



UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

**ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LA
TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL RECEPTOR DE UN
SISTEMA TERMOSOLAR DE TORRE CENTRAL**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

Doctor en Ciencias de la Ingeniería

PRESENTA:

Armando Piña Ortiz

HERMOSILLO, SONORA

FEBRERO 2015

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

UNIVERSIDAD DE SONORA

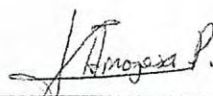
APROBACION DEL JURADO

de la tesis presentada por:

M.C. Armando Piña Ortiz

Esta tesis ha sido revisada por cada uno de los miembros del Jurado y por mayoría de votos la han encontrado satisfactoria.

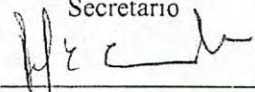
10/02/15
Fecha


Dr. Jesús Fernando Hinojosa Palafox
Presidente

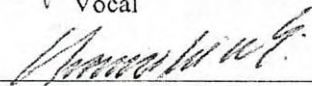
10/02/15
Fecha


Dr. Manuel Pérez Tello
Secretario

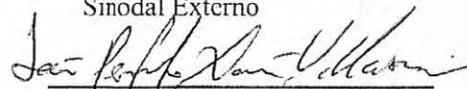
10/02/15
Fecha


Dr. Rafael Enrique Cabanillas López
Vocal

10/02/15
Fecha


Dr. Camilo Arancibia Bulnes
Sinodal Externo

10/02/15
Fecha


Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor
Sinodal Externo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química

AUTORIZACION DEL EXÁMEN DE GRADO

Febrero 12 de 2015.

Por la presente se hace constar que el estudiante: **ARMANDO PIÑA ORTIZ**, ha cumplido satisfactoriamente con los requisitos académicos correspondientes para la realización del Examen de grado del programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería.

DR. JESUS FERNANDO HINOJOSA PALAFOX
COORDINADOR
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados numéricos y experimentales de la transferencia de calor en el receptor de un sistema termosolar de torre central. La cavidad tiene una dimensión de 1 m^3 donde una de las paredes recibe un flujo de calor constante y uniforme, mientras que la pared opuesta está abierta al ambiente. El resto de las paredes se suponen adiabáticas. En el interior de la cavidad se encuentra aire, considerando sus propiedades termofísicas como función de la temperatura. Se utilizó el software de dinámica de fluidos computacional Fluent 6.3 para la obtención de resultados numéricos y se construyeron dos prototipos para el estudio experimental.

Se generó información experimental sobre el comportamiento de la temperatura del fluido dentro de la cavidad obteniendo perfiles de temperatura a diferentes alturas y profundidades dentro de la misma. Se utilizó dos configuraciones de cavidad: una con paredes de aluminio pulido y otra con paredes pintadas con pintura negro mate. Se utilizaron tres valores de flujo de calor en la pared calentada: 75, 150 y 300 W, así como siete inclinaciones correspondientes a $+45^\circ$, $+30^\circ$, $+15^\circ$, 0° , -15° , -30° y -45° . En la comparación numérico-experimental se evaluaron 6 modelos de turbulencia ($sk\epsilon_t$, rke_t , $rngk\epsilon_t$, rsm , $sk\omega$ y $sstk\omega$) y se utilizó el modelo radiativo de ordenada discreta. Encontrándose que la menor diferencia promedio porcentual de temperatura fue con el modelo rke_t y la mayor con el modelo $sk\omega$.

Para el receptor se consideraron 3 valores de temperatura en la pared caliente: 600, 800 y 1000 K con inclinaciones de $+15^\circ$ y $+30^\circ$ con valores de emisividad de 0.05 y 0.9 encontrándose que la contribución del intercambio radiativo va desde un 20% con una emisividad de 0.05 hasta un 91% con una emisividad de 0.9. El cambio en la inclinación del receptor modifica los patrones de temperatura, magnitud de velocidad y vectores, así como la disminución de la transferencia de calor cuando se pasa de $+15^\circ$ a $+30^\circ$. Por último, se presenta la propuesta y resultados numéricos de un prototipo de receptor-calorímetro para la evaluación térmica de heliostatos del Campo Experimental de Torre Central.

ABSTRACT

In this work the numerical and experimental results of the heat transfer in the receiver of a central tower thermosolar system are presented. The cavity has 1 m^3 dimension where one of the walls receive a constant and uniform heat flux while the facing wall is open to the milieu. The remaining walls are thermally insulated. The thermal fluid is air considering its thermophysical properties as a temperature function. The numerical results were obtained with the computational fluid dynamics software Fluent 6.3 and for the experimental part two prototypes were built.

Experimental data for the fluid temperature within the cavity was obtained by placing temperature profiles at different heights and depths within. Two configurations were used: one with polished aluminum walls and other with black matte painted walls. Three heat flux on the heated walls were applied: 75, 150 and 300 W and seven inclination values ($+45^\circ$, $+30^\circ$, $+15^\circ$, 0° , -15° , -30° and -45°). Six turbulence models were used for the numerical-experimental comparison ($sk\epsilon_t$, rke_t , $rngk\epsilon_t$, rsm , $sk\omega$ and $sstk\omega$) and the discrete ordinate model for the radiative transfer. Finding that the lowest percentage average difference was with the rke_t model and the highest with $sk\omega$ model.

