fenómeno de convección natural se produce y se observa en el fluido contenido dentro de un recipiente cuando una de las paredes laterales se mantiene a una temperatura constante mayor a la temperatura del fluido de trabajo. Con este propósito se diseñó y construyó el dispositivo principal que se muestra en la Figura 4.1 y que está constituido por los siguientes sistemas:

- Tanque
- Intercambiador de calor.

Tanque

El aparato principal consiste de un tanque con una pared inclinada, y diseñado para facilitar el funcionamiento de la técnica de visualización, las dimensiones son 30.0cm. de longitud en el fondo y 38.6cm. en la superficie (eje x), 15.0cm. de profundidad (eje y), y 15.0cm. de ancho (eje z). Este tanque está construido de acrílico y vidrio cuyas conductividades térmicas son: $0.16W/m^{\circ}C$ y $0.52W/m^{\circ}C$ [31]. A continuación se describe cada parte que lo constituye y en la Figura 4.1 se presenta un diagrama esquemático donde han sido señaladas con una letra.

Base (a): Está hecha de acrílico, con dimensiones $15.0 \times 30.0 \times 2.0$ cm. de ancho, largo y espesor respectivamente. Posee 6 orificios de 1.0mm. espaciados a lo largo y sobre la mitad de su ancho. Estos orificios sirven para colocar termopares que tienen como objetivo proporcionar datos de temperatura del fluido en el fondo del tanque.

Pared lateral vertical (b): Está colocada frente a la pared inclinada, es de acrílico con dimensiones $15.0 \times 15.0 \times 1.5$ cm. de alto, ancho y espesor respectivamente. Esta pared posee tres termopares colocados a la mitad de su ancho y distribuidos sobre su altura con el fin de monitorear la temperatura del fluido a diferentes alturas.

Pared inclinada (c): La pared inclinada está hecha de vidrio con dimensiones $15.0 \times 17.3 \times 0.3$ cm. de ancho, alto y espesor respectivamente, y hace un ángulo de 30° respecto a la vertical. A través de esta pared es posible hacer observaciones del patrón de flujo. La pared inclinada también forma parte de un intercambiador de calor que el tanque tiene adicionado. Esto se diseñó con el propósito de mantener la temperatura de esta pared

constante.

Paredes laterales anterior y posterior (d, e): Son de vidrio y están colocadas perpendicularmente a la pared inclinada y a la pared lateral vertical, a través de ellas se hace la principal visualización del fluido. Sus dimensiones son 30.0cm. de longitud en el fondo y 38.6cm. de longitud en la superficie, formando así la inclinación requerida. La altura es de 15.0cm. y el espesor de 0.5cm.

Intercambiador de calor.

La pared inclinada de vidrio descrita anteriormente, es la superficie de intercambio del intercambiador de calor que se encuentra adicionado al tanque. El intercambiador de calor se encuentra señalado con la letra f en la figura 4.1. Una estructura de acrílico constituye los lados y la pared posterior de éste. El suministro y desalojo de agua caliente del intercambiador se hace a través de dos canales de acrílico que poseen orificios de 3.0mm. de diámetro y que se encuentran en la parte superior e inferior de la estructura; estos canales están provistos de una conexión de metal. A través del canal inferior el agua caliente entra al intercambiador y a través del canal superior el agua sale hacia el contenedor. A la entrada y a la salida del intercambiador de calor se encuentran colocados termopares que dan información sobre la temperatura del agua caliente.

Fluido de trabajo.

El fluido de trabajo consiste de dos mezclas salinas una al 3.0% en peso (30.6 Kg./m^3), y otra al 10% en peso (107.0 Kg./m^3), y de agua pura.

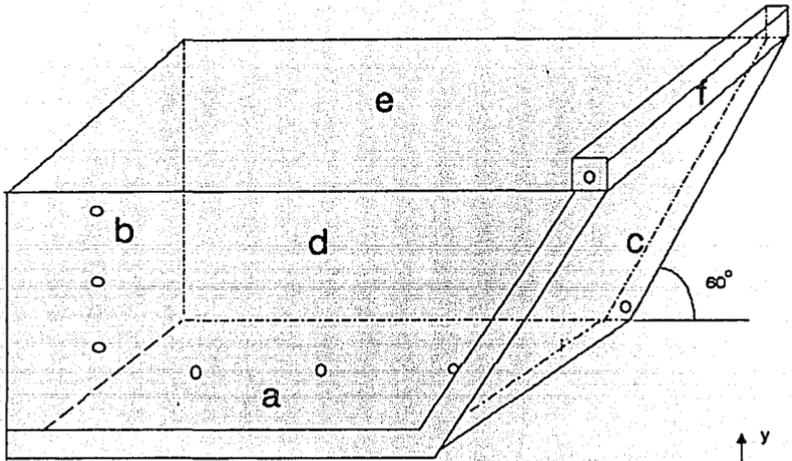
Sistemas Auxiliares.

Para la operación del experimento, el tanque requiere de algunos sistemas auxiliares, los cuales se presentan en la Figura 4.2 y se describen a continuación.

- Sistema de recirculación
- Sistema de visualización
- Sistemas de medición

Sistema de Recirculación.

El sistema de recirculación alimenta de agua caliente al intercambiador de calor. Está formado por un contenedor de agua, una bomba centrífuga, una resistencia eléctrica y una red de tuberías. El ciclo sigue la siguiente trayectoria: el agua de calentamiento circula mediante la bomba centrífuga del contenedor al canal inferior del intercambiador, pasa por el intercambiador y llega al canal superior para desembocar a una manguera que comunica con el contenedor para completar el ciclo. A continuación se hace una descripción de los dispositivos que constituyen este sistema.



- a BASE
- b PARED LATERAL VERTICAL
- c PARED INCLINADA
- d PARED LATERAL ANTERIOR
- e PARED LATERAL POSTERIOR
- f INTERCAMBIADOR DE CALOR

FIGURA 4.1. DISPOSITIVO PRINCIPAL
(TANQUE E INTERCAMBIADOR DE CALOR)

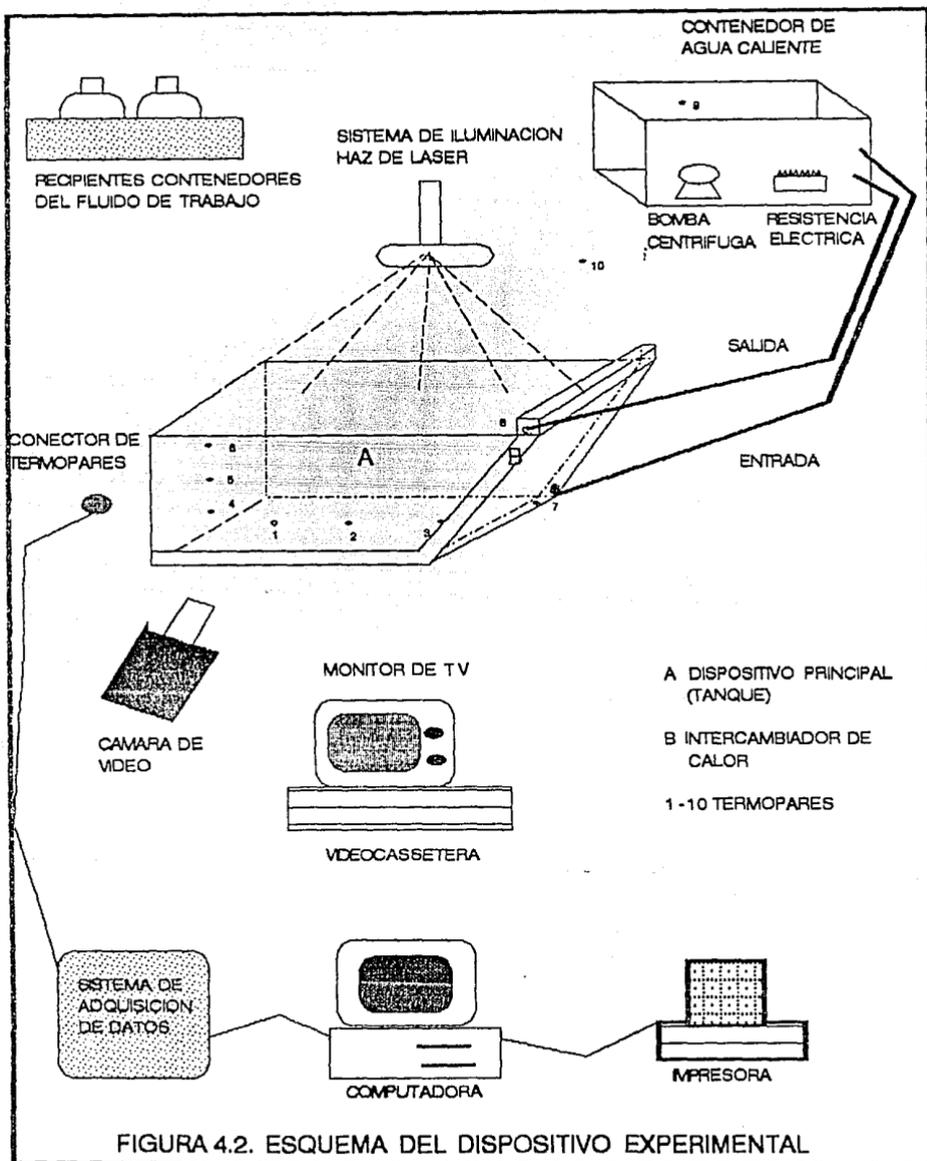


FIGURA 4.2. ESQUEMA DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

a) Contenedor de agua caliente: Cubo rectangular de poliuretano con capacidad de 0.028m^3 , provisto de tapa de igual material. Su utilidad es contener el agua caliente de recirculación conservando el calor y amortiguando las variaciones de temperatura del sistema. Posee un termopar que indica la temperatura del agua caliente.

b) Bomba Centrífuga: Su objetivo es proporcionar la potencia necesaria para llevar el agua caliente de recirculación del contenedor al intercambiador de calor y de vuelta al contenedor. Está provista de una válvula que permite regular el flujo en un intervalo de $0.0-3.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

c) Resistencia Eléctrica: Proporciona el calor necesario para mantener el agua de recirculación a temperatura constante. Esta resistencia está conectada a un variac de tal modo que se puede ajustar el paso de corriente y por tanto la temperatura deseada alcanzando como máximo 50.0°C por arriba de la temperatura ambiente.

Sistema de Visualización:

Este sistema está constituido por una fuente de luz laser He-Ne, potencia nominal de 10.0mW y una longitud de onda $\lambda=0.6328\mu\text{m}$, un espejo plano reflector y dos lentes cilíndricas. Adicionalmente, una cámara de televisión (IKEGAMI mod. ITC46, 512 líneas, 33 cuadros por segundo y una distancia focal entre 12mm . y 75mm .), una grabadora de video, un monitor de televisión, y una cámara fotográfica marca canon, reflex de 35.0mm . modelo AE-1 y distancia focal 50mm . Mediante este equipo se obtienen las imágenes del patrón de flujos al filmar y fotografiar los movimientos que se presentan en el tanque durante el experimento. Para la iluminación del tanque, el haz de luz proveniente del laser se refracta para formar un plano de luz bidimensional, utilizando un juego de lentes cilíndricas que generan un plano de luz de aproximadamente 2.0mm . de espesor. Este plano se dirige al tanque desde la parte superior perpendicularmente a la superficie. La cámara de televisión se coloca de tal modo que la filmación se hace a través de una de las paredes laterales de vidrio cerca de la pared inclinada.

Sistemas de Medición:

a) Termopares: Los termopares son de cobre-constantan con diámetros de 0.127mm ., con un tiempo de respuesta de $0.1^\circ\text{C}/\text{s}$, y se monitorean por medio de un sistema de adquisición de datos. Todos los termopares utilizados poseen características similares a las mencionadas anteriormente.

b) Sistema de adquisición de datos: Este sistema es utilizado para obtener datos de temperatura a través de los termopares. El sistema de adquisición tiene un multímetro HP-3421-A acoplado a una computadora HP9133-216 con una frecuencia de medición máxima de 3.0s^{-1} por canal, y tiene implementado un programa diseñado para registrar la información.

c) Refractómetro: (KOMAX, tipo Abbe, mod. 105). Utilizado para

medir el índice de refracción del fluido de trabajo. Mediante estos datos es posible obtener el campo de concentración salina a distintos tiempos, tomando muestras.

d) Balanza Analítica: Utilizada para hacer las pesadas requeridas de la sal común que se necesita para preparar el fluido de trabajo.

El tanque se llenó con un fluido para formar un gradiente salino constituido por una mezcla de cloruro de sodio NaCl (sal común) al 3.0% o al 10.0% en peso (concentración másica de 30.6gr. de soluto/0.001m³ de mezcla o 107.0gr. de soluto/0.001m³ de mezcla respectivamente) y agua pura. Las propiedades físicas de los fluidos de trabajo se muestran en la Tabla 4.1.

AGUA PURA:			
PROPIEDAD	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Temperatura de Referencia	(T ₀)	25.0	[°C]
Densidad	(ρ)	977.0	[kg/m ³]
Viscosidad Cinemática	(ν)	8.80E-07	[m ² /s]
Capacidad Calorífica	(C _p)	4.18E+03	[Ws/kg°C]
Conductividad Térmica	(k)	0.606	[W/m°C]
Coefficiente de Expansión Térmica	(β _T)	2.90E-04	[1/°C]
Coefficiente de Salinidad	(β _c)	6.78E-04	[m ³ /kg]
Difusividad Térmica	(α)	1.46E-07	[m ² /s]
Difusividad salina	(D)	1.59E-09	[m ² /s]
Número de Prandtl	(Pr)	6.0	
MEZCLA SALINA DE CLORURO DE SODIO (SAL COMÚN) AL 3.0% EN PESO:			
PROPIEDAD	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Temperatura de referencia	(T ₀)	25.0	[°C]
Densidad	(ρ)	1017.0	[kg/m ³]
Viscosidad Cinemática	(ν)	8.98E-07	[m ² /s]
Capacidad Calorífica	(C _p)	4.03E+03	[Ws/kg°C]
Conductividad Térmica	(k)	0.6	[W/m°C]
Coefficiente de Expansión Térmica	(β _T)	2.96E-04	[1/°C]
Coefficiente de Salinidad	(β _c)	6.66E-04	[m ³ /kg]
Difusividad Térmica	(α)	1.47E-07	[m ² /s]
Difusividad Salina	(D)	1.55E-09	[m ² /s]
Número de Prandtl	(Pr)	6.06	
MEZCLA SALINA DE CLORURO DE SODIO (SAL COMÚN) AL 10.0% EN PESO:			
PROPIEDAD	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Temperatura de referencia	(T ₀)	25.0	[°C]
Densidad	(ρ)	1068.0	[kg/m ³]
Viscosidad Cinemática	(ν)	9.90E-07	[m ² /s]
Capacidad Calorífica	(C _p)	3.73E+03	[Ws/kg°C]
Conductividad Térmica	(k)	0.595	[W/m°C]
Coefficiente de Expansión Térmica	(β _T)	3.20E-04	[1/°C]
Coefficiente de Salinidad	(β _c)	6.20E-04	[m ³ /kg]
Difusividad Térmica	(α)	1.49E-07	[m ² /s]
Difusividad Salina	(D)	1.51E-09	[m ² /s]
Número de Prandtl	(Pr)	6.6	

Tabla 4.1. Propiedades físicas y de transporte de los fluidos de trabajo [32].

4.2 METODO DE EXPERIMENTACION

Para la visualización de flujos se utilizan dos trazadores distintos. Uno de ellos es una tinta de permanganato de potasio, la cual posee un color violeta que permite seguir los frentes de los flujos. El otro es un trazador de estearato de aluminio $Al(C_{17}H_{35}O_2)_3$ en forma de partículas con diámetros que se encuentran en un rango de 0.3mm y 0.6mm., que se mezclan con el fluido de trabajo. Los trazadores y el fluido poseen prácticamente la misma densidad, y por lo tanto, su tiempo de sedimentación es del orden de días, proporcionando la posibilidad de observar los patrones de flujo. A continuación se describe el procedimiento general de experimentación y donde sea necesario se mencionan las diferencias que competen a un trazador en particular.

Se preparan 0.003 m^3 de mezcla salina al 3.0% o al 10.0% en peso, cantidad necesaria para obtener el nivel de fluido requerido en el tanque. La preparación de la mezcla se hace por litro, cuando se tiene lista la cantidad exacta de sal (pesada en la balanza analítica) se agrega a un matraz aforado, el cual contiene una cantidad de agua menor a un litro. El matraz se agita por unos minutos y posteriormente se llena con agua hasta la marca de un litro. Este fluido se vacía en recipientes de plástico y se toma de ahí para el llenado del tanque. En los experimentos donde se utilizan trazadores de estearato de aluminio, se agregan las partículas junto con los fluidos de trabajo a los recipientes de plástico. Los recipientes de plástico tienen una capacidad de 0.001 m^3 y están provistos de una manguera de 2.0mm. de diámetro y una válvula que permite regular el flujo en el intervalo de $0.0-2.0E-03 \text{ m}^3/\text{s}$.

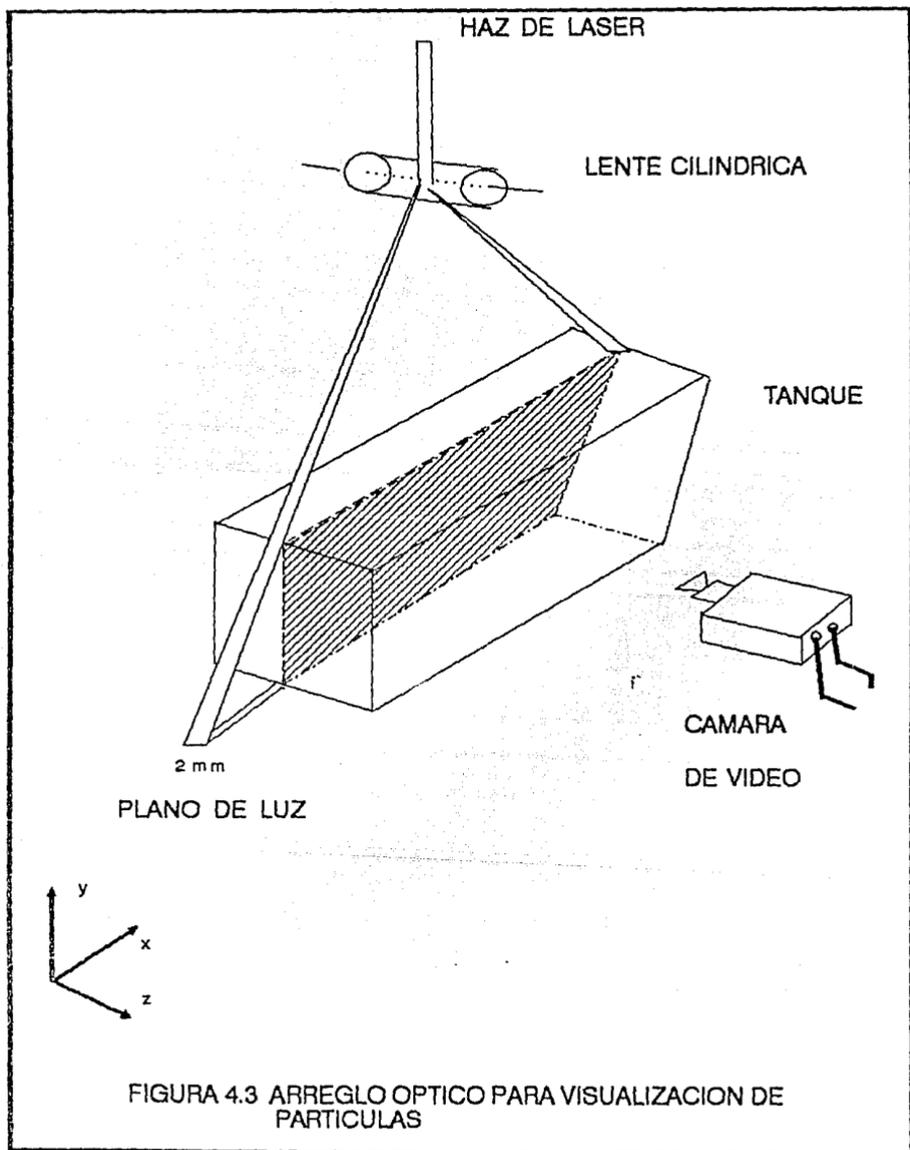
El tanque se llena con la mezcla salina hasta una altura de 5.0cm., a esta región se le denomina región inferior. Sobre la región inferior se forma una capa de agua pura de 5.0cm. de altura, a la cual se le llama región superior. Para evitar mezclados de los dos fluidos durante el procedimiento de llenado de la región superior, se coloca un plástico de polietileno de espesor aproximado a 0.5mm. sobre la superficie de la región inferior, de esta manera el agua que cae a un flujo de $1.5E-05 \text{ m}^3/\text{s}$, primero tiene contacto con el plástico y después con la mezcla salina, ya que el plástico permanece sobre la superficie del fluido durante el llenado de la región superior. El plástico se retira cuando ha terminado el vaciado del agua pura. El tiempo de llenado del tanque es de 30 minutos, y se mantiene en reposo otros 30 minutos para asegurar que las velocidades iniciales del sistema sean cero. El tiempo de contacto de las dos regiones antes de iniciar el calentamiento es de aproximadamente 45 minutos, en este tiempo el fenómeno de difusión salina está presente y por tanto el grosor de la interfase crece aproximadamente 2.0cm. Finalmente se tiene un sistema constituido por una región inferior de 4.0cm. a concentración constante de 3.0% o 10.0% en peso de mezcla salina, una región intermedia de 2.0cm. que posee un gradiente salino casi lineal y una región superior de 4.0cm. a concentración cero. Cabe mencionar que la tinta de permanganato de potasio se utilizó en los experimentos realizados con la mezcla al 10.0%, mientras que las partículas de estearato de aluminio en los

experimentos realizados con la mezcla al 3.0%, esto se debió principalmente a que las densidades de los trazadores fueron las adecuadas para cada mezcla.

Una vez que el tanque contiene el fluido de trabajo, se verifica la temperatura inicial del fluido, la temperatura del agua caliente de recirculación y la temperatura ambiente, éstas deben ser constantes y uniformes. Con el propósito de verificar el equilibrio térmico del sistema, se observan las temperaturas a través del sistema de adquisición de datos durante 30 minutos antes de iniciar el calentamiento. El sistema de adquisición de datos tiene la opción de presentar la información en forma gráfica. El sistema de visualización se encuentra preparado para hacer la filmación del experimento. Las imágenes formadas por los trazadores son registradas por la cámara de televisión colocada frente a la pared lateral de vidrio y almacenadas en un videocassette. La iluminación del sistema cuando se utiliza la tinta de permanganato de potasio se hace mediante un lámpara fluorescente de gas neón, que es dirigida diagonalmente hacia la pared lateral de vidrio. Cuando se usan trazadores de estearato de aluminio la iluminación, como se describió anteriormente, se logra al hacer pasar el haz de luz laser a través de una lente cilíndrica para formar un plano de luz. Con este sistema y los trazadores contenidos en el fluido de trabajo se puede determinar el campo de velocidades y el patrón de flujo. Es importante tener cuidado de que el rayo de luz incida siempre de manera perpendicular a la cara de la superficie libre del tanque. El arreglo óptico mediante la luz laser se muestra en la Figura 4.3 y en principio se podría utilizar para cuantificar la velocidad del flujo por medio de las partículas contenidas en el fluido. Se pretende que los trazadores tengan la misma velocidad del fluido y por consiguiente es deseable que los trazadores y el fluido posean la misma densidad.

El plano de luz tiene un ancho de aproximadamente 2.0mm, siendo este el 2.0% de la distancia total del tanque en la dirección z, se considera que este ancho es el adecuado para un flujo aproximadamente bidimensional. Si el movimiento desarrollado fuera tridimensional y el plano iluminado fuera muy ancho, se obtendrían trayectorias de las partículas en un pequeño volumen y lo observado a través de la cámara sería un punto iluminado por cierto tiempo o bien una fracción de trayectoria que no correspondería al plano perpendicular a la dirección de observación; por otra parte, si el plano iluminado fuera muy delgado se observaría una serie de destellos y sólo podría resolverse un movimiento estrictamente bidimensional. Por tanto debe existir un compromiso entre el ancho del plano iluminado, el tamaño de la partícula y la bidimensionalidad del fenómeno. Se considera que los parámetros usados son los óptimos.

Momentos antes de iniciar el calentamiento se ponen en marcha el sistema de adquisición de datos para monitorear y registrar las temperaturas y el sistema de visualización para empezar la filmación del experimento. Cuando los sistemas anteriores están en funcionamiento, se procede a recircular agua caliente por el intercambiador de calor para mantener la pared inclinada a



temperatura elevada. En este momento se opera la bomba centrífuga que se encuentra colocada en el contenedor de agua caliente y se regula su flujo de salida a $5.0E-05$ m³/s. Cuando se utiliza la tinta como trazador, momentos antes del calentamiento se agregan granos de polvo de permanganato de potasio a lo largo de la pared inclinada con el propósito de lograr un contraste con el fluido de trabajo y observar los primeros movimientos convectivos. Las actividades posteriores al calentamiento son muy sencillas y se listan a continuación. Aquéllas señaladas con un asterisco solo se aplican a los experimentos efectuados con tinta de permanganato de potasio.

*-Agregar tinta en distintas partes del dominio del tanque y a distintos tiempos según se estime necesario para una mejor visualización del flujo.

-Registrar datos de temperatura del tanque, del intercambiador de calor y del medio ambiente.

-Conservar el agua caliente de recirculación a temperatura constante.

-Obtener muestras de fluido a distintas alturas para su posterior medición del índice de refracción.

Los experimentos tienen una duración aproximada de dos horas a partir del inicio del llenado del tanque.

Debido a la relevancia de las partículas de estearato de aluminio en la visualización del flujo, es importante dedicar un pequeño párrafo a la descripción de este compuesto y a la preparación del mismo para convertirlo en un material adecuado como trazador de los fluidos que aquí se utilizan. El estearato de aluminio es un compuesto inorgánico insoluble en agua con densidad 1.010 kg/m³, y temperatura de fusión de 103.0°C . La presentación comercial de este compuesto es en forma de partículas similares a las de un talco con diámetro aproximado a $40.0\mu\text{m}$. Este tamaño resulta demasiado pequeño para la observación adecuada del patrón de flujo. Para obtener un tamaño más grande de partículas es necesario someter al compuesto a un proceso de fusión. El estearato de aluminio fundido aparece en pedazos de cristales que se trituran y se hacen pasar por dos tipos de mallas para obtener un tamaño de partículas que se encuentra en un rango de 0.3mm a 0.6mm , como ya se mencionó anteriormente. Las partículas se agregan al agua y a la mezcla salina observando que la mayoría de ellas se mantiene en el cuerpo de los fluidos haciendo posible su detección a simple vista y con la cámara de video.

4.3 METODO DE ANALISIS (TECNICA FOTOGRAFICA)

A partir de la filmación de los experimentos es posible tomar una serie de fotografías que permiten observar con mayor claridad la trayectoria de las partículas y de la tinta en un determinado tiempo, y con ellas medir con cierta aproximación las magnitudes de las velocidades en distintas partes del tanque. Mediante esta técnica fotográfica se pueden obtener campos de velocidades y patrones de flujo, lo cual constituye uno de los objetivos del

estudio experimental. Existen varias razones por las que se toman las fotografías a partir de las imágenes filmadas y no directamente del experimento en marcha; permite seleccionar adecuadamente y con acierto las imágenes que describen más claramente los flujos desarrollados; evita errores de tiempo y posición; hace posible la observación del experimento en forma lenta, rápida, y normal permitiendo una mejor visualización del fenómeno estudiado; facilidad en el manejo y control de los experimentos, etc.

El análisis de la información obtenida a partir de la visualización de las trayectorias de partículas consiste de dos partes. En la primera se graba el experimento en tiempo real; esto permite almacenar en un videocassette toda la información. Una vez concluido el experimento, se reproduce la imagen del cassette y se toman fotografías fijas de la pantalla del monitor, dejando abierto el obturador de la cámara fotográfica durante un intervalo de tiempo determinado. Las fotografías que resultan de este proceso contienen segmentos de curvas que corresponden a la posición de las partículas a lo largo del tiempo que la película fotográfica permaneció expuesta. El método descrito permite obtener información sobre las características cualitativas del flujo, y en algunos casos medir la velocidad de los trazadores, y consiguientemente del fluido en diversas posiciones del dominio. Esto último se hace midiendo la longitud del segmento de una curva y dividiéndolo entre el tiempo de exposición (t_f). La validez de esta medición depende de dos condiciones: a) t_f debe ser suficientemente corto para que pueda considerarse que la partícula se mueve con velocidad constante y b) el movimiento de la partícula debe estar contenido en el plano iluminado. En caso de que el flujo no sea bidimensional y el movimiento tenga una componente en la dirección perpendicular al plano, el resultado subestimarà la velocidad real, pues la imagen muestra únicamente la componente del movimiento de la partícula sobre el plano de análisis durante el tiempo que ésta permanece iluminada. Para enfatizar la necesidad de hacer el análisis del experimento en dos partes, se debe recordar que el fenómeno bajo estudio es un flujo transitorio con escalas de tiempo diferentes en distintas partes del tanque. Es importante mencionar que las fotografías de los experimentos hechos con partículas se tomaron para tiempos de 15 segundos con el obturador abierto, mientras que las fotografías de los experimentos realizados con tinta fueron tomadas para tiempos de 1/250 segundos con el obturador abierto.

Se hicieron filmaciones en videocassette y fotografías fijas que permitieron tener confianza en que el fenómeno es aproximadamente bidimensional (al menos en la región central del tanque) y que 15.0s. es un tiempo que permite resolver el movimiento de la celda principal. Por otro lado, con las trayectorias obtenidas y con el auxilio de la filmación puede determinarse la dirección de las partículas y hacer un bosquejo del patrón de flujo. Es posible que mediante esta técnica se introduzcan deformaciones en los resultados debidas a las distancias focales de las lentes que se usan en la cámara de video, la cámara fotográfica y la cámara de impresión. En este trabajo no se hizo un estudio de tales deformaciones porque el objetivo principal es mostrar resultados mayormente cualitativos.

Para finalizar este capítulo, es pertinente mencionar que el fenómeno doblemente difusivo tratado teóricamente no corresponde con la geometría utilizada en el trabajo experimental, ya que el estudio teórico se llevó a cabo en un dominio que simula un tanque con paredes verticales, mientras que el estudio experimental se efectuó en un tanque con una de sus paredes laterales inclinada, sin embargo se espera un comportamiento cualitativamente similar entre las dos configuraciones, ya que el ángulo de la pared inclinada respecto a la vertical del dispositivo experimental es relativamente pequeño.

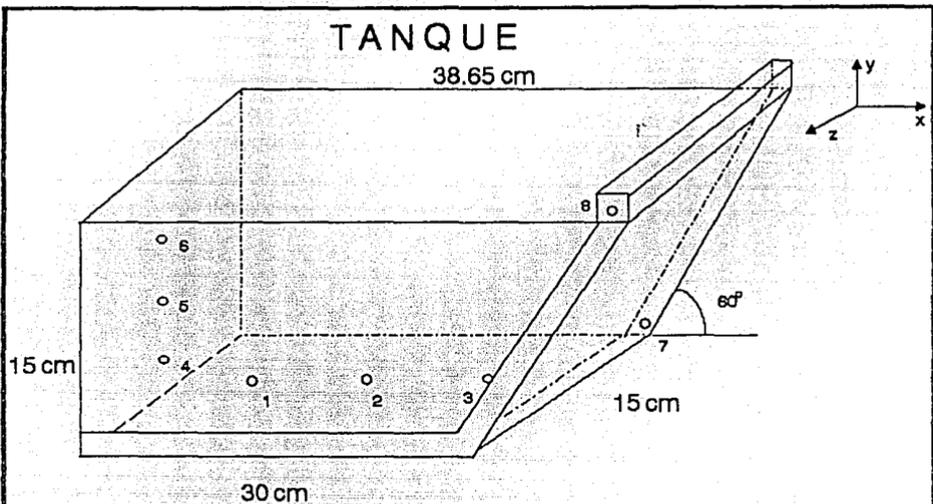
RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 INTRODUCCION

Este capítulo tiene por objetivo presentar la descripción y análisis de los resultados obtenidos experimentalmente. La descripción cualitativa y cuantitativa del patrón de flujo en estado transitorio constituye el resultado principal. El patrón de flujo se encuentra mediante la técnica de seguimiento de trazadores, los cuales son de dos tipos: partículas de estearato de aluminio y tinta de permanganato de potasio. Se hicieron experimentos por separado utilizando las partículas y la tinta, ambos resultados se complementaron y mediante su análisis fue posible encontrar el campo de velocidades en el dominio bidimensional. También se presentan gráficas de temperatura en función del tiempo y gráficas de concentración en función de la altura del tanque para algunos tiempos. En todos los experimentos se mantuvo constante la razón de aspecto $A=0.333$ en el fondo del tanque y $A=0.280$ en la superficie. Es importante recordar que no es posible definir una sola razón de aspecto, ya que el tanque posee una pared lateral inclinada. El fluido de trabajo como ya se mencionó en el capítulo anterior es agua pura y una mezcla salina en agua al 3.0% o al 10.0% en peso, por tanto los números de Prandtl son $Pr=6.0$ y $Pr=6.6$ respectivamente. Solo se estudió un número de Rayleigh térmico y un número de Rayleigh salino, siendo estos para la zona de gradiente salino lineal $Rt=8.86E+05$ y $Rc=1.27E+07$ para los experimentos realizados con la mezcla salina al 3.0% en peso, mientras que para los experimentos realizados con la mezcla salina al 10.0% en peso son $Rt=8.51E+05$ y $Rc=1.76E+08$. La temperatura de la pared lateral inclinada se mantuvo constante durante el experimento y se considera que se presenta instantáneamente, aunque esto no es estrictamente cierto, ya que el llenado del intercambiador de calor dura entre dos y tres segundos.

5.2 ANALISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 5.1 se presenta una lista parcial de los experimentos efectuados en este estudio. Se muestran las condiciones iniciales de dos grupos de experimentos, los realizados con permanganato de potasio y los que se hicieron con partículas de estearato de aluminio. Se hará primero la descripción de los resultados de un experimento realizado con permanganato de potasio (experimento 1 de la Tabla 5.1), y posteriormente se analizarán los resultados de un experimento realizado con partículas de estearato de aluminio (experimento 7 de la Tabla 5.1). Esto es debido a que se encontró un comportamiento cualitativo similar en cada grupo de experimentos. Para una mejor descripción del fenómeno en la Figura 5.1 aparece un esquema del tanque que indica los ejes coordenados y la denominación de algunos puntos que se utilizan en la descripción de las observaciones.



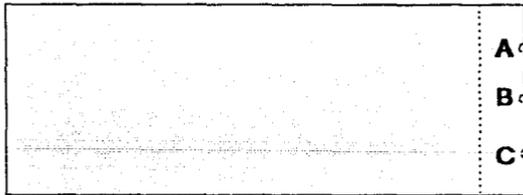
○ TERMOPARES

VISTA SUPERIOR DEL TANQUE

PARED LATERAL DERECHA



PARED
VERTICAL



A ○ PARED
B ○ INCLINADA
C ○

PARED LATERAL IZQUIERDA

A = 8.25 cm
B = 7.50 cm
C = 3.75 cm

FIGURA 5.1. ESQUEMA DEL DISPOSITIVO PRINCIPAL DE EXPERIMENTACION Y SUS EJES COORDENADOS.

TRAZADOR: TINTA DE PERMANGANATO DE POTASIO.					
NUM. EXP.	TEMP. PARED INCLINADA.	TEMP. DEL FLUIDO. °C	GRAD. DE TEMP. °C	TEMP. AMB. °C	DURACION EXP. MIN
1	28.5	24.0	4.5	24.0	60
2	28.0	23.5	4.5	24.5	50
3	28.5	24.0	4.5	25.0	60
4	28.0	24.0	4.0	24.0	30
5	28.0	24.0	4.0	24.0	55
TRAZADOR: PARTICULAS DE ESTEARATO DE ALUMNIO.					
6	29.2	23.0	6.2	23.5	40
7	27.8	21.8	6.0	22.0	40
8	28.7	23.7	5.0	24.0	50
9	28.3	23.0	5.0	23.0	60

TABLA 5.1. LISTA PARCIAL DE EXPERIMENTOS Y CONDICIONES DE TRABAJO.

5.2.1) Resultados de experimentos realizados con tinta de permanganato de potasio.

Como se mencionó anteriormente, se ha elegido el experimento número 1 de la Tabla 5.1 para presentar las características globales del flujo. Antes de iniciar la descripción de las observaciones, es importante mencionar que la serie de experimentos efectuados con tinta de permanganato de potasio fué un estudio preliminar con el propósito de encontrar la técnica más adecuada de visualización. La composición inicial obtenida experimentalmente se muestra en la Figura 5.2, observando que el gradiente de concentración utilizado fué del 10.0% en peso (107.0 Kg/m³). Momentos antes de iniciar el calentamiento se agregan pequeños granos de permanganato de potasio (material de color violeta) sobre la pared inclinada, observando que éstos se sedimentan rápidamente en el fondo del tanque formando líneas de fluido coloreado que permiten observar el movimiento del fluido. Instantes después del inicio del calentamiento se observan movimientos ascendentes cerca de la pared caliente. Las observaciones importantes son al inicio del calentamiento, sin embargo se hace una descripción del comportamiento del fluido hasta notar los efectos de la pared opuesta a la pared inclinada. En términos generales se observan dos celdas convectivas, a las que se les denomina inferior y superior, y una zona de estancamiento en medio de las dos celdas.

En la región inferior el movimiento ascendente cambia de inclinado a horizontal (dirección x-) a una altura aproximada de 4.0cm. desde el fondo del tanque. Parte de este fluido continúa su camino horizontalmente, mientras que la otra parte desciende hasta llegar al fondo donde es llevada por fuerzas de arrastre hacia la capa límite presente cerca de la pared caliente, completando un movimiento circular que abarca toda la región inferior. La longitud de esta celda sobre el eje x a 15 segundos de calentamiento es de 4.5cm. aproximadamente y va creciendo conforme transcurre el tiempo. La celda inferior recorre una distancia de

CONCENTRACION VS. POSICION OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE.

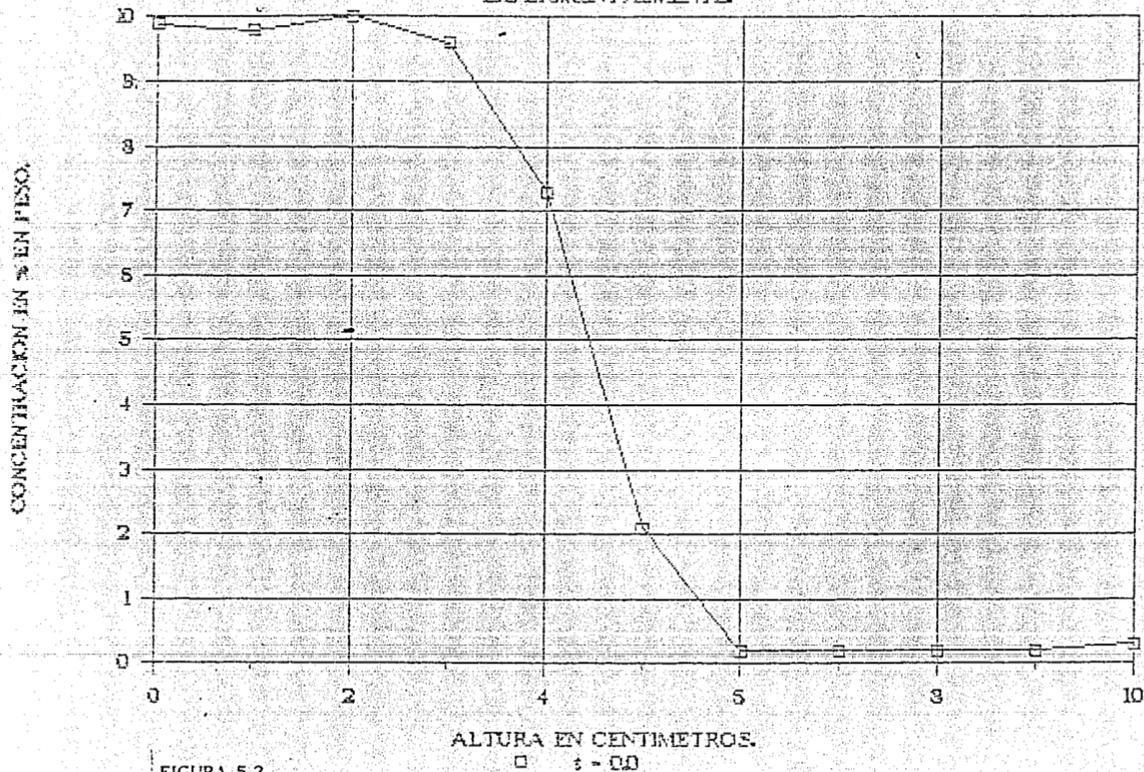
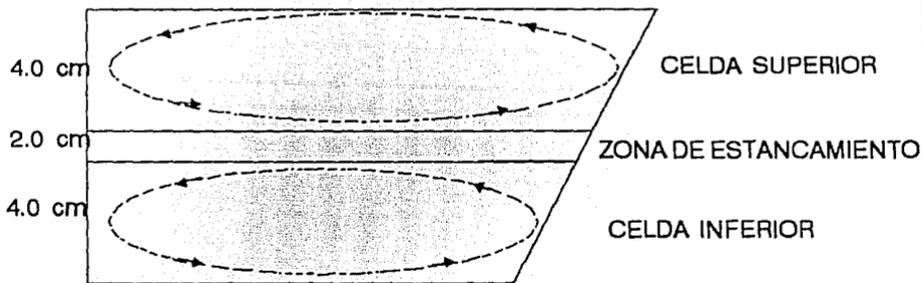


FIGURA 5.2.

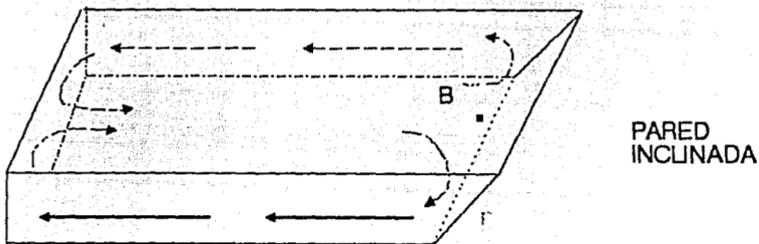
32.7cm. en un tiempo de 8 minutos, es decir con una velocidad promedio de 0.7mm/s., y es entonces cuando empieza a sentir los efectos de la pared vertical opuesta. Debido a la presencia de esta frontera, el fluido desciende y continúa su trayectoria muy cerca del fondo del tanque hacia la pared caliente. Al agregar una línea vertical de tinta en cualquier punto del eje z , se observa la tendencia general del movimiento del fluido. En la región donde se localiza la celda inferior se observa una distorsión de la tinta, moviéndose hacia la pared vertical cerca de la parte superior y hacia la pared inclinada cerca de la parte inferior. Esta tendencia indica los movimientos hacia x^- en la parte superior de la celda y los movimientos hacia x^+ en la parte inferior, poniendo en evidencia un movimiento en forma de celda. Desde la parte superior de la celda sobre el eje z , se observa claramente la formación de una sabana de tinta, lo cual proporciona una idea de un comportamiento bidimensional. El punto de colocación de la tinta sobre la pared inclinada (eje z) es independiente de la conducta presentada por esta celda.

Por encima de la celda inferior se nota una zona de muy poca actividad (zona de estancamiento), con un espesor de 2.0cm. Unas gotas de tinta con similar densidad a la de esta región se colocan en toda la longitud observando que durante 15 minutos permanecen sin movimiento. Posteriormente la tinta se difunde a velocidades apenas perceptibles. Es difícil observar claramente el movimiento interno de esta zona ya que su conducta es distinta a la de las celdas inferior y superior en cuanto a su anchura, forma y velocidad de avance. La zona de gradiente o región intermedia se semeja a un delgado chorro (jet) de fluido moviéndose lentamente con un frente que presenta una velocidad promedio del orden de 0.05mm/s. Un fenómeno interesante observado en esta zona es la dependencia del comportamiento del fluido con el punto de colocación de la tinta sobre la pared inclinada. Si la tinta se coloca entre los puntos A y B (ver Figura 5.1), entonces se observa un movimiento del fluido hacia la pared lateral derecha sobre el eje z^- , recorriendo una distancia de 7.5cm. en 30 minutos con una velocidad promedio de 0.04mm/s. Al llegar a la pared lateral se mantiene cercana a ésta y su trayectoria ahora en dirección x^- le permite llegar a la pared vertical, en este momento ha recorrido una distancia de 32.5cm. en un tiempo de 1 hora 45 minutos, es decir, posee una velocidad promedio de 0.05mm/s. Posteriormente el fluido avanza en dirección z^+ hasta la mitad de la anchura de la pared vertical para luego introducirse al cuerpo del fluido en dirección x^+ . Por otro lado si la tinta se coloca en medio de los puntos B y C, el fluido avanza hacia el punto C, llega a la pared lateral izquierda y avanza paralelo a ésta en dirección x^- hasta alcanzar la pared vertical opuesta a la inclinada donde cambia su dirección hacia z^- hasta llegar aproximadamente a la mitad de la anchura de la pared vertical para dar vuelta en dirección x^+ e introducirse al cuerpo del fluido. Si la tinta se coloca exactamente en el punto B, el fluido sigue cualquiera de las dos direcciones posibles sobre la pared caliente, hacia el punto A o bien hacia el punto C. Describiendo este fenómeno en términos de la teoría de sistemas dinámicos, se concluye que el punto B tiene características de un punto de bifurcación. En las Figuras 5.3 y 5.4 se muestran algunos bosquejos y fotografías de las observaciones descritas



ZONA DE ESTANCAMIENTO

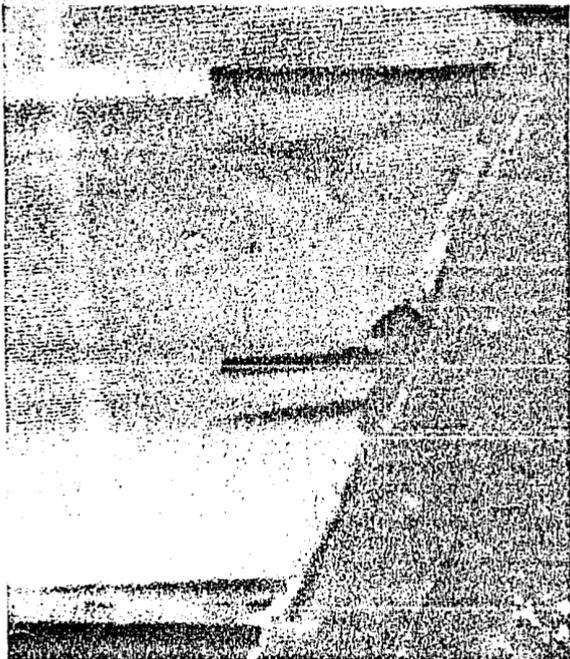
VISTA SUPERIOR



VISTA LATERAL



FIGURA 5.3. VISTA LATERAL DEL SISTEMA QUE MUESTRA LA FORMACION DE LAS CELDAS INFERIOR Y SUPERIOR Y ZONA DE ESTANCAMIENTO



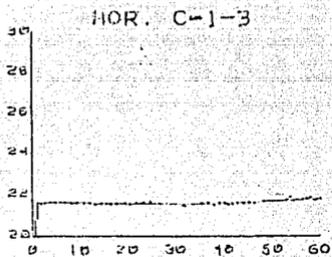
anteriormente. El número de Rayleigh térmico modificado calculado de acuerdo a la definición de Chen y Sköck [18] para esta región es $R_{tm}=12.0$, este valor se encuentra dentro del régimen subcrítico, lo cual corresponde con los resultados obtenidos, observando que el análisis de estos autores tiene buena aproximación respecto al inicio de movimientos convectivos.

La celda superior tiene el mismo comportamiento cualitativo que la celda inferior. Recorre una distancia de 35.5cm. en un tiempo de 7 minutos con una velocidad promedio de 0.8mm/s. Esta celda recorre una distancia mayor respecto a la recorrida por las anteriores, esto es debido a la geometría del tanque.

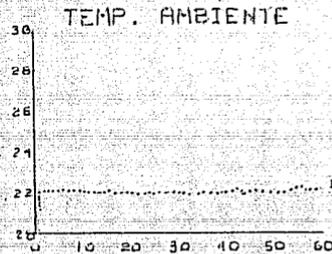
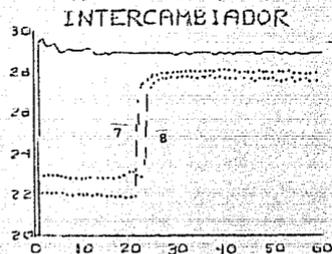
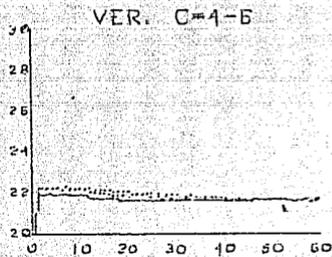
5.2.2) Resultados de experimentos realizados con partículas de estearato de aluminio.

El experimento que se eligió para su descripción fué el número 7 de la Tabla 5.1. La diferencia de temperatura entre la pared caliente y el fluido es de 6.0°C . La Figura 5.3 presenta cuatro gráficas que se obtuvieron con el sistema de adquisición de datos. Estas gráficas muestran las lecturas de las temperaturas porporcionadas por los termopares durante el tiempo total del experimento (la distribución de los termopares en el tanque aparece en la Figura 5.1). Las dos primeras gráficas muestran las temperaturas de los termopares colocados en el interior del tanque, (fondo y pared vertical respectivamente), la tercera presenta la temperatura a la entrada y salida del intercambiador y la temperatura del agua caliente en el contenedor. Por último, la cuarta gráfica muestra la temperatura ambiente. Para la descripción de la Figura 5.4 cada una de las curvas se divide en dos etapas: la primera abarca los veinte primeros minutos, tiempo en el que el sistema permanece en reposo y aún no se inicia el calentamiento. La temperatura del fluido al inicio del experimento es de $21.8.0^{\circ}\text{C}$, al igual que la temperatura ambiente. El agua caliente en el contenedor presenta una temperatura constante de 29.0°C . La segunda etapa tiene una duración de 40 minutos y corresponde al tiempo en que la pared inclinada se encuentra a 27.8°C . En este punto es conveniente recordar que la pared inclinada del tanque también es parte del intercambiador de calor. El tiempo de llenado del intercambiador de calor puede determinarse mediante la gráfica 3, ya que el termopar 7 sensa la temperatura del agua caliente a la entrada del intercambiador y el termopar 8 la temperatura de salida del mismo, por tanto, la diferencia en el tiempo de respuesta entre los termopares corresponde al lapso de llenado del intercambiador, que en este caso fué de 3 segundos. Como puede observarse la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del intercambiador de calor es de aproximadamente 0.8°C , así, es posible considerar constante la temperatura de la pared inclinada asignándole una temperatura promedio entre las temperaturas de entrada y salida del intercambiador de calor. La duración del calentamiento es de 40 minutos, y a este tiempo puede observarse que la temperatura del sistema permanece invariable (gráficas 1 y 2).

GRAFICA 1



GRAFICA 2



GRAFICA 3

GRAFICA 4

La Figura 5.6 muestra la concentración del sistema en función de la altura del tanque obtenida experimentalmente momentos antes de iniciado el calentamiento y al tiempo $t=40\text{min.}$ después del calentamiento.

El plano de luz se colocó a la mitad de la anchura de la pared inclinada y no fue necesario analizar otros planos, ya que experimentos hechos con tinta de permanganato de potasio mostraron una conducta aproximadamente bidimensional del fenómeno. La filmación del experimento comienza minutos antes de iniciar el calentamiento y con la imagen obtenida es posible tomar la serie de fotografías que muestran las trayectorias recorridas por las partículas, y con ello la determinación del patrón de flujo y el campo de velocidades.

A continuación se muestra la Tabla 5.2 que describe la secuencia de la toma de fotografías, considerando como tiempo inicial $t=0.0$ el momento en que se efectúa el calentamiento de la pared inclinada.

EXPERIMENTO CON PARTICULAS.	NUMERO DE FIGURA.	TIEMPO DE TOMA DE FOTOGRAFIA (S) \pm 2 S.
7	5.8a	0
	5.9a	30
	5.10a	60
	5.11a	90
	5.12a	120
	5.13a	150
	5.14a	180
	5.15a	210
	5.16a	240
	7	5.17a
5.18a		170
5.19a		290
5.20a		840
5.21a		1800

TABLA 5.2. PRESENTACIÓN DE LOS TIEMPOS EN LOS CUALES FUERON TOMADAS LAS FOTOGRAFÍAS.

Es importante mencionar que las partículas de estearato de aluminio tienen una densidad similar a la densidad de la solución salina y por tanto una densidad ligeramente mayor a la del agua pura. Debido a esta propiedad algunas de las partículas inicialmente colocadas en el agua descendieron para situarse en la región de gradiente o en la región de concentración constante 3.0% en peso. A pesar de esto, pudo observarse un conjunto de partículas en la región superior y obtener cierta información del comportamiento del flujo. En general, se observaron tres zonas, una zona inferior convectiva, una zona intermedia de estancamiento y una zona superior convectiva, lo cual coincide con lo observado en los experimentos hechos con tinta. La Figura 5.7 muestra un

CONCENTRACION VS. POSICION OBTENIDOS

EXPERIMENTALMENTE

CONCENTRACION EN % EN PESO

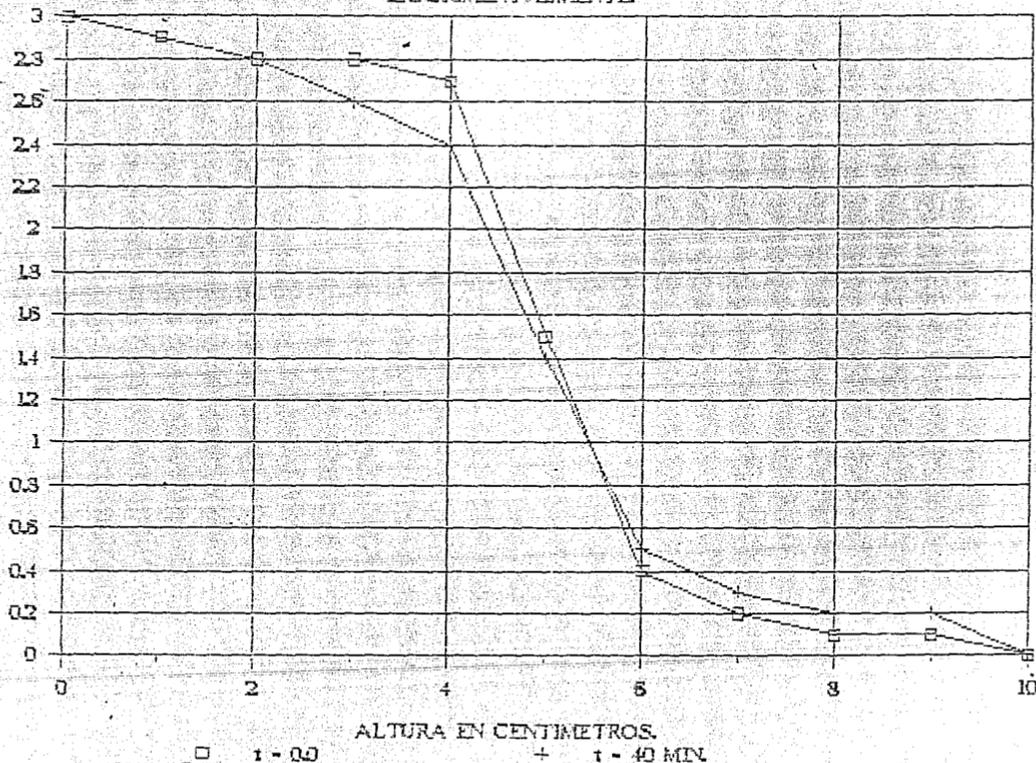


FIGURA 5.6

esquema de la ubicación de las zonas. Para la descripción de la zona inferior se utilizarán las fotografías designadas por las Figuras 5.8a-5.16a, mientras que para la descripción de la zona superior con las fotografías que se observan en las Figuras 5.17a-5.21a. Se analizará primero la zona inferior, a continuación la zona de estancamiento, y finalmente se describirá la zona superior.

a) Zona inferior convectiva. La visualización de esta zona fue óptima, ya que el número de partículas fue suficiente para observar el patrón de flujo en desarrollo y determinar el campo de velocidades. Las Figuras 5.8a-5.16a se auxilian de las Figuras 5.8b-5.16b para la descripción y análisis de esta parte del flujo. Las Figuras 5.8a-5.16a como se mencionó anteriormente, muestran las fotografías tomadas de los experimentos, mientras que las Figuras 5.8b-5.16b presentan un bosquejo de las trayectorias de partículas que fueron determinadas mediante las fotografías dibujando las líneas que representan las distancias que las partículas recorrieron, y con ayuda de las imágenes de video se obtuvieron sus direcciones (líneas continuas con flechas) y el recorrido completo de las mismas (líneas punteadas). Algunas de las trayectorias de las partículas han sido señaladas con una letra con el propósito de ubicarlas en alguna zona de interés como se verá más adelante. En términos generales todas las fotografías de manera completa o casi completa muestran la formación de una celda convectiva con velocidades ascendentes cerca de la pared caliente. El centro de la celda está en una posición cercana a la mitad de la altura de la región inferior, mientras que su posición en el eje horizontal varía conforme transcurre el tiempo. La distancia del centro de la celda a la pared caliente a diferentes tiempos se muestra en la Tabla 5.3.

TIEMPO (SEG)	DISTANCIA A LA PARED CALIENTE (CM.)	TIEMPO (SEG)	DISTANCIA A LA PARED CALIENTE (CM.)
0	1.2	150	2.0
30	1.6	180	2.0
60	1.6	210	2.0
90	1.6	240	2.4
120	2.0		

TABLA 5.3. POSICION DEL CENTRO DE LA CELDA INFERIOR CON RESPECTO AL EJE HORIZONTAL X A DIFERENTES TIEMPOS.

De acuerdo a las trayectorias de las partículas (Figuras 5.8b-5.16b), la estructura de la celda convectiva generada por el calentamiento lateral inclinado está formada por cuatro regiones: capa límite inclinada, capa de intrusión horizontal, flujo de regreso a la pared caliente, y flujo que se introduce al núcleo de la celda. Nótese que esta estructura coincide con la propuesta por Patterson e Imberger [7] para una celda convectiva en un fluido homogéneo con calentamiento vertical (ver capítulo 1 sección 2). Este resultado es esperado debido a que de acuerdo a la medición de la composición, la región inferior de la celda puede ser considerada como un sistema homogéneo durante todo el experimento.

A continuación se hace una descripción de cada una de las figuras que muestran las fotografías de las imágenes del flujo desarrollado en la celda inferior. La Figura 5.8a muestra una imagen de las partículas cuya trayectoria fué obtenida durante los primeros 15s. de iniciado el calentamiento. En la región adyacente a la pared inclinada se observa un movimiento ascendente de las partículas, este flujo representa la capa límite inclinada hidrodinámica, la cual posee una velocidad aproximada a 0.9mm/s. Respecto a la capa de intrusión, no hay aún evidencia de su formación, ya que no aparecen velocidades horizontales debidas a la descarga de la capa límite hidrodinámica, sin embargo se aprecian trayectorias de partículas en dirección al núcleo de la celda con una velocidad de 0.35mm/s. Estas partículas complementan el movimiento de una celda convectiva en forma ovalada cuyo eje mayor coincide con la pared inclinada. Esta celda se ha introducido al cuerpo del fluido una distancia de 2.2cm., y su centro se encuentra a 1.2cm. de la pared inclinada y a una altura $y=2.0$ cm. La fotografía de la Figura 5.9a fué obtenida entre los 30-45s. de iniciado el calentamiento. En esta imagen no se aprecian partículas cerca de la pared inclinada, pero se observan trayectorias horizontales de la capa de intrusión con una velocidad promedio de 0.70mm/s. También fué posible visualizar el flujo de regreso a la pared caliente con una velocidad promedio aproximada a 0.44mm/s. La celda formada en este intervalo ha tenido un avance considerable respecto al presentado en los primeros 15s., ya que se ha introducido al cuerpo del fluido una longitud de 5.3cm. Su centro también se ha desplazado horizontalmente y se encuentra alejado de la pared inclinada 2.0cm. Las Figuras 5.10a-5.14a, presentan fotografías tomadas a los siguientes tiempos: $t=60, 90, 120, 150,$ y 180 s. En todas las imágenes se muestra un gran número de trayectorias de partículas en las cuatro regiones de interés, observando un comportamiento cualitativo similar en todas ellas, con un avance distinto de la celda a medida que transcurre el tiempo y una modificación de la posición de su centro. En las Tablas 5.3 y 5.4 se muestra un resumen del comportamiento cuantitativo de la celda en función del tiempo. Estas tablas proporcionan una aproximación de las velocidades en cada región de la celda. Las Figuras 5.15a-5.16a, tomadas a los tiempos $t=210$ s. y $t=240$ s. muestran un número pequeño de partículas, cuyas trayectorias se localizan principalmente en la capa de intrusión y en la región del flujo de regreso a la pared caliente. Las velocidades que se desarrollan en este intervalo de tiempo están en un rango de 0.35-0.41mm/s. Su centro se ha transformado en una región alargada horizontalmente.

REGION	FIGURA NUMERO	NUM. DE PARTI- CULAS.	VELOCIDAD (mm/s)	RANGO DE VELOCIDAD
CAPA LIMITE HIDRODINAMICA	5.8a	2 (a,b)	0.9	0.9-0.55
	5.11a	1 (a)	0.71	
	5.12a	1 (a)	0.6	
	5.14a	1 (a)	0.55	
CAPA DE INTRUSION	5.9a	2 (c,d)	0.82-0.65	0.82-0.41
	5.10a	2 (c,d)	0.65-0.71	
	5.11a	1 (c)	0.65	
	5.12a	1 (c)	0.65	
	5.13a	2 (c,d)	0.77-0.65	
	5.14a	1 (c)	0.65	
	5.15a	1 (c)	0.41	
5.16a	1 (c)	0.41		
FLUJO DE RE- GRESO A LA PARED CALIEN- TE	5.9a	2 (e,f)	0.59-0.35	0.59-0.18
	5.10a	1 (e)	0.35	
	5.11a	2 (e,f)	0.41-0.35	
	5.12a	3 (e,f,g)	0.59-0.53-0.47	
	5.13a	3 (e,f,g)	0.47-0.23-0.18	
	5.14a	4 (e,f,g)	0.57-0.47-0.18	
	5.15a	2 (e,f)	0.41-0.35	
5.16a	1 (e)	0.35		
FLUJO QUE SE INTRODUCE AL NUCLEO DE LA CELDA	5.8a	2 (h,i)	0.35	0.65-0.35
	5.9a	1 (h)	0.41	
	5.10a	1 (h)	0.71	
	5.11a	2 (h,i)	0.65-0.59	
	5.12a	1 (h)	0.65	
5.16a	1 (h)	0.59		

TABLA 5.4. VELOCIDADES DE PARTICULAS OBTENIDAS EN DISTINTAS REGIONES DEL DOMINIO.

De acuerdo a la información mostrada en la Tabla 5.4, la velocidad máxima se encuentra en la región donde se forma la capa límite hidrodinámica y tiene una magnitud de 0.9mm/s. Además se observa que esta velocidad va decreciendo conforme transcurre el tiempo, llegando a 0.55mm/s. después de transcurridos 195s. En términos generales, las velocidades dominantes están presentes en la capa límite hidrodinámica, lo cual es de esperarse ya que en la pared adyacente a esta zona se origina la fuerza de flotación que promueve el movimiento convectivo. La capa de intrusión y el flujo que se introduce al núcleo de la celda poseen los rangos de velocidades de 0.82-0.41mm/s. y 0.65-0.35mm/s. respectivamente, rangos que corresponden a las segundas regiones que poseen las más altas velocidades. Finalmente, el flujo de regreso a la pared caliente posee las velocidades más pequeñas 0.59-0.18mm/s.

Mediante los patrones de flujo observados en las fotografías (Figuras 5.8a-5.16a) y en las trayectorias de las partículas (Figuras 5.8b-5.16b), puede hacerse una descripción de los resultados obtenidos experimentalmente en esta región del tanque.

En la mayoría de las fotografías es posible observar trayectorias de partículas (a,b) paralelas a la pared inclinada en dirección ascendente. Los efectos de flotación debidos a la pared caliente están presentes originando que el fluido se caliente y disminuya su densidad, tal fenómeno lo obliga a buscar su posición de equilibrio en niveles superiores (Figuras 5.8a, 5.9a, 5.11a, 5.12a, 5.14a, 5.16a). La interfase salina o zona de estancamiento hace las veces de una frontera que obliga al fluido a cambiar su trayectoria en dirección a la pared vertical opuesta, es decir gira un ángulo de 90° hacia x^- ; este comportamiento puede comprobarse mediante la trayectoria de las partículas (c,d) que se localizan en la región de la capa de intrusión. El fluido que forma la capa de intrusión es fluido caliente que conserva una densidad disminuida y que proviene de la capa límite hidrodinámica. Otra parte del fluido que se descarga de la capa límite no está calentado, pero fue arrastrado por fuerzas viscosas presentes en la capa límite hidrodinámica; este fluido no calentado es descargado entonces hacia la parte central de la celda. En algunas fotografías se observa que las partículas que se encuentran en esta zona y que van descendiendo son succionadas por la capa límite inclinada antes de llegar al fondo del tanque, otras tocan la frontera inferior y luego vuelven a incorporarse a la capa límite (Figuras 5.11a, 5.12a, 5.14a). Finalmente, existe un flujo que va de regreso en dirección x^+ hacia la pared inclinada, este flujo anteriormente perteneció a la capa de intrusión horizontal, pero debido a la disipación de fuerzas térmicas y viscosas desciende a niveles inferiores ocupando por conservación de masa el espacio del fluido que es desplazado hacia la pared caliente (partículas f,g).

Hasta este momento se ha dado una descripción del patrón de flujo dividiéndolo en cuatro regiones de acuerdo al análisis hecho por Patterson e Imberger, observando que su teoría ha correspondido en gran medida con los resultados obtenidos mediante la técnica fotográfica utilizada en este trabajo. Por otra parte, es factible complementar el análisis de los resultados através de un tratamiento adicional que se le ha aplicado a las trayectorias de las partículas (Figuras 5.8b-5.16b).

Observaciones minuciosas de las Figuras 5.8a-5.16a, permiten proponer un tratamiento adicional que proporciona información sobre el avance de la celda a lo largo del dominio. Este tratamiento se hace con ayuda de las imágenes grabadas en video. En todas las figuras de trayectorias de partículas (Figuras 5.8b-5.16b) se han dibujado con líneas punteadas los recorridos de conjuntos de partículas. Nótese que algunas trayectorias han tenido que ser complementadas con líneas imaginarias en zonas donde no fue posible observar la estructura completa por falta de partículas. Haciendo mediciones de la longitud respecto a la pared caliente de las estructuras dibujadas, ha sido posible presentar la Tabla 5.5 donde se ha anotado el avance de la celda a tiempos consecutivos.

FIGURAS DE TRAYECTORIAS	INTERVALO DE TIEMPO	AVANCE MAXIMO (cm.)
5.8b	0-15	2.2
5.9b	30-45	5.3
5.10b	60-75	7.1
5.11b	90-105	9.5
5.12b	120-135	9.0
5.13b	150-165	10.4
5.14b	180-195	10.8
5.15b	210-225	9.5
5.16b	240-255	10.5

TABLA 5.5. PRESENTA EL AVANCE DE LA CELDA INFERIOR RESPECTO AL TIEMPO.

De acuerdo a los resultados obtenidos, puede concluirse que hasta los 195s. el avance de los frentes de la celda se ha incrementado conforme transcurre el tiempo, posteriormente no fué posible tener trayectorias de partículas en zonas donde se presume la existencia de un flujo. Hasta el tiempo donde se obtiene información razonable la velocidad promedio de avance de la celda es de 0.53mm/s., es decir, a un tiempo de 3 minutos y 15 segundos la celda recorre una distancia de 10.8cm.

b) Zona intermedia de estancamiento. La zona de estancamiento ha sido denotada por una mancha irregular alargada entre las zonas inferior y superior (Figura 5.7). Esta zona puede describirse mediante cualquiera de las fotografías presentadas, ya que su conducta fué la misma durante todo el tiempo de observación. Como puede apreciarse, el número de partículas estacionadas en esta zona es muy grande; esto se debe a que las partículas de la zona superior de densidad aproximada a la zona de gradiente cayeron y se detuvieron en el nivel de densidad correspondiente. La característica importante de la zona de gradiente salino estuvo conformada por un campo de velocidades casi nulo, no observándose movimientos cuantificables de las partículas durante el tiempo de interés del fenómeno. El espesor de esta zona fué de aproximadamente 2.0cm. Algunas partículas se separaron debido a las fuerzas viscosas de los flujos convectivos de las celdas superior e inferior. El número de Rayleigh térmico modificado de acuerdo a la definición de Chen y Skok [18] para esta zona de gradiente es $R_{m}=293.0$, encontrándose dentro del régimen subcrítico y correspondiendo con los resultados encontrados en este estudio.

c) Zona superior convectiva. A partir de las Figuras 5.17a-5.21a se obtuvieron las Figuras 5.17b-5.21b de la misma manera en que se obtuvieron las Figuras 5.8b-5.16b para la descripción de la zona inferior. Pese a la pequeña cantidad de partículas pudo observarse la estructura de una celda convectiva de aproximadamente 4.0cm. de espesor. Al igual que la región inferior, esta zona también se considera de composición constante. Las Figuras 5.18b y 5.21b (trayectoria de partículas), muestran las trayectorias de dos

partículas adyacentes a la pared inclinada con velocidades ascendentes cercanas a 0.8mm/s. Las Figuras 5.17b y 5.21b presentan varias trayectorias de partículas que se encuentran localizadas a 15.0mm de la pared inclinada, estas partículas van en sentido descendente con una velocidad de 0.5mm/s. para la partícula de la Figura 5.17b y 0.8mm/s, como promedio de las partículas registradas en la Figura 5.21b. En todas las fotografías que describen esta celda se observan trayectorias de partículas alejadas de la pared caliente a una distancia de 5.5cm., estas trayectorias muestran movimientos horizontales del fluido cerca de la superficie del tanque (capa de intrusión) en dirección a la pared vertical opuesta, además movimiento del fluido que va de regreso a la pared caliente por encima de la zona de estancamiento. La velocidad de las partículas en dirección a la pared vertical opuesta es ligeramente mayor que la velocidad de las partículas de regreso a la pared caliente, siendo éstas de 0.7mm/s. y 0.4mm/s. respectivamente. Aunque no fué posible obtener una secuencia completa de la celda convectiva, si pudo obtenerse una idea global del movimiento del fluido en varias partes de esta región, principalmente cerca de la pared inclinada (capa límite hidrodinámica), cerca de la superficie del tanque (capa de intrusión) y por encima de la zona de estancamiento (flujo de regreso a la pared caliente).

FIGURA 5.7. OBSERVACION GENERAL DE LA ESTRUCTURA QUE SE PRESENTA EN LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS CON PARTICULAS DE ESTEARATO DE ALUMINIO.

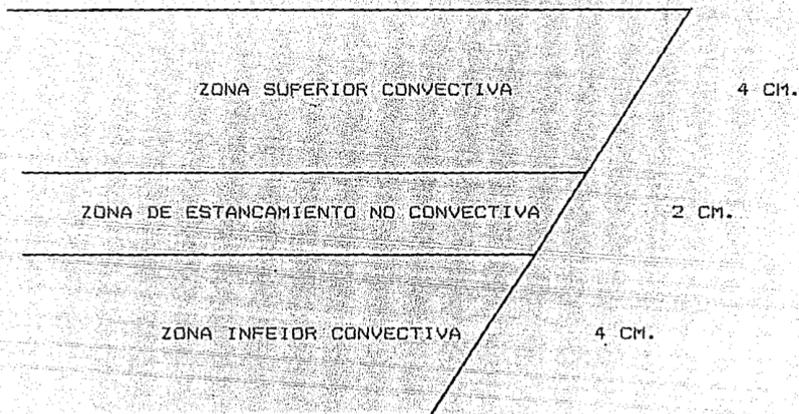


FIGURA 5.8a. FOTOGRAFIA QUE MUESTRA LA ZONA INFERIOR CONVECTIVA A UN TIEMPO INICIAL $t=0.0s$.

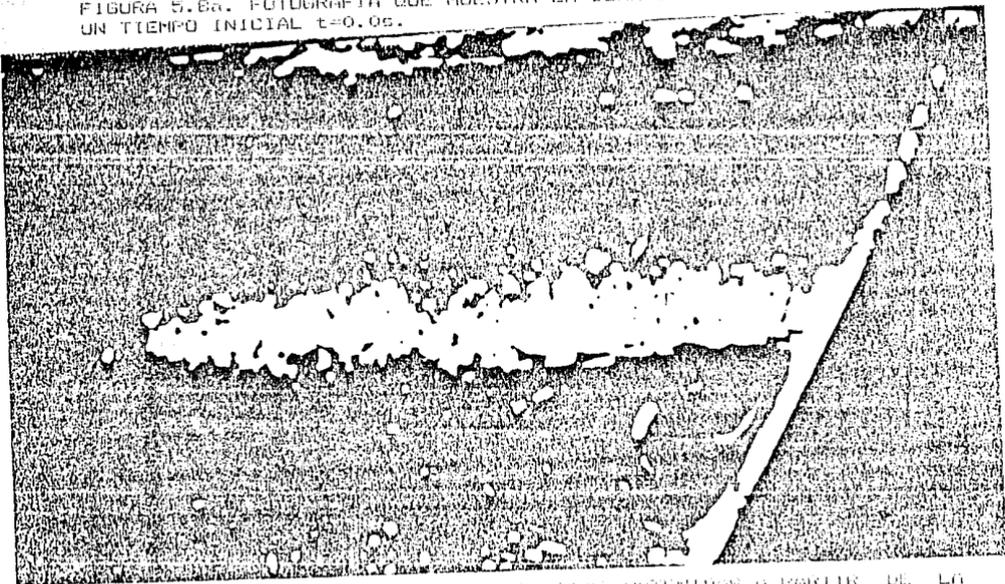


FIGURA 5.8b. TRAYECTORIAS DE PARTICULAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA FOTOGRAFIA MOSTRADA EN LA FIGURA 5.8a.

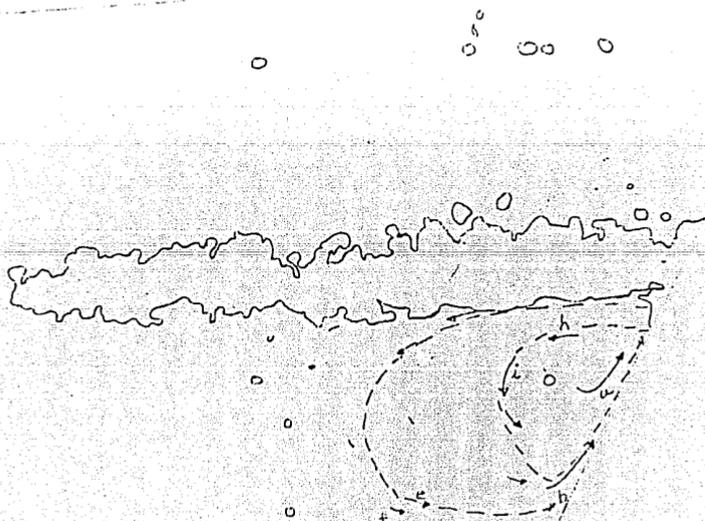


FIGURA 5.9a. FOTOGRAFIA QUE MUESTRA LA ZONA INFERIOR CONVECTIVA A UN TIEMPO $t=30.0s$.



FIGURA 5.9b. TRAYECTORIAS DE PARTICULAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA FOTOGRAFIA MOSTRADA EN LA FIGURA 5.9a.

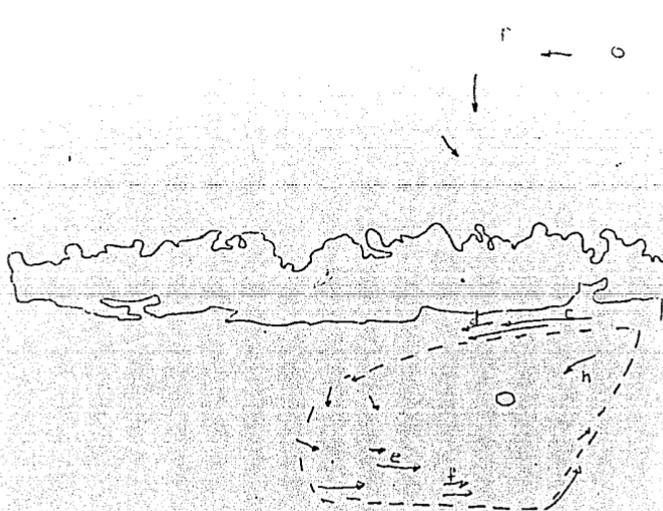


FIGURA 5.10a. FOTOGRAFIA QUE MUESTRA LA ZONA INFERIOR CONECTIVA A UN TIEMPO 1960.05.

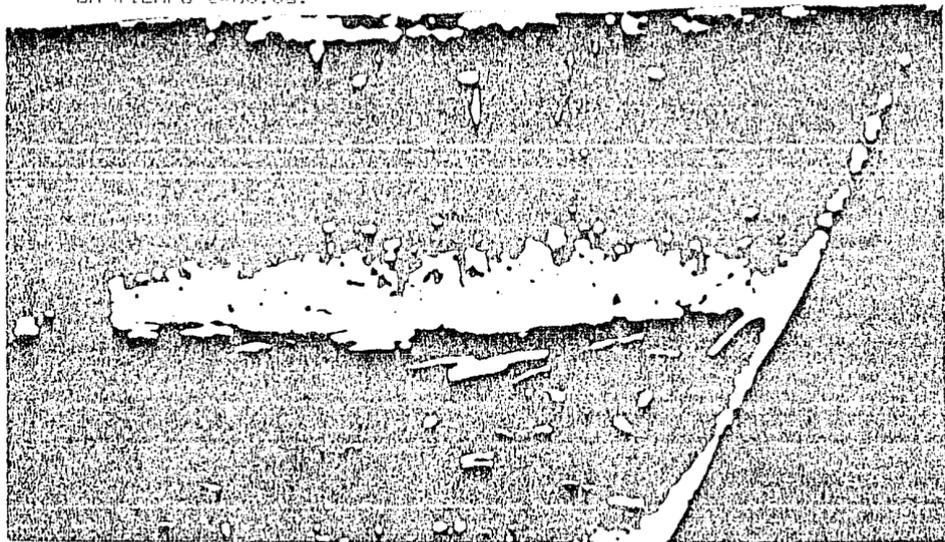


FIGURA 5.10b. TRAYECTORIAS DE PARTICULAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA FOTOGRAFIA MOSTRADA EN LA FIGURA 5.10a.

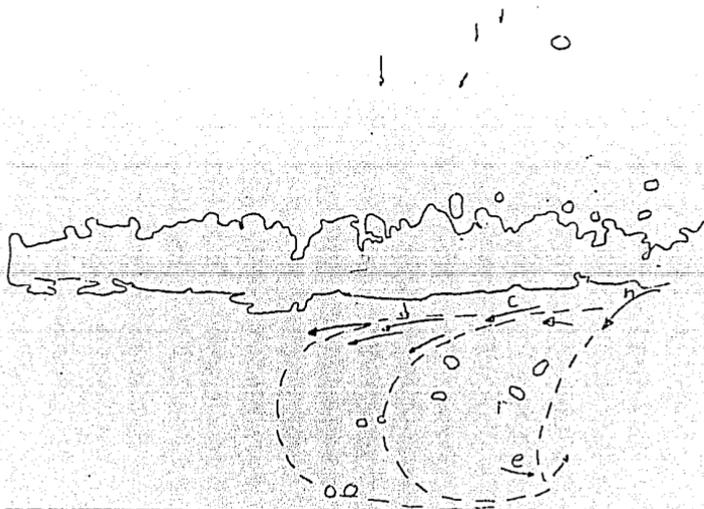


FIGURA 5.11a. FOTOGRAFIA QUE MUESTRA LA ZONA INFERIOR CONVECTIVA A UN TIEMPO $t = 70.0s$.

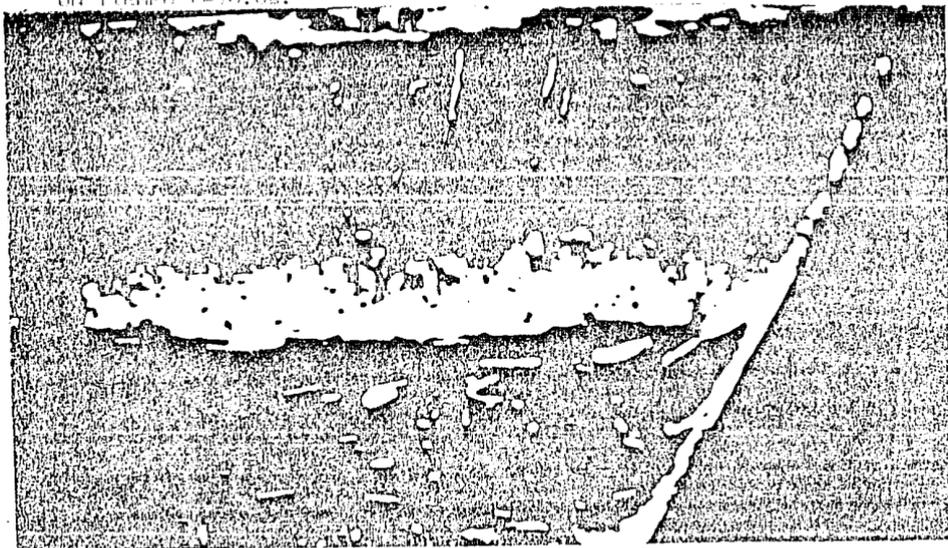


FIGURA 5.11b. TRAYECTORIAS DE PARTICULAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA FOTOGRAFIA MOSTRADA EN LA FIGURA 5.11a.

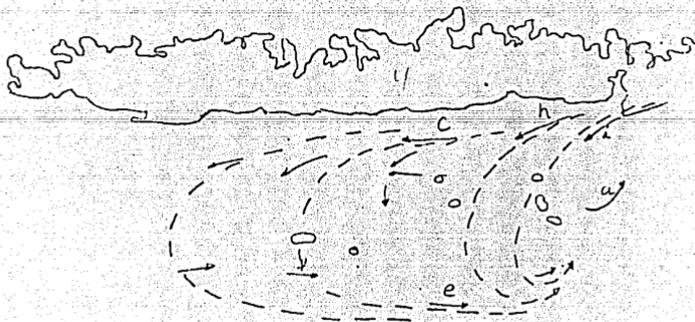


FIGURA 5.12a. FOTOGRAFIA QUE MUESTRA LA ZONA INFERIOR CONVECTIVA A UN TIEMPO $t=120.0s$.

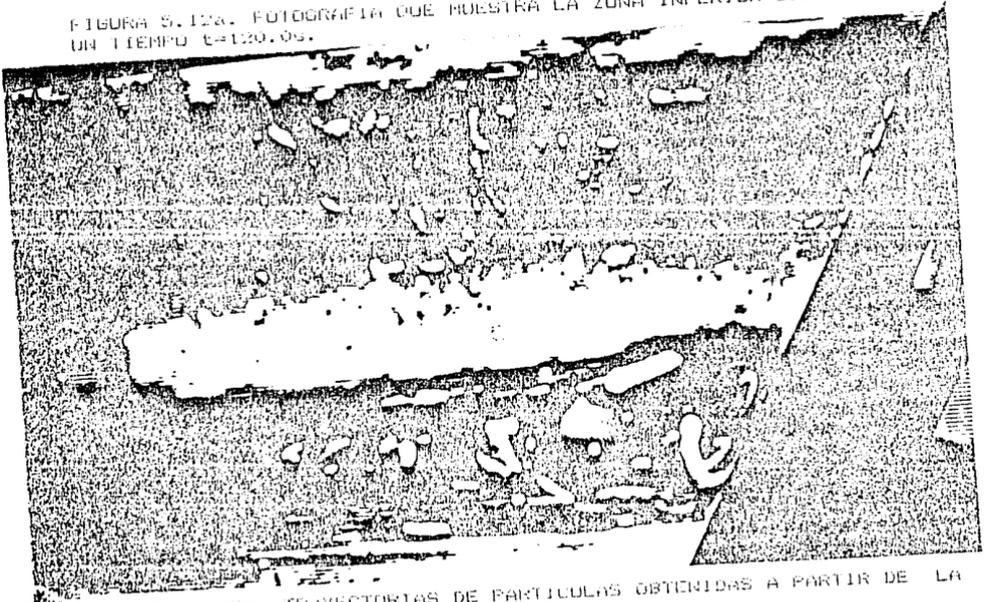


FIGURA 5.12b. TRAYECTORIAS DE PARTICULAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA FOTOGRAFIA MOSTRADA EN LA FIGURA 5.12a.

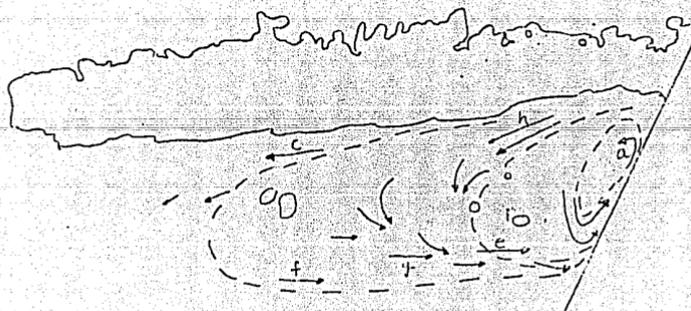


FIGURA 5.15a. FOTOGRAFIA QUE MUESTRA LA ZONA INFERIOR CONVECTIVA A UN TIEMPO $t=150.0s$.

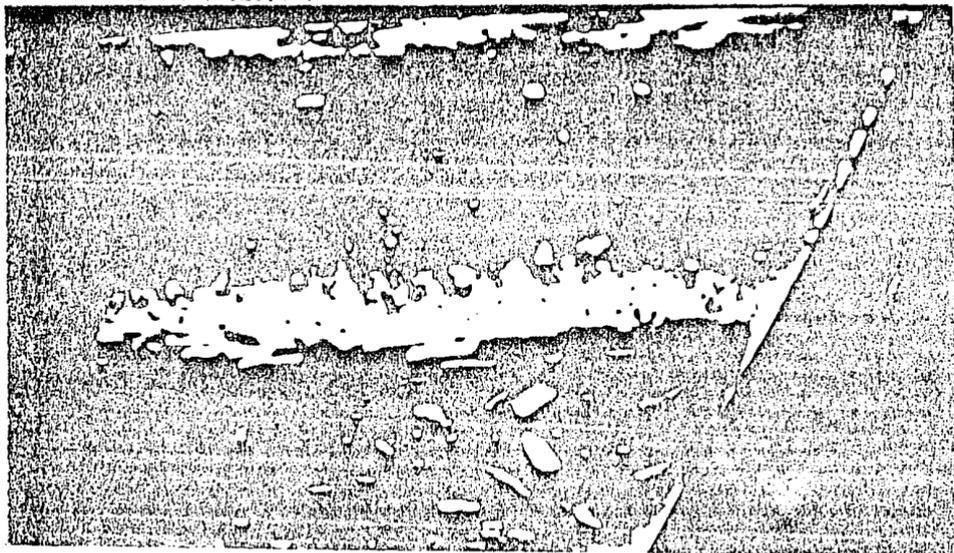


FIGURA 5.15b. TRAYECTORIAS DE PARTICULAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA FOTOGRAFIA MOSTRADA EN LA FIGURA 5.15a.

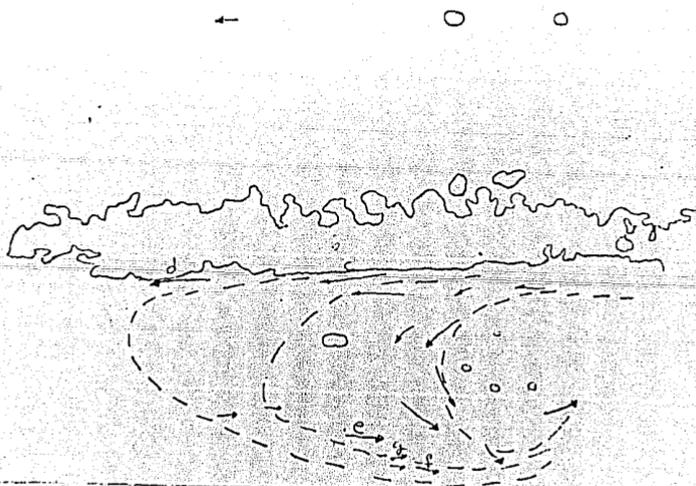


FIGURA 5.14a. FOTOGRAFIA QUE MUESTRA LA ZONA INFERIOR CONECTIVA A UN TIEMPO t=150.00.

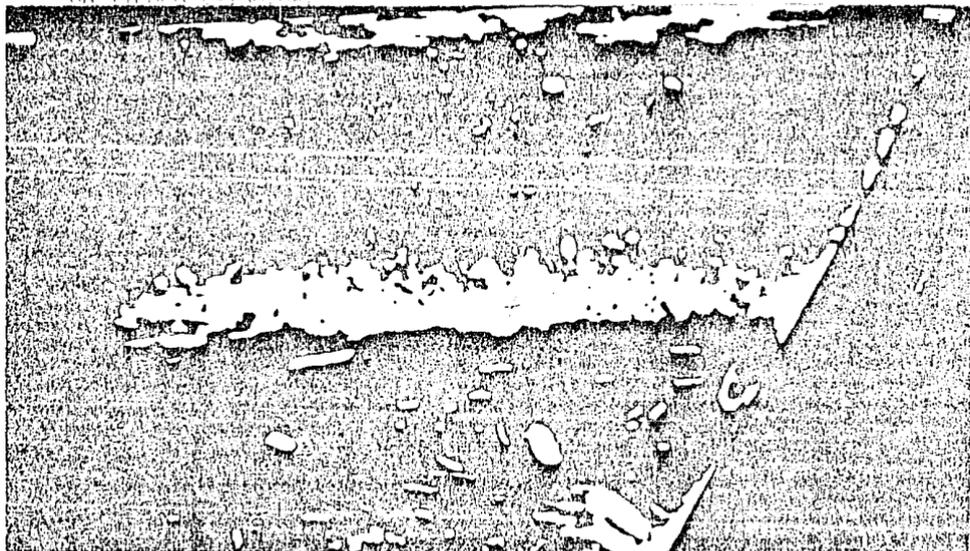


FIGURA 5.14b. TRAZADO DE LAS PARTICULAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA FOTOGRAFIA MOSTRADA EN LA FIGURA 5.14a.

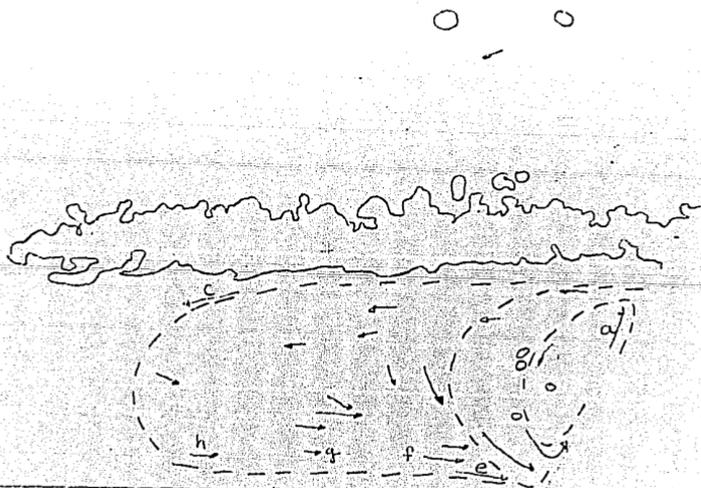


FIGURA 5.15a. FOTOGRAFIA QUE MUESTRA LA ZONA INFERIOR CONVECTIVA A UN TIEMPO $t=210.0s$.

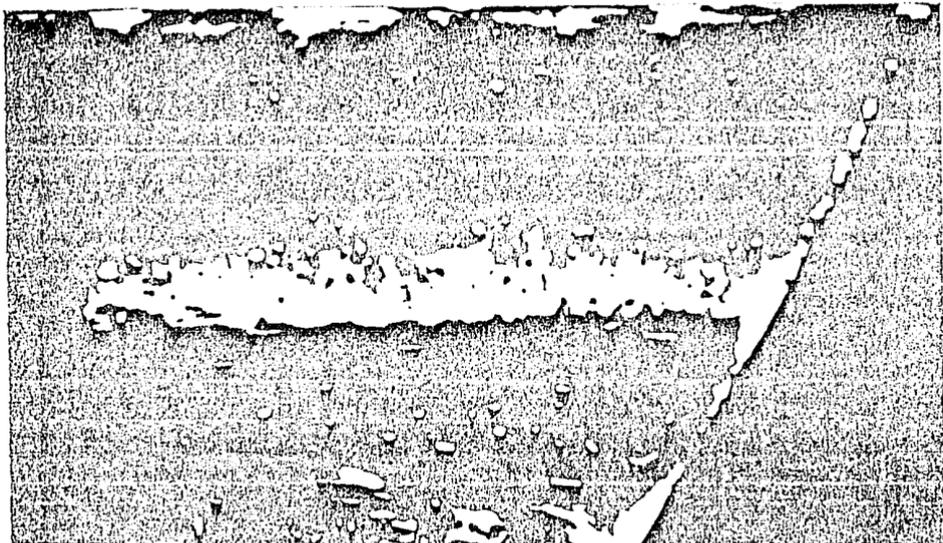


FIGURA 5.15b. TRAYECTORIAS DE PARTICULAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA FOTOGRAFIA MOSTRADA EN LA FIGURA 5.15a.

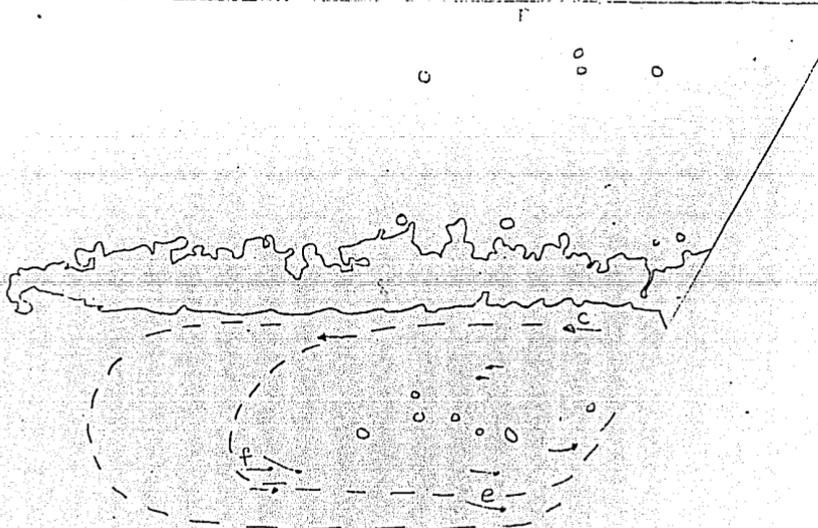


FIGURA 5.10a. FOTOGRAFIA QUE MUESTRA LA ZONA INFERIOR CONVECTIVA A UN TIEMPO ESCUERO.

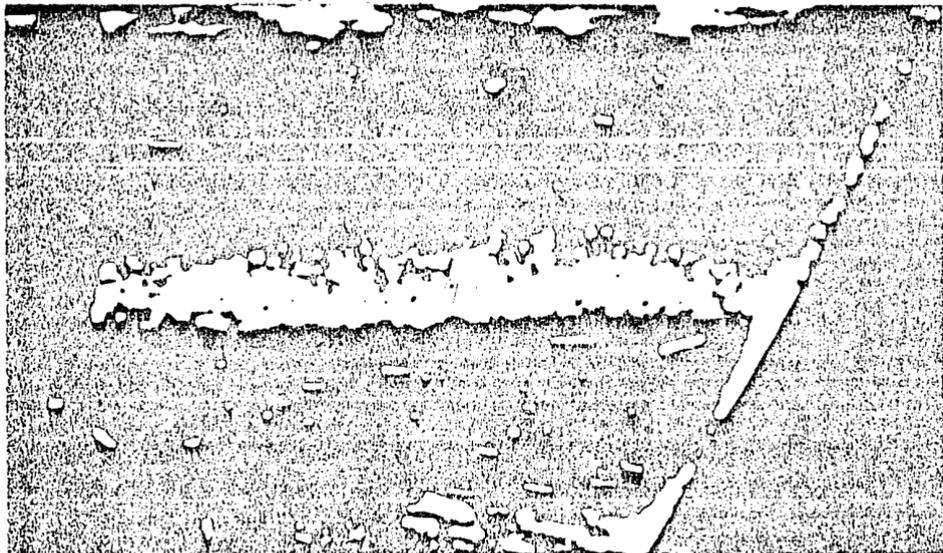


FIGURA 5.10b. DISTRIBUCION DE PARTICULAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA FOTOGRAFIA MOSTRADA EN LA FIGURA 5.10a.

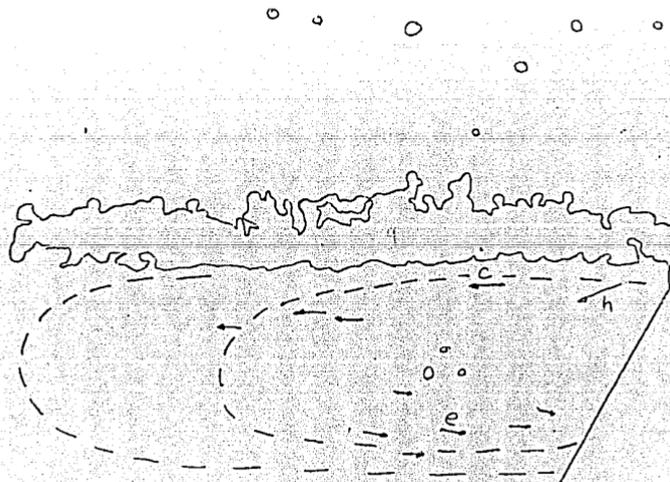


FIGURA 5.17a. FOTOGRAFIA QUE MUESTRA LA ZONA SUPERIOR CONVECTIVA A UN TIEMPO INICIAL E=0.0.

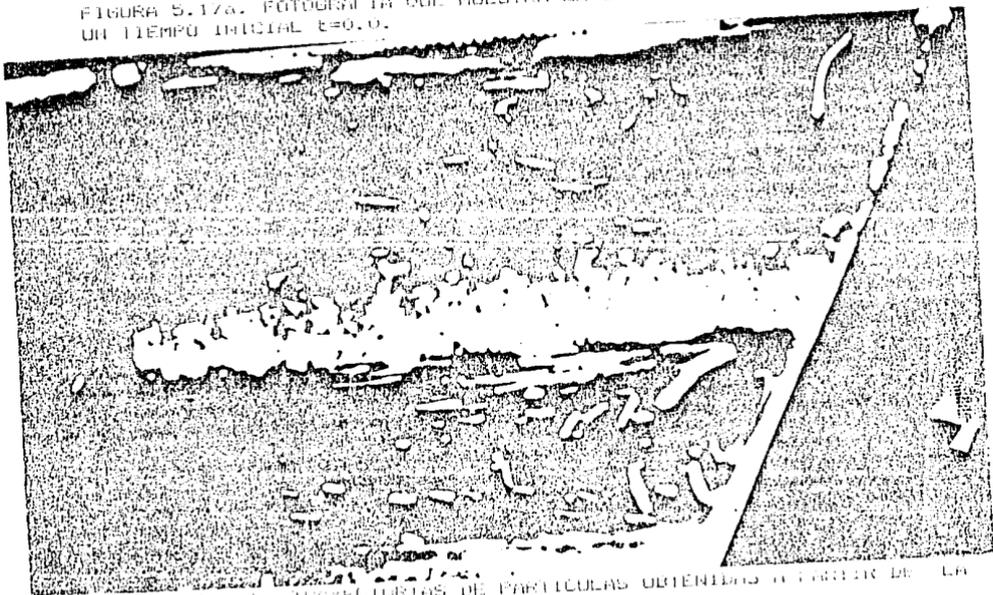


FIGURA 5.17b. TRAYECTORIAS DE PARTICULAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA FOTOGRAFIA MOSTRADA EN LA FIGURA 5.17a.

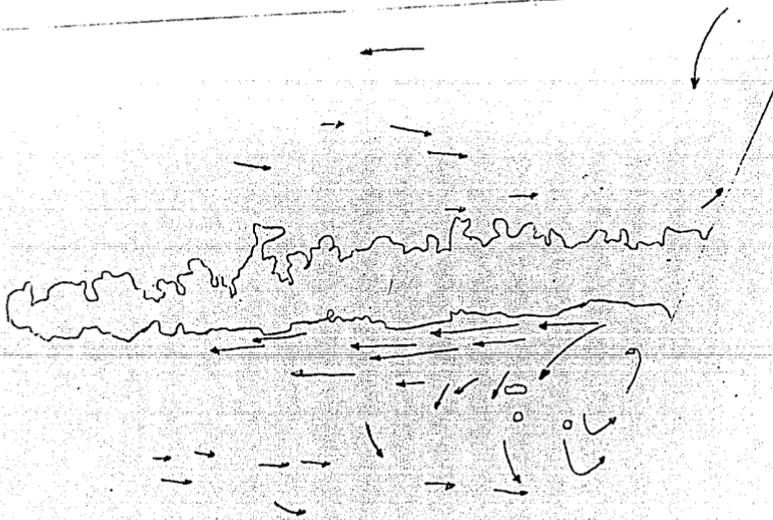


FIGURA 5.185. FOTOGRAFIA QUE MUESTRA LA ZONA SUPERIOR CONVECTIVA A UN TIEMPO PRIZO.

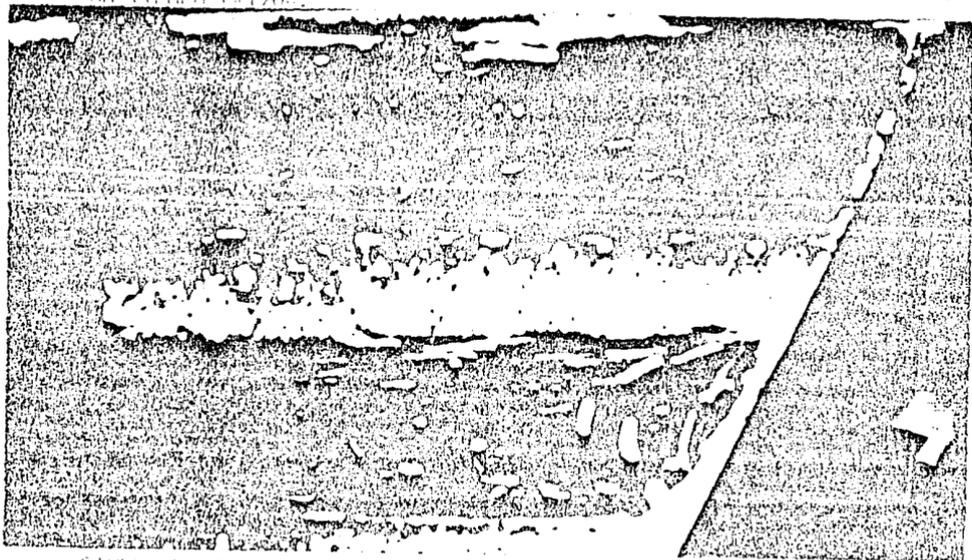


FIGURA 5.186. TRAYECTORIAS DE PARTICULAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA FOTOGRAFIA MOSTRADA EN LA FIGURA 5.185.

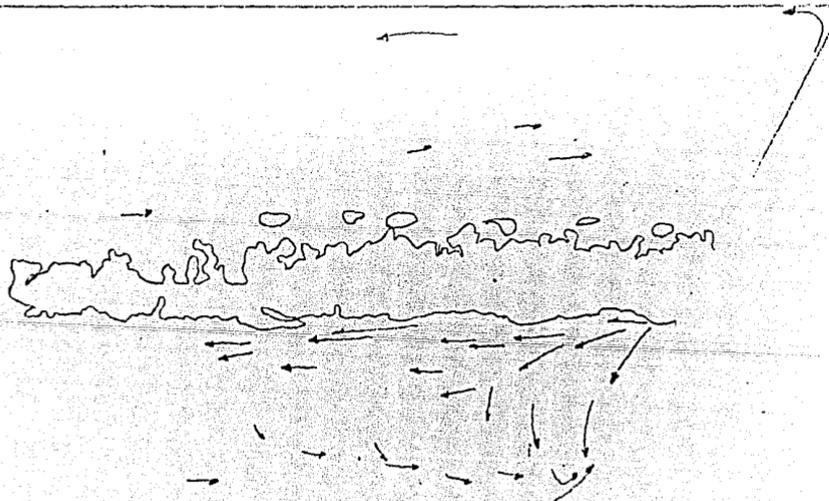


FIGURA 5.19a. FOTOGRAFÍA QUE MUESTRA LA ZONA SUPERIOR CONVECTIVA A UN TIEMPO $t=270s$.



FIGURA 5.19b. TRAYECTORIAS DE PARTICULAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA FOTOGRAFIA MOSTRADA EN LA FIGURA 5.19a.

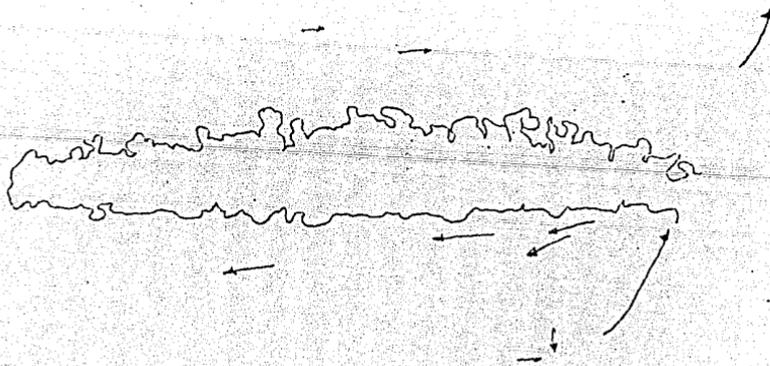


FIGURA 5.20a. FOTOGRAFIA QUE MUESTRA LA ZONA SUPERIOR CONVECTIVA A UN TIEMPO $t=940s$.



FIGURA 5.20b. TRAYECTORIAS DE PARTICULAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA FOTOGRAFIA MOSTRADA EN LA FIGURA 5.20a.

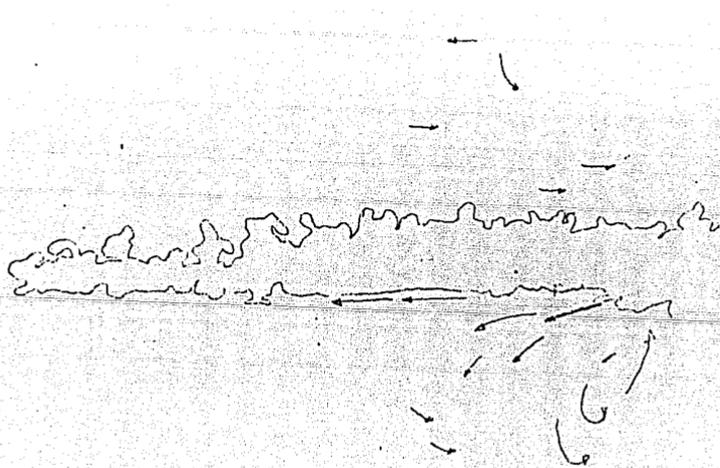


FIGURA 5.21a. FOTOGRAFIA QUE MUESTRA LA ZONA SUPERIOR CONVECTIVA A UN TIEMPO $t=13005$.

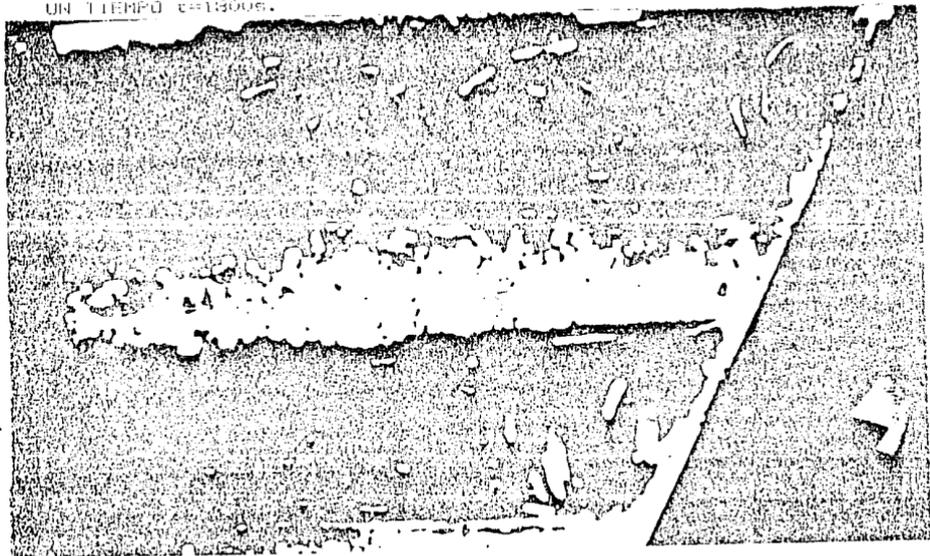
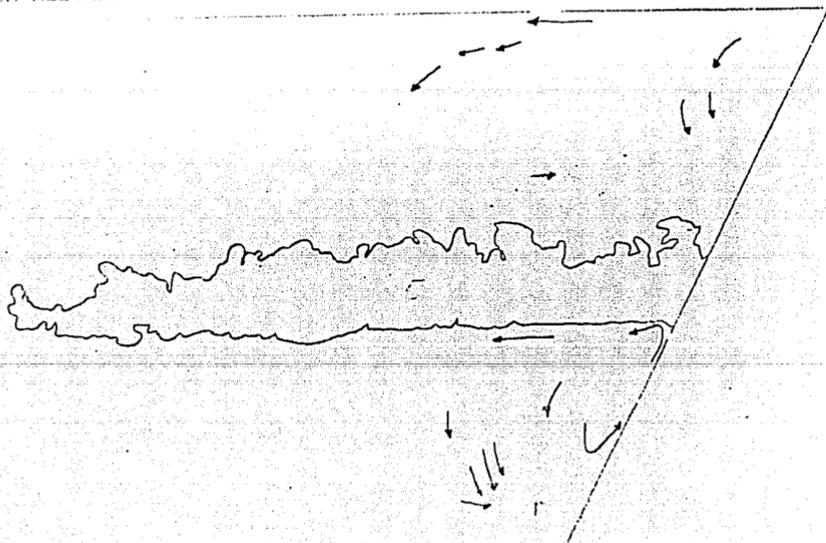


FIGURA 5.21b. TRAYECTORIAS DE PARTICULAS OBTENIDAS A PARTIR DE LA FOTOGRAFIA MOSTRADA EN LA FIGURA 5.21a.



DISCUSION Y CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un estudio teórico y experimental sobre la convección natural en un sistema doblemente difusivo en estado transitorio. El sistema consiste de una mezcla salina y el calentamiento se hace a través de una de sus paredes laterales que se mantiene a temperatura constante y uniforme mayor que la temperatura del fluido de trabajo. En el estudio teórico, se resolvieron numéricamente las ecuaciones de balance para determinar los campos de velocidad, temperatura, y concentración salina, bajo dos diferentes distribuciones iniciales de concentración. El modelo numérico se desarrolló considerando que el recipiente que contiene al sistema tiene geometría rectangular. Los resultados obtenidos empleando una distribución inicial de salinidad tipo escalón indican que el patrón de flujo formado genera una celda convectiva en cada región de densidad constante. Esta estructura se genera inicialmente en la vecindad de la pared caliente y al transcurrir el tiempo se expande hacia el interior de la cavidad moviéndose a una velocidad que coincide con la teoría de estimación de escalas presentada por Patterson e Imberger [7] para un sistema homogéneo. Este resultado indica que las dos capas de densidad constante se comportan como sistemas homogéneos prácticamente independientes. Mas aún, en la totalidad del tiempo examinado, se encuentra que la distribución de densidad permanece casi igual a la distribución inicial. El hecho de que el movimiento convectivo no modifique notablemente la distribución de densidades se debe a que en la región cercana a la interfase, el movimiento es paralelo a ella y por lo tanto no hay transporte convectivo de masa en la dirección vertical. Es importante enfatizar que estos comentarios son válidos únicamente para el rango de valores de números de Rayleigh planteados en esta tesis; es probable que para un calentamiento mayor, existan velocidades verticales cerca de la interfase, principalmente en la región de la capa límite. El estudio numérico también se hizo considerando que la distribución inicial de densidades contiene una región intermedia donde la transición de densidad máxima (región inferior) a mínima (región superior) se hace de manera suave. Esta distribución inicial, define tres regiones en el sistema. El flujo encontrado en las regiones de densidad constante es muy similar al que se presentó en el primer caso, mientras que la región con gradiente de densidades finito permanece casi inmóvil. Esto hace que también en este caso, la distribución inicial de densidades permanezca casi inalterada. El movimiento en la zona central podría presentarse para mayores calentamientos, cuando su extensión vertical sea mayor o bien cuando el gradiente salino sea menor.

Fenómenos mas simples resueltos numéricamente fueron el isotérmico puramente difusivo y el de convección natural para un fluido homogéneo. Los resultados del primero dieron una idea del comportamiento de los sistemas estratificados cuando éstos no son calentados lateralmente, encontrando que se requiere de un tiempo muy grande para obtener el mezclado de dos regiones a diferente concentración. El segundo corrobora la formación de un celda convectiva que ha sido discutida teóricamente por Patterson e

Imberger [7], y ayuda a entender los resultados obtenidos para el caso doblemente difusivo con distribución de concentración tipo escalón .

Para el estudio experimental se construyó un recipiente con una pared inclinada para simular las condiciones en los estanques solares. La estructura del flujo global es la de dos celdas convectivas en las regiones superior e inferior y una zona de movimiento notablemente mas lento en la región intermedia del tanque. Debe enfatizarse que en la preparación del experimento, el llenado de la celda se hace lentamente para evitar en lo posible la interacción de las mezclas de diferente concentración; esto hace que en la interfase, capas de fluido de diferente concentración estén en contacto durante un tiempo del orden de 30 minutos. En consecuencia la difusión molecular genera una distribución gradual de densidades. Las condiciones iniciales en el experimento semejan a las estudiadas en el segundo caso doblemente difusivo del trabajo teórico (DDTR); por consiguiente se espera que el resultado observado experimentalmente tenga propiedades similares a las descritas en la teoría. Es posible distinguir en cada celda las regiones de capa límite, capa de intrusión y zona de retorno. La visualización con permanganato de potasio lleva a la conclusión que el flujo en las celdas convectivas es aproximadamente bidimensional, pero el flujo en la región intermedia tiene estructura tridimensional. Aparentemente, la dinámica de las celdas en las regiones superior e inferior es prácticamente independiente del movimiento en la región central para los valores de los parámetros estudiados. Una extensión natural del trabajo experimental consiste en aumentar el rango de parámetros para explorar la interacción de las celdas con la región central y eventualmente, la interacción entre las dos celdas. Aunque la comparación teórico-experimental es difícil debido a que la geometría empleada para el estudio teórico no coincide con la del estudio experimental, se han logrado hacer comparaciones cualitativas que muestran una semejanza en su comportamiento. Esto se debe a que originalmente se intentó hacer el modelo teórico para la geometría con la pared inclinada, pero se subestimó la dificultad de analizar un sistema doblemente difusivo en coordenadas generalizadas en el tiempo destinado al desarrollo de esta tesis. Se hizo un esfuerzo para entender las diferencias entre los resultados teóricos obtenidos con los casos de pared vertical y los resultados experimentales obtenidos con la pared inclinada.

Una comparación cualitativa de los resultados teóricos y experimentales aún para diferente geometría ha mostrado patrones de flujo similares, observando que las celdas convectivas desarrolladas toman la forma geométrica de los dominios estudiados. Los números de Rayleigh críticos (ecuaciones 1.6 y 1.7) para paredes verticales y paredes inclinadas determinados por Chen Briggs y Wirtz [21] y Chen y Skok [18] respectivamente, presentan una conducta dentro del régimen subcrítico que corresponde con los resultados numéricos y experimentales obtenidos en este trabajo.

En los párrafos anteriores se hizo una discusión general del trabajo realizado en esta tesis. A continuación se listarán las

conclusiones de acuerdo a los objetivos que se fijaron en el capítulo 1.

-El estudio de la convección natural para un fluido homogéneo debido a un calentamiento lateral a temperatura constante permitió demostrar la formación de una celda convectiva, encontrándose que la teoría de Patterson e Imberger predice aproximadamente bien el patrón de flujo obtenido en este fenómeno. Se concluye que para el número de Rayleigh térmico estudiado en este caso, es posible el desarrollo de movimientos convectivos, los cuales se encuentran dentro del régimen de transición definido por los autores antes mencionados.

-El caso doblemente difusivo con concentración inicial tipo escalón presentó la formación de dos celdas convectivas, a diferencia del caso de convección natural para un fluido homogéneo que solo presentó una celda convectiva. De la observación anterior se concluye que en la existencia de fluidos estratificados en forma escalonada con calentamiento lateral desde un gradiente de temperatura de 2°C hasta 10°C , es posible la formación de celdas convectivas cuyo número y espesor está en función de la distribución de concentración inicial. Evidentemente este sistema no es similar a un estanque solar, sin embargo es un problema que semeja a cualquiera de las interfases que presenta el estanque, por tanto puede concluirse que bajo las condiciones de estudio planteadas en esta tesis, no existe un mezclamiento importante de las regiones a distintas concentraciones, manteniéndose la interfase casi inalterada. Esto, en otros términos significa que las interfases permanecen en su lugar y las celdas no erosionan la región de gradiente que posee el estanque, sin que se altere la estabilidad del sistema. Un análisis más profundo de este caso permitió determinar la conducta oscilatoria del fenómeno, lo cual representa un hallazgo importante que incita a continuar con el estudio de estos sistemas.

-Uno de los principales objetivos de esta tesis es la solución numérica del fenómeno doblemente difusivo con distribución de concentración inicial tipo rampa, debido a que este sistema semeja el cuerpo de un estanque solar. Como ya se mencionó anteriormente, los resultados de este caso mostraron la formación de una celda convectiva en cada región a concentración constante y una zona de estancamiento en el gradiente de concentración. Este resultado es de interés para la investigación y desarrollo de los estanques solares, ya que un calentamiento en las paredes laterales podría producir mezclamiento en el gradiente salino debido al movimiento del fluido que rompería con la estabilidad del estanque. Estas observaciones permiten concluir que para los gradientes de temperatura analizados en este trabajo, la región de gradiente del estanque no sufre ningún cambio por calentamiento lateral.

-Del trabajo obtenido a nivel de laboratorio se obtuvieron las siguientes conclusiones:

El patrón de flujo observado experimentalmente es similar al encontrado numéricamente para el caso doblemente difusivo con distribución de concentración inicial tipo rampa. Respecto al campo de velocidades se verificó el mismo comportamiento de las

celdas convectivas en las regiones de concentración constante, es decir, las velocidades de la celda inferior son mayores que las velocidades de la celda superior, esto se observó en los experimentos realizados con partículas de estearato de aluminio. El comportamiento cualitativo de las celdas respecto a las regiones que las conforman (capa límite, capa de intrusión, flujo de retorno a la pared caliente) fue el mismo para los dos estudios (experimental y numérico). Así también, se observó experimentalmente una zona de velocidades nulas en la región de gradiente salino.

Del trabajo experimental también puede concluirse que la técnica de visualización utilizando trazadores de estearato de aluminio fue exitosa en la determinación del campo de velocidades, no así con la utilización de la tinta de permanganato de potasio que solo dio una idea del patrón de flujo. Sin embargo, con los experimentos realizados con tinta se pudo dilucidar anticipadamente el comportamiento bidimensional del fenómeno en lo que respecta a las celdas convectivas, comprobándose mas tarde con los experimentos realizados con partículas de estearato de aluminio. Asimismo, la investigación de estas partículas fue relevante en los resultados experimentales.

El campo de concentraciones no sufrió cambios considerables durante el tiempo de duración de los experimentos, concluyendo que aún en la existencia del fenómeno de convección natural, no es apreciable el mezclado de las regiones del sistema cuando el calentamiento es con un gradiente de temperatura de 5°C .

Las partículas de estearato de aluminio que poseen una densidad similar a las del fluido de trabajo y la óptima iluminación con el rayo laser, así como el desarrollo de la técnica fotográfica fueron los principales factores que hicieron posible la realización del estudio experimental para la obtención del campo de velocidades y el patrón de flujo.

Propuesta de trabajo futuro:

La continuación de este estudio debe ser enfocado a la solución numérica del sistema doblemente difusivo constituido por una región de gradiente salino (caso DDYR), para una pared lateral inclinada. La variación de parámetros sugeridos es respecto a los espesores de las regiones del sistema, los gradientes de temperatura y el ángulo de inclinación.

Las ideas que se proponen de carácter específico son:

EXPERIMENTAL.

a) Medir el campo de velocidades en regiones formadas por agua pura con partículas de densidad similar a la de este fluido.

b) Realizar pruebas con números de Rayleigh térmicos y salinos mas grandes que los utilizados en esta tesis.

c) Trabajar con sistemas que posean distintos espesores en sus regiones (superior e inferior a concentración constante y zona de

gradiente lineal).

d) Construir un tanque con distinta inclinación y con mayor longitud.

NÚMÉRICO.

a) Concluir el código numérico para la obtención de resultados del caso DDTR (ver capítulo 3) para una geometría de pared inclinada.

b) Realizar exploraciones numéricas con condiciones iniciales diferentes y cambios en los parámetros adimensionales como números de Rayleigh térmico y salino.

c) Hacer refinamiento de mallas no uniformes.

APENDICE

ARCHIVO Q1

TALK=F;RUN(1, 1);VDU=TTY

Convección Natural doblemente difusiva en un tanque con superficie libre.

GROUP 1. Run title and other preliminaries
 TEXT(LAMINAR NATURAL CONVECTION IN A TANK)
 SALINITY EXPANSION COEFFICIENT----- RG(1)
 REFERENCE CONCENTRATION----- RG(2)
 REFERENCE DENSITY ----- RG(3)
 GRAVITY ACCELERATION----- RG(4)
 THERMAL EXPANSION COEFFICIENT----- RG(5)
 KINEMATIC VISCOSITY OF THE MEDIUM--- RG(6)
 REFERENCE TEMPERATURE----- RG(7)

REAL (RG(100))
 RG(1) = 6.8E-04
 RG(2) = 0.0
 RG(3) = 997.0
 RG(4) = 9.81
 RG(5) = 2.9E-04
 RG(6) = 8.8E-07
 RG(7) = 25.0

GROUP 2. Transience; time-step specification
 STEADY = F
 GRDPWR(T,25,5.0,1.0)

GROUP 3. X-direction grid specification
 GRDPWR(X,40,0.3,1.0)

GROUP 4. Y-direction grid specification
 GRDPWR(Y,40,0.1,1.0)

GROUP 5. Z-direction grid specification
 GROUP 6. Body-fitted coordinates or grid distortion
 GROUP 7. Variables stored, solved & named

SOLVE(P1,U1,V1,H1,C1);SOLUTN(P1,Y,Y,P,P,P);NAME(H1)=TEMP

GROUP 8. Terms (in differential equations) & devices
 TERMS(TEMP,N,Y,Y,Y,Y,N)

GROUP 9. Properties of the medium (or media)

RHO1 = RG(3)
 ENUL = RG(6)
 PRNDTL(TEMP) = 6.0
 PRNDTL(C1) = 553.46

GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties

GROUP 11. Initialization of variable or porosity fields

NAME1=DATA5
 FIINIT(P1)=0.0;FIINIT(U1)=0.0;FIINIT(V1)=0.0;FIINIT(TEMP)=25.0
 INICIALIZACION DE LA CONCENTRACION EN AMBAS REGIONES
 PATCH(CONBOOT,INIVAL,1,NX,1,NY/2,1,1,1,1)
 INIT(CONBOOT,C1,1.0,30.6)
 PATCH(CONTOP,INIVAL,1,NX,NY/2+1,NY,1,1,1,1)
 INIT(CONTOP,C1,1.0,0.0)

INIFLD = T

GROUP 12. Convection and diffusion adjustments
 GROUP 13. Boundary conditions and special sources

ISOTHERMAL WALL. TEMP=30DEG
 PATCH(HOTVER,EWALL,NX,NX,1,NY,1,1,1,LSTEP)
 COVAL(HOTVER,V1,1.0,0.0)

```

COVAL(HOTVER,TEMP,1./PRNDTL(TEMP),30.0)
      *WEST WALL, ADIABATIC BUT WITH FRICTION
PATCH(COLDVER,WWALL,1,1,1,NY,1,1,1,LSTEP)
COVAL(COLDVER,V1,1.0,0.0)
      *SOUTH WALL ADIABATIC BUT WITH FRICTION
PATCH(SADIAC,SWALL,1,NX,1,1,1,1,LSTEP)
COVAL(SADIAC,U1,1.0,0.0)
      *BUILT-IN BOUSSINESQ APPROXIMATION FOR BUOYANCY SOURCE TERM
PATCH(FLOT,PHASEM,1,NX,1,NY,1,1,1,LSTEP)
COVAL(FLOT,V1,FIXFLU,GRND)
      *EFFECT OF THE CONCENTRATION IN THE SOURCE TERM
PATCH(WEIGHT,PHASEM,1,NX,1,NY,1,1,1,LSTEP)
COVAL(WEIGHT,V1,FIXFLU,GRND1)
      *PRESSURE FIXED TO REFERENCE LEVEL AT NORTH OF CAVITY
      *FREE SURFACE
PATCH(REFF,NWALL,1,NX,NY,NY,1,1,1,LSTEP)
COVAL(REFF,P1,1.E-05,0.0)
COVAL(REFF,TEMP,1./PRNDTL(TEMP),25.0)
COVAL(REFF,TEMP,ONLYMS,SAME)
      GROUP 14. Downstream pressure for PARAB=.TRUE.
      GROUP 15. Termination of sweeps
LSWEEP=70
      GROUP 16. Termination of iterations
RESREF(P1) = 1.0E-08;RESREF(U1) = 1.0E-06
RESREF(V1) = 1.0E-06;RESREF(TEMP) = 1.0E-06
RESREF(C1) = 1.0E-06
      GROUP 17. Under-relaxation devices
RELAX(U1,FALSDT,0.1);RELAX(V1,FALSDT,0.1)
RELAX(TEMP,FALSDT,10.);RELAX(C1,FALSDT,.5)
      GROUP 18. Limits on variables or increments to them
      GROUP 19. Special calls from EARTH to GROUND
USEGRX = F
IG(5) = 2
IG(1) = NY/2
IG(2) = NY/2 + 6
IG(3) = NY/2 - 6
IG(4) = NY - 6
      GROUP 20. Preliminary print-out
ECHO=F
      GROUP 21. Print-out of variables
      GROUP 22. Spot-value print-out
IXMON=NX/2;IYMON=NY/2;NXPRIN=NX/10;NYPRIN=NY/10;NPLT=1
      GROUP 23. Field print-out and plot control
NTRFIN = 25
      *TEMPERATURE AND VELOCITY PROFILES
PATCH(PROF,PROFIL,1,NX,NY/2,NY/2,1,1,1,LSTEP)
PLOT(PROF,V1,0.0,0.0)
PLOT(PROF,TEMP,0.0,0.0)
      *TEMPERATURE CONTOURS
PATCH(CONT,CONTUR,1,NX,1,NY,1,1,1,LSTEP)
PLOT(CONT,TEMP,0.0,10.0)
PATCH(CONCEN,CONTUR,1,NX,1,NY,1,1,1,LSTEP)
PLOT(CONCEN,C1,0.0,20.0)
      GROUP 24. Dumps for restarts
RESTR(ALL)
SAVE = T
STOP

```

ARCHIVO GROUND.

FILE NAME GROUND.FTN-----22 April 87

THIS IS THE MAIN PROGRAM OF EARTH

(C) COPYRIGHT 1984, LAST REVISION 1987.

CONCENTRATION HEAT AND MOMENTUM LTD. ALL RIGHTS RESERVED.

This subroutine and the remainder of the PHOENICS code are proprietary software owned by Concentration Heat and Momentum Limited, 40 High Street, Wimbledon, London SW19 5AU, England.

PROGRAM MAIN

The following two COMMON's, which appear identically in the satellite MAIN program, allow up to 50 dependent variables to be solved for (or their storage spaces to be occupied by other variables, such as density). If a larger number is required, the 50's should be replaced, in the next 8 lines, by the required larger number; and the 200 in COMMON/F01/ should be replaced by 4 times the required number. Numbers less than 50 are not permitted.

```
COMMON/LGE4/L4(50)
1/LDB1/L5(50)/IDA1/I1(50)/IDA2/I2(50)/IDA3/I3(50)/IDA4/I4(50)
1/IDAS/I5(50)/IDA6/I6(50)/GI1/I7(50)/GI2/I8(50)/HDA1/IH1(50)
1/GH1/IH2(50)/RDA1/R1(50)/RDA2/R2(50)/RDA3/R3(50)/RDA4/R4(50)
1/RDAS/R5(50)/RDA6/R6(50)/RDA7/R7(50)/RDA8/R8(50)/RDA9/R9(50)
1/RDA10/R10(50)/RDA11/R11(50)
1/GR1/R12(50)/GR2/R13(50)/GR3/R14(50)/GR4/R15(50)
1/IP1P1/IP1(50)/HP1P2/IHP2(50)/RPIP1/RVAL(50)/LP1P1/LVAL(50)
1/IFPL/IPLO(50)/RFPL1/DRPRIN(50)/RFPL2/DRMAX(50)
1/RFPL3/DRMIN(50)
LOGICAL L1,L2,L3,L4,L5,DBGFIL,LVAL
CHARACTER*4 IH1,IH2,IHP2,NSDA
COMMON/F01/I9(200)
COMMON/DISC/DBGFIL
COMMON/LUNITS/LUNIT(60)
EXTERNAL WAYOUT
```

- 2 Set dimensions of data-for-GROUND arrays here. WARNING: the corresponding arrays in the MAIN program of the satellite (see SATLIT) must have the same dimensions.

```
COMMON/LGRND/LG(20)/IGRND/IG(20)/RGRND/RG(100)/CGRND/CG(10)
LOGICAL LG
CHARACTER*4 CG
```

- 3 Set dimensions of data-for-GREX2 arrays here. WARNING: the corresponding arrays in the MAIN program of the satellite (see SATLIT) must have the same dimensions.

```
COMMON/LSG/LSGD(20)/ISG/ISGD(20)/RS6/RSGD(100)/CSG/CSGD(10)
LOGICAL LSGD
CHARACTER*4 CSGD
```

- 4 Set dimension of patch-name array here. WARNING: the array NAMPAT in the MAIN program of the satellite must have the dimension.

```
COMMON/NPAT/NAMPAT(100)
CHARACTER*8 NAMPAT
```

CONFIG FILE name declaration.

```
COMMON/CNFG/CNFIG
CHARACTER CNFIG*48
```

The numbers in the next two statements (which must be identical) indicate how much computer memory is to be set aside for storing the main and auxiliary variables. The user may alter them if he wishes, to accord with the number of grid nodes and dependent variables he is concerned with.

```
COMMON F(93000)
NFDIM=93000
CMEX CEMX CMEX
DO 11111 I=11,NFDIM
```

```
11111 F(I)=1.0E+19
```

C 6 Logical-unit numbers and file names, not to be changed.

```
CALL CNFGZZ(2)
CALL EARSET(1)
CALL OPENFL(6)
```

C User may here change message transmitted to logical unit

C LUPK3

```
CALL WRIT40('GROUND STATION IS GROUND.FTN 11.10.86 ')
CALL MAIN1(NFDIM)
CALL WAYOUT(0)
```

```
STOP
END
```

C*****I*****

C#DIR**GROSTA

```
SUBROUTINE GROSTA
```

C (C) COPYRIGHT 1984, LAST REVISION 1987.

C CONCENTRATION HEAT AND MOMENTUM LTD. ALL RIGHTS RESERVED.

```
INCLUDE '/users/root1/chamusr/version14/earth/SATEAR'
```

```
INCLUDE '/users/root1/chamusr/version14/earth/GRDLOC'
```

```
INCLUDE '/users/root1/chamusr/version14/earth/GRDEAR'
```

C.... This subroutine directs control to the GROUNDS selected by

C the satellite settings of USEGRX, NAMGRD & USEGRD.

C Subroutine GREX2 contains options for fluid properties,

C turbulence models, wall functions, chemical reaction etc. It

C was introduced in version 2.0 of PHOENICS.

```
IF(USEGRX) CALL GREX2
```

C.... BTSTGR contains the sequences used in conjunction with

C the BFC test battery.

```
C IF(NAMGRD.EQ.'BTST') CALL BTSTGR
```

C.... TESTGR contains test battery sequences used in conjunction

C with the test-battery SAILIT subroutine, TESTST.

```
IF(NAMGRD.EQ.'TEST') CALL TESTGR
```

SPECGR is a generic "special" GROUND the name of which can be used by anyone for their own purposes. SFC1GR, SPC2GR and SPC3GR permit the user to attach his own library of special GROUNDS selected according to the prescription of NAMGRD.

```
IF(NAMGRD.EQ.'SPEC') CALL SPECGR
```

```
IF(NAMGRD.EQ.'SFC1') CALL SFC1GR
```

```
IF(NAMGRD.EQ.'SPC2') CALL SPC2GR
```

```
IF(NAMGRD.EQ.'SPC3') CALL SPC3GR
```

C.... The subroutine GROUND attached to the bottom of this file is

C an unallocated blank form into which the user can insert his


```

CALL MAKE(H1)
CALL MAKE(C1)
RETURN
1002 CONTINUE
C * CALCULATE CONSTANTS IN SOURCE TERMS
C * DUE AT TEMPERATURE:
  RG(10) = -RG(4)*RG(5)*RG(7)
  RG(11) =  RG(4)*RG(5)
C * DUE AT CONCENTRATION:
  RG(12) =  RG(4)*RG(1)*RG(2)
  RG(13) = -RG(4)*RG(1)
  RETURN
C*****
C--- GROUP 2. Transience; time-step specification
  2 CONTINUE
  RETURN
C*****
C--- GROUP 3. X-direction grid specification
  3 CONTINUE
  RETURN
C*****
C--- GROUP 4. Y-direction grid specification
  4 CONTINUE
  RETURN
C*****
C--- GROUP 5. Z-direction grid specification
  5 CONTINUE
  RETURN
C*****
C--- GROUP 6. Body-fitted coordinates or grid distortion
  6 CONTINUE
  RETURN
C*****
C * Make changes for this group only in group 19.
C--- GROUP 7. Variables stored, solved & named
C*****
C--- GROUP 8. Terms (in differential equations) & devices
  8 GO TO (81,82,83,84,85,86,87,88,89,810,811,812,813,814,815)
  1,15C
  81 CONTINUE
C * ----- SECTION 1 -----
C   For U1AD.LE.GRND--- phase 1 additional velocity (VELAD).
  RETURN
  82 CONTINUE
C * ----- SECTION 2 -----
C   For U2AD.LE.GRND--- phase 2 additional velocity (VELAD).
  RETURN
  83 CONTINUE
C * ----- SECTION 3 -----
C   For V1AD.LE.GRND--- phase 1 additional velocity (VELAD).
  RETURN
  84 CONTINUE
C * ----- SECTION 4 -----
C   For V2AD.LE.GRND--- phase 2 additional velocity (VELAD).
  RETURN
  85 CONTINUE
C * ----- SECTION 5 -----

```

```

C   For WIAD.LE.GRND--- phase 1 additional velocity (VELAD).
      RETURN
86  CONTINUE
C   * ----- SECTION 6 -----
C   For W2AD.LE.GRND--- phase 2 additional velocity (VELAD).
      RETURN
87  CONTINUE
C   * ----- SECTION 7 --- VOLUMETRIC SOURCE FOR GALA
      RETURN
88  CONTINUE
C   * ----- SECTION 8 --- CONVECTION FLUXES
      RETURN
89  CONTINUE
C   * ----- SECTION 9 --- DIFFUSION COEFFICIENTS
      RETURN
810 CONTINUE
C   * ----- SECTION 10 --- CONVECTION NEIGHBOURS
      RETURN
811 CONTINUE
C   * ----- SECTION 11 --- DIFFUSION NEIGHBOURS
      RETURN
812 CONTINUE
C   * ----- SECTION 12 --- LINEARISED SOURCES
      RETURN
813 CONTINUE
C   * ----- SECTION 13 --- CORRECTION COEFFICIENTS
      RETURN
814 CONTINUE
C   * ----- SECTION 14 --- USER'S SOLVER
      RETURN
815 CONTINUE
C   * ----- SECTION 15 --- CHANGE SOLUTION
      RETURN
C   * Make all other group-8 changes in group 19.
C*****
C--- GROUP 9. Properties of the medium (or media)
The sections in this group are arranged sequentially in their
order of calling from EARTH. Thus, as can be seen from below, the
temperature sections (10 and 11) precede the density sections (1
and 3); so, density formulae can refer to temperature stores
already set.
9  GO TO (91,92,93,94,95,96,97,98,99,900,901,902,903),ISC
C*****
900 CONTINUE
C   * ----- SECTION 10 -----
C   For TMP1.LE.GRND----- phase-1 temperature Index AUX(TEMP1)
      RETURN
901 CONTINUE
C   * ----- SECTION 11 -----
C   For TMP2.LE.GRND----- phase-2 temperature Index AUX(TEMP2)
      RETURN
902 CONTINUE
C   * ----- SECTION 12 -----
C   For EL1.LE.GRND----- phase-1 length scale Index: AUX(LEN1)
      RETURN
903 CONTINUE
C   * ----- SECTION 13 -----

```

```

C   For EL2.LE.GRND----- phase-2 length scale Index AUX(LEN2)
RETURN
91 CONTINUE
C   * ----- SECTION 1 -----
C   For RH01.LE.GRND--- density for phase 1 Index AUX(DEN1).
RETURN
92 CONTINUE
C   * ----- SECTION 2 -----
C   For DRH1DP.LE.GRND--- D(LN(DEN))/DP for phase 1 (D1DP).
RETURN
93 CONTINUE
C   * ----- SECTION 3 -----
C   For RH02.LE.GRND--- density for phase 2 Index AUX(DEN2).
RETURN
94 CONTINUE
C   * ----- SECTION 4 -----
C   For DRH2DP.LE.GRND--- D(LN(DEN))/DP for phase 2 (D2DP).
RETURN
95 CONTINUE
C   * ----- SECTION 5 -----
C   For ENUT.LE.GRND--- reference turbulent kinematic viscosity.
RETURN
96 CONTINUE
C   * ----- SECTION 6 -----
C   For ENUL.LE.GRND--- reference laminar kinematic viscosity.
RETURN
97 CONTINUE
C   * ----- SECTION 7 -----
C   For PRNDTL( ).LE.GRND--- laminar PRANDTL nos., or diffusivity.
RETURN
98 CONTINUE
C   * ----- SECTION 8 -----
C   For PHINT( ).LE.GRND--- interface value of first phase(FI1).
RETURN
99 CONTINUE
C   * ----- SECTION 9 -----
C   For PHINT( ).LE.GRND--- interface value of second phase(FI2)
RETURN
C*****
C--- GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties
10 GO TO (101,102,103,104),ISC
101 CONTINUE
C   * ----- SECTION 1 -----
C   For CFIPS.LE.GRND--- inter-phase friction coeff. AUX(INTFRC).
RETURN
102 CONTINUE
C   * ----- SECTION 2 -----
C   For CMDOT.EQ.GRND- inter-phase mass transfer Index AUX(INTMDT)
RETURN
103 CONTINUE
C   * ----- SECTION 3 -----
C   For CINT( ).EQ.GRND--- phase1-to-interface transfer
                                coefficients (COI1)
RETURN
104 CONTINUE
C   * ----- SECTION 4 -----
C   For CINT( ).EQ.GRND--- phase2-to-interface transfer

```

```

C                                coefficients (CO12)
RETURN
C*****
C--- GROUP 11. Initialization of variable or porosity fields
  11 CONTINUE
  RETURN
C*****
C--- GROUP 12. Convection and diffusion adjustments
  12 CONTINUE
  RETURN
C*****
C--- GROUP 13. Boundary conditions and special sources
  13 CONTINUE
    GO TO (130,131,132,133,134,135,136,137,138,139,1310,
          11311,1312,1313,1314,1315,1316,1317,1318,1319,1320,1321),ISC
  130 CONTINUE
C----- SECTION 1 ----- coefficient = GRND
  RETURN
  131 CONTINUE
C----- SECTION 2 ----- coefficient = GRND1
  RETURN
  132 CONTINUE
C----- SECTION 3 ----- coefficient = GRND2
  RETURN
  133 CONTINUE
C----- SECTION 4 ----- coefficient = GRND3
  RETURN
  134 CONTINUE
C----- SECTION 5 ----- coefficient = GRND4
  RETURN
  135 CONTINUE
C----- SECTION 6 ----- coefficient = GRND5
  RETURN
  136 CONTINUE
C----- SECTION 7 ----- coefficient = GRND6
  RETURN
  137 CONTINUE
C----- SECTION 8 ----- coefficient = GRND7
  RETURN
  138 CONTINUE
C----- SECTION 9 ----- coefficient = GRND8
  RETURN
  139 CONTINUE
C----- SECTION 10 ----- coefficient = GRND9
  RETURN
  1310 CONTINUE
C----- SECTION 11 ----- coefficient = GRND10
  RETURN
  1311 CONTINUE----- SECTION 12 -----
value = GRND
C * EFFECT OF TEMPERATURE IN BUOYANCY FORCE
  IF (INDVAR.EQ.V1)CALL FN2(VAL,14,RG(10),RG(11))
  RETURN
  1312 CONTINUE
C----- SECTION 13 ----- value = GRND1
C WEIGHT FORCE EFFECT
  IF (INDVAR.EQ.V1)CALL FN2(VAL,16,RG(12),RG(13))

```

```

      RETURN
1313 CONTINUE
C----- SECTION 14 ----- value = GRND2
      RETURN
1314 CONTINUE
C----- SECTION 15 ----- value = GRND3
      RETURN
1315 CONTINUE
C----- SECTION 16 ----- value = GRND4
      RETURN
1316 CONTINUE
C----- SECTION 17 ----- value = GRND5
      RETURN
1317 CONTINUE
C----- SECTION 18 ----- value = GRND6
      RETURN
1318 CONTINUE
C----- SECTION 19 ----- value = GRND7
      RETURN
1319 CONTINUE
C----- SECTION 20 ----- value = GRND8
      RETURN
1320 CONTINUE
C----- SECTION 21 ----- value = GRND9
      RETURN
1321 CONTINUE
C----- SECTION 22 ----- value = GRND10
*****
C--- GROUP 14. Downstream pressure for PARAB=.TRUE.
      14 CONTINUE
      RETURN
*****
C * Make changes for this group only in group 19.
C--- GROUP 15. Termination of sweeps
C--- GROUP 16. Termination of iterations
C--- GROUP 17. Under-relaxation devices
C--- GROUP 18. Limits on variables or increments to them
*****
C--- GROUP 19. Special calls to GROUND from EARTH
      19 GO TO (191,192,193,194,195,196,197,198),ISC
      191 CONTINUE
C * ----- SECTION 1 ---- START OF TIME STEP.
      RETURN
      192 CONTINUE
C * ----- SECTION 2 ---- START OF SWEEP.
      RETURN
      193 CONTINUE
C * ----- SECTION 3 ---- START OF IZ SLAB.
      RETURN
      194 CONTINUE
C * ----- SECTION 4 ---- START OF ITERATION.
      RETURN
      195 CONTINUE
C * ----- SECTION 5 ---- FINISH OF ITERATION.
      RETURN
      196 CONTINUE

```

```

C * ----- SECTION 6 ----- FINISH OF IZ SLAB.
C OBTENCION DE VALORES DE VELOCIDADES VERTICALES, TEMPERATURA
C Y CONCENTRACION PARA TODOS LOS NODOS EN X.
  IF (ISTEP .EQ. LSTEP .AND. ISWEEP .EQ. LSWEEP) THEN
    OPEN(21, FILE = 'CUEVAS')
    WRITE(21, *) "1"
    WRITE(21, *) "VELVER VS X"
    WRITE(21, *) "TEMPER VS X"
    WRITE(21, *) "CONCEN VS X"
    WRITE(21, *) NX
    WRITE(21, *) NY
    WRITE(21, *) IG(5), IG(1), IG(2), IG(3), IG(4)
    DO IY = 1, IG(5)
      DO IX = 1, NX
        CALL GETONE(XG2D, XB(IX), IG(IY), IX)
        CALL GETONE(V1, VPLOT, IG(IY), IX)
        CALL GETONE(H1, TPLOT, IG(IY), IX)
        CALL GETONE(C1, CPLOT, IG(IY), IX)
        WRITE(21, *) XB(IX)
        WRITE(21, *) VPLOT
        WRITE(21, *) TPLOT
        WRITE(21, *) CPLOT
      ENDDO
    WRITE(21, *) "-----OTRA CORRIDA"
    ENDDO
  ENDDIF
  IF (ISTEP .EQ. LSTEP .AND. ISWEEP .EQ. LSWEEP) THEN
    OPEN(21, FILE = 'CONCEN')
    WRITE(21, *) "1"
    WRITE(21, *) "CONCEN VS Y"
    WRITE(21, *) NX
    WRITE(21, *) NY
    WRITE(21, *) IG(5), IG(1), IG(2), IG(3), IG(4)
    DO IX = 1, IG(5)
      DO IY = 1, NY
        CALL GETONE(YG2D, YB(IY), IY, IG(IX))
        CALL GETONE(C1, CONCEN, IY, IG(IX))
        WRITE(21, *) YB(IY)
        WRITE(21, *) CONCEN
      ENDDO
    WRITE(21, *) "-----OTRA CORRIDA"
    ENDDO
  ENDDIF
  RETURN
197 CONTINUE
C * ----- SECTION 7 ----- FINISH OF SWEEP.
  RETURN
198 CONTINUE
C * ----- SECTION 8 ----- FINISH OF TIME STEP.
C SE OBTIENEN VALORES DEL MODULO DE VELOCIDADES, Y TEMPERATURAS
C EN FUNCION DEL TIEMPO PARA DISTINTOS PUNTOS DEL DOMINIO.
  OPEN(35, FILE = 'NUEVO', STATUS = 'OLD')
  IF (ISWEEP .EQ. LSWEEP) THEN
    IF (ISTEP .EQ. LSTEP) THEN
      DO WHILE (siempre)
        READ(35, '(X)', end=200)
      ENDDO
    
```

```

        ENDIF
200    DO IY = 6, IG(10)
        DO IX = 1, NX
            CALL GETONE(XG2D,XB(IX),IG(IY),IX)
            CALL GETONE(V1,VPL,IG(IY),IX)
            CALL GETONE(U1,UPL,IG(IY),IX)
            VP=VPL**2.0
            UP=UPL**2.0
            MO= VP + UP
            MODU=SQRT(MO)
            WRITE(35,*)XB(IX)
            WRITE(35,*)MODU
C        CALL GETONE(H1,TEM,IG(IY),IG(11))
        ENDDO
            WRITE(35,*)'OTRD PUNTO'
        ENDDO
            IF(ISTEP.EQ.LSTEP)THEN
                CLOSE(35)
            ENDIF
        ENDIF
        RETURN
C*****
C--- GROUP 20. Preliminary print-out
20 CONTINUE
        RETURN
C*****
C * Make changes for this group only in group 19.
C--- GROUP 21. Print-out of variables
C--- GROUP 22. Spot-value print-out
C*****
C--- GROUP 23. Field print-out and plot control
23 CONTINUE
        RETURN
C*****
C--- GROUP 24. Dumps for restarts
24 CONTINUE
        RETURN
        END
C*****
        SUBROUTINE SPECGR
C (C) COPYRIGHT 1984, LAST REVISION 1987.
C CONCENTRATION HEAT AND MOMENTUM LTD. ALL RIGHTS RESERVED.
        CALL WRIT40('DUMMY SUBROUTINE SPECGR CALLED.  ')
        CALL WRIT40('PLEASE ATTACH SPECGR OBJECT AT LINK.  ')
        CALL WAYOUT(2)
        RETURN
        END
C*****
        SUBROUTINE SPC1GR
C (C) COPYRIGHT 1984, LAST REVISION 1987.
C CONCENTRATION HEAT AND MOMENTUM LTD. ALL RIGHTS RESERVED.
        CALL WRIT40('DUMMY SUBROUTINE SPC1GR CALLED.  ')
        CALL WRIT40('PLEASE ATTACH SPC1GR OBJECT AT LINK.  ')
        CALL WAYOUT(2)
        RETURN
        END
C*****

```

SUBROUTINE SPC2GR

C (C) COPYRIGHT 1984, LAST REVISION 1987.
C CONCENTRATION HEAT AND MOMENTUM LTD. ALL RIGHTS RESERVED.
CALL WRIT40('DUMMY SUBROUTINE SPC2GR CALLED. '?)
CALL WRIT40('PLEASE ATTACH SPC2GR OBJECT AT LINK. '?)
CALL WAYOUT(2)
RETURN
END

SUBROUTINE SPC3GR

C (C) COPYRIGHT 1984, LAST REVISION 1987.
C CONCENTRATION HEAT AND MOMENTUM LTD. ALL RIGHTS RESERVED.
CALL WRIT40('DUMMY SUBROUTINE SPC3GR CALLED. '?)
CALL WRIT40('PLEASE ATTACH SPC3GR OBJECT AT LINK. '?)
CALL WAYOUT(2)
RETURN
END

SUBROUTINE QUIZ

C (C) COPYRIGHT 1984, LAST REVISION 1987.
C CONCENTRATION HEAT AND MOMENTUM LTD. ALL RIGHTS RESERVED.
RETURN
END

CODIGO FORTRAN (ECUACION DE DIFUSION DE LA ESPECIE QUIMICA pa)

PROGRAMA QUE CALCULA LA CONCENTRACION SALINA VS. EL TIEMPO EN UN SISTEMA CONSTITUIDO POR DOS REGIONES A DISTINTAS DENSIDADES. MEDIANTE LA SOLUCION ANALITICA DE LA ECUACION DE DIFUSION MASICA UNIDIMENSIONAL EN ESTADO TRANSITORIO. (MATHEMATICS OF DIFFUSION, CRANK, OXFORD, PAG. 58).

```
PROGRAM CANALI
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
DIMENSION C(50), TIME(50), X(50)
```

C ARCHIVOS DE DATOS DE ENTRADA Y DE RESULTADOS.

```
OPEN(5,FILE='CANALI.DAT',STATUS='OLD')
OPEN(6,FILE='CANALI.RES',STATUS='OLD')
```

C SE LEEN DATOS DE ENTRADA: DIFUSIVIDAD SALINA (PARA SEGUNDOS, MINUTOS, C HORAS O DIAS), CONTADOR DE LA SUMATORIA, INTERVALOS DE TIEMPO, LOS C VALORES DE LOS PUNTOS EN LA POSICION X.

```
READ(5,*)DIFU, N
READ(5,*)(TIME(I), I = 1,4)
READ(5,*)(X(I), I = 1, 21)
```

VALOR DE LAS CONSTANTES EN LA ECUACION:

```
H = 5.0
XTOP = 10.0
PHI = 3.141592654
CO = 1.0
B1 = H/XTOP
B2 = 2.0/PHI
B3 = PHI*H/XTOP
B4 = -DIFU*PHI*PHI/(XTOP*XTOP)
B5 = PHI/XTOP
```

CICLOS DE TIEMPO, POSICION Y SUMATORIA.

```
DO 10 ITEM = 1, 4
DO 20 ILONG = 1, 21
AA = 0.0
DU 30 ISUM = 1, N
A0 = (ISUM*B3)
A1 = SIN(A0)
A01 = ISUM*ISUM
A02 = TIME(ITEM)*A01
A03 = A02*B4
A2 = EXP(A03)
A4 = (ISUM*X(ILONG))
A3 = A4*B5
A5 = COS(A3)
A6 = (1.0/ISUM)
A04 = A1*A2*A5
A7 = A6*A04
AA = AA + A7
```

TERMINA LA SUMATORIA:

```
30 CONTINUE
A05 = AA*B2
```

```
      C(ILONG) = CO*(B1 + A05)
20    CONTINUE
C SE ESCRIBE EN EL ARCHIVO DE RESULTADOS EL TIEMPO Y EL VECTOR DE
C CONCENTRACIONES.
      WRITE(6,*) TIME(ITEM)
      WRITE(6,2) (C(I), I = 1, 21)
10    CONTINUE
2     FORMAT(21(F10.8,1X))
      STOP
      END
```

BIBLIOGRAFIA

- [1] U. Narusawa and Y. Suzukawa (1981),
Experimental study of double-diffusive cellular convection due to uniform lateral heat flux,
Journal of Fluid Mechanics,
Vol. 113, pag. 387.
- [2] C.E. Nielsen (1988),
Salinity gradient solar ponds,
Advances in Solar Energy.
- [3] C.E. Nielsen (1982),
Surface zone behavior in solar ponds,
ASME paper 82-WA/sol-25
- [4] C.E. Nielsen and J.R. Hill (1989),
Steady state analysis of the rising solar pond
Solar Energy,
Vol. 42, N. 5, pag. 365.
- [5] S.A. Shah, T.H. Short and R.P. Fynn,
Modeling and testing a salt gradient solar pond in northeast Ohio,
Solar Energy,
Vol. 27, N. 5, pag. 393.
- [6] H.H. Sisler, C.A. Vander Werf, and A.W. Davison (1963),
College Chemistry,
Macmillan Company, 2nd. edition,
New York, U.S.A.
- [7] J.C. Patterson and J. Imberger (1980),
Unsteady natural convection in a rectangular cavity
Journal of Fluid Mechanics
Vol. 100, Part 1, pag. 65.
- [8] J.D. Hall, A. Bejan and J.E. Chaddock (1988),
Transient natural convection in a rectangular enclosure with one heated side wall,
Int. Journal Heat and Fluid Flow,
Vol. 9, N. 4, pag. 396.
- [9] D.E. Cormack, L.G. Leal and J. Imberger (1974),
Natural Convection in a shallow cavity with differentially heated end walls. Asymptotic theory,
Journal of Fluid Mechanics,
Vol. 65, pag. 209.
- [10] D.E. Cormack, L.G. Leal and J.H. Seinfeld (1974).
Natural Convection in a shallow cavity with differentially heated end walls. Numerical solutions,
Journal of Fluid Mechanics,
Vol. 65, pag. 231.

- [11] J. Imberger (1974),
Natural convection in a shallow cavity with differentially heated end walls. Experimental results, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 65, pag. 247.
- [12] G.K. Batchelor (1954),
Heat transfer by free convection across a closed cavity between vertical boundaries at different temperature, Quarterly of Applied Mathematics, Vol. XII, pag. 209, England.
- [13] A.E. Gill (1966),
The boundary-layer regime for convection in a rectangular cavity, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 26, pag. 515.
- [14] J.S. Turner (1968),
The behavior of a stable salinity gradient heated from below, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 33, pag. 183.
- [15] T.R. Mancini, R.I. Loehhrke and R.D. Haberstroh (1974),
Heat and mass transfer in a layered natural convection, ASME Paper 74-HT-41.
- [16] S. Takao and V. Narusawa (1979),
An experimental study of heat and mass transfer across a diffusive interface, Int. Journal Heat and Mass Transfer, Vol. 28, pag. 1283.
- [17] G.D. Marmorino and D.R. Caldwell (1976),
Heat and salt transport through a diffusive thermohaline interface, Deep Sea Research, Vol. 23, pag. 59.
- [18] L.F. Chen and M.W. Skok (1974),
Cellular convection in a salinity gradient along a heated inclined wall, Int. Journal Mass Transfer, Vol. 17, pag. 51.
- [19] C.E. Mendenhall and M. Mason (1923),
The stratified subsidence of fine particles, Proceedings National Academic Science, Vol. 9, pag. 199.
- [20] S.A. Thorpe, P.K. Hutt and R. Soulsby (1969),
The effect of horizontal gradients on thermohaline convection, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 38, part 2, pag. 375.

- [21] C.F. Chen, D.G. Briggs and R.A. Wirtz (1970),
Stability of thermal convection in a salinity gradient due to lateral heating,
Journal of Heat and Mass Transfer,
Vol. 14, pag. 57.
- [22] A. Akbarzadeh and P. C. Manins (1988),
Convective layers generated by side walls in solar ponds,
Solar Energy,
Vol. 41, N. 6, pag. 521.
- [23] A. Akbarzadeh (1989),
Convective layers generated by side walls in solar ponds
Observations,
Solar Energy,
Vol. 43, N. 1, pag. 17.
- [24] K.A. Wirtz and C.S. Reddy (1976),
Heat and mass transport across diffusive interfaces bounded by turbulent convecting regions,
Int. Journal Heat and Mass Transfer,
Vol. 19, pag. 471.
- [25] I.G. Currie,
Fundamental Mechanics of Fluids,
McGraw Hill Book Company, Part I,
U.S.A.
- [26] R.B. Bird, W.E. Stewart, E. N. Lighfoot (1960),
Transport Phenomena,
Wiley International Edition
U.S.A.
- [27] D.B. Spalding and H.I. Rosen (1987),
The PHOENICS beginners guide,
CHAM TR/100.
- [28] S.V. Patankar (1986),
Numerical heat transfer and fluid flow,
Hemisphere Pub. Corporation,
New York.
- [29] S.V. Patankar and D. B. Spalding (1972)
A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer
in three dimensional parabolic flows.
Int. J. Heat Mass Transfer
Vol. 15, Pag. 1787.
- [30] J. Crank (1967),
The mathematics of diffusion,
Oxford at the Clarendon Press,
Fourth edition.
- [31] J. H. Van Sant,
Conduction Heat Transfer Solutions,
Ed. Lawrence Livermore National Laboratory,
VCKL, 52863, Rev. 1.

[32] Saline Water Conversion Engineering Data Book (1971),
Office of Saline Water, 2nd. edition,
United States Department of the Interior.

LISTA DE VARIABLES

LATINOS

VARIABLE	UNIDADES	DESCRIPCION
A		Razón de aspecto (altura/longitud)
A_c	$[m^2]$	Area
C_p	$[W s^{\circ}C^{-1}Kg^{-1}]$	Capacidad calorífica
D_{AB}	$[m^2Kg^{-1}]$	Coefficiente de difusion salina
E		Entalpía
g	$[m s^{-2}]$	Fuerza de gravedad
h^*	$[m]$	Tamaño vertical de las celdas convectivas
h	$[m]$	Altura del dominio del sistema en estudio
H	$[m]$	Distancia en la dirección de la fuerza de cuerpo en la definición del número de Rayleigh.
k	$[W^{\circ}C^{-1}m^{-1}]$	Conductividad térmica
L	$[m]$	Longitud del dominio del sistema en estudio
Le		Número de Lewis
\dot{n}_i	$[Kg s^{-1}]$	Flujo másico de la especie química i
P	$[Kg m^{-1}s^{-2}]$	Presión del sistema
P^*		Presión adimensional
Pr		Número de Prandtl
P^*		Campo de presiones
Q	$[W]$	Flujo de calor
Rc		Número de Rayleigh salino
Rt		Número de Rayleigh térmico
Rtc		Número de Rayleigh térmico crítico
Rtm		Número de Rayleigh térmico modificado
$S\phi$		Término fuente para la variable escalar ϕ
t	$[s]$	Tiempo dimensional

t'		Tiempo adimensional
T	[°C]	Temperatura
T'		Temperatura adimensional
T_0		Temperatura inicial del fluido
T_1	[°C]	Temperatura de la pared caliente
T_2	[°C]	Temperatura de la superficie del fluido
T^*		Cociente de temperaturas T_1/T_0
u	[m s ⁻¹]	Velocidad en la dirección x
u'		Velocidad adimensional en la dirección x
u^*		campo de velocidades
v	[m s ⁻¹]	Velocidad en la dirección y
v'		Velocidad adimensional en la dirección y
\bar{v}	[m s ⁻¹]	Velocidad promedio local del fluido
\bar{v}_A	[m s ⁻¹]	Velocidad local de la especie química A
\bar{v}_B	[m s ⁻¹]	Velocidad local de la especie química B
\bar{v}_i	[m s ⁻¹]	Velocidad local de la especie química i
x	[m]	Magnitud espacial
x'		Distancia adimensional en dirección x
y	[m]	Magnitud espacial
y'		Distancia adimensional en dirección y

GRIEGOS

VARIABLE	UNIDADES	DESCRIPCION
α	[m ² s ⁻¹]	Difusividad térmica
β_c	[m ³ kg ⁻¹]	Coefficiente de salinidad
β_T	[°C]	Coefficiente de expansión térmica
ΔT	[°C]	Gradiente de temperatura
$\Delta \rho_A$	[Kg m ⁻³]	Gradiente de concentración
ϕ		Variable escalar

ν	$[m^2 s^{-1}]$	Viscosidad cinemática
θ	[grados]	Angulo de la pared inclinada respecto a la vertical
μ	$[Kg m^{-1} s^{-1}]$	Viscosidad dinámica
τ_d	[s]	Tiempo característico del fenómeno puramente difusivo
τ_f	[s]	Tiempo característico en la toma de fotografías
τ_S	[s]	Tiempo característico de relajación referente a la concentración
τ_T	[s]	Tiempo característico de relajación referente a la temperatura.
τ_V	[s]	Tiempo característico de relajación referente a la velocidad
ρ	$[Kg m^{-3}]$	Densidad
ρ_A	$[Kg m^{-3}]$	Concentración de la especie química A (NaCl)
ρ_{A0}	$[Kg m^{-3}]$	Concentración de referencia de la especie química A
ρ_{A1}	$[Kg m^{-3}]$	Concentración máxima del sistema
ρ_{A2}	$[Kg m^{-3}]$	Concentración mínima del sistema
ρ_B	$[Kg m^{-3}]$	Concentración de la especie química B (H ₂ O)
ρ_0	$[Kg m^{-3}]$	Densidad de referencia
θ	$[m^{-1}]$	$-\beta c(d\rho_A/dy)$ magnitud que define el número de Rayleigh modificado

SUBINIDICES

- A Especie química A (NaCl)
- B Especie química B (H₂O)

SUPERINDICES

- * Denota variable adimensional