For the receiver three temperature values were considered: 600, 800 and 1000 K with inclination values of $+15^\circ$ and $+30^\circ$ and emmisivity values of 0.05 and 0.9. Finding that the radiative transfer mechanism goes from 20% with a 0.05 emmisivity till a 91% with a 0.9 emmisivity value. The change in the inclination angle of the receiver modifies the temperature, velocity magnitude and vectors behavior; also, the heat transfer decreases when the inclination changes from $+15^\circ$ to $+30^\circ$. Finally, a proposal and numerical results of a receiver-calorimeter prototype for heliostat thermal evaluation of the Central Tower Experimental Field is presented.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	xii
NOMENCLATURA	xv
AGRADECIMIENTOS	xvii
 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	 1
1.1 Introducción.	1
1.2 Objetivos.	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Estudios numéricos.	6
2.2 Estudios experimentales.	15
2.3 Estudios numérico-experimentales.	17
3. METODOLOGÍA	21
3.1 Descripción del problema físico.	21
3.2 Descripción del modelo matemático.	21
3.2.1 Modelo matemático.	21
3.2.1.1 Modelos de turbulencia.	25
3.2.1.2 Método de solución de la ecuación de transferencia radiativa.	27
3.2.2 Parámetros de transferencia de calor.	28
3.3 Condiciones frontera.	29
3.4 Solución del modelo matemático.	29
3.5 Análisis de independencia de malla.	33
3.6 Sistema experimental.	33
3.6.1 Cavidad experimental.	33

3.6.2 Paredes aisladas térmicamente.	37
3.6.3 Sistema de suministro de calor.	37
3.6.4 Sistema de sensores de temperatura y sistema de adquisición de datos.	37
3.7 Procedimiento y tratamiento de datos experimentales.	39
3.7.1 Procedimiento experimental	39
3.7.2 Tratamiento de datos experimentales.	40
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1 Resultados experimentales en cavidad abierta.	45
4.1.1 Cavidad abierta con paredes cubiertas con aluminio pulido ($\epsilon=0.05$).	45
4.1.2 Cavidad abierta con paredes pintadas de negro ($\epsilon=0.9$).	54
4.2 Comparación de resultados numéricos obtenidos con diferentes modelos de turbulencia y los datos experimentales.	66
4.2.1 Cavidad abierta con paredes cubiertas con aluminio pulido.	66
4.2.2 Cavidad abierta con paredes pintadas de negro.	82
4.3 Estudio numérico de la transferencia de calor en el receptor de cavidad para un sistema termosolar de torre central.	106
4.3.1 Efecto de la geometría.	106
4.3.2 Efecto del ángulo de inclinación.	111
4.3.3 Efecto de la radiación térmica.	134
4.4 Análisis de la transferencia de calor en un receptor-calorímetro para el campo experimental de torre central de la Universidad de Sonora.	158
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	165
5.1 Conclusiones.	165
5.2 Recomendaciones.	166
 BILIOGRAFÍA	 168
ANEXOS	173

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
3.1	Esquema del modelo físico de la cavidad de estudio (Caso -15°).	22
3.2	Cavidad experimental con paredes de aluminio pulido.	35
3.3	Cavidad experimental con paredes pintadas de negro.	36
3.4	Sistema de suministro de calor.	38
3.5	Comportamiento de un perfil de temperatura en el tiempo.	41
3.6	Intervalo de tiempo seleccionado en este estudio para el análisis de los datos experimentales.	42
3.7	Comportamiento de la temperatura ambiente.	43
3.8	Comportamiento de las temperaturas medidas en la pared caliente.	44
4.1	Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes cubiertas de aluminio pulido, en $y=0.5\text{m}$, $z=0.25\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	46
4.2	Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes cubiertas de aluminio pulido, en $y=0.5\text{m}$, $z=0.5\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	48
4.3	Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes cubiertas de aluminio pulido, en $y=0.75\text{m}$, $z=0.5\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	49
4.4	Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes cubiertas de aluminio pulido, en $y=0.9\text{m}$, $z=0.5\text{m}$: $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	51
4.5	Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes cubiertas de aluminio pulido, en $y=0.25\text{m}$, $z=0.5\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	52
4.6	Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes cubiertas de aluminio pulido, en $y=0.5\text{m}$, $z=0.75\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	53
4.7	Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $y=1.0$, $z=0.5\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	55
4.8	Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $y=0$, $z=0.5\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	56
4.9	Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $y=0.75\text{m}$, $z=0.5\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	57
4.10	Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $y=0.5\text{m}$, $z=0.5\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	59

4.11	Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $y=0.5\text{m}$, $z=0.75\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	60
4.12	Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $y=0.5\text{m}$, $z=0.25\text{m}$: $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	61
4.13	Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $y=0.25\text{m}$, $z=0.5\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	63
4.14	Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $x=0.5\text{m}$, $z=0.5\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	64
4.15	Diferentes geometrías de receptor de cavidad consideradas en el presente estudio.	109
4.16	Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=3.73 \times 10^{12}$, en planos: a) $z=0.5\text{m}$, b) $z=1\text{ m}$, c) $z=1.5\text{ m}$.	112
4.17	Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$, ($Ra=2.21 \times 10^{11}$ y emisividad de 0.05) en planos: a) $z=0.5\text{m}$, b) $z=1\text{ m}$, c) $z=1.5\text{ m}$.	113
4.18	Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$, ($Ra=2.21 \times 10^{11}$ y emisividad de 0.05) en planos: a) $z=0.5\text{ m}$, b) $z=1\text{ m}$, c) $z=1.5\text{ m}$.	114
4.19	Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=2.21 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5\text{ m}$, b) $z=1\text{ m}$, c) $z=1.5\text{ m}$.	116
4.20	Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=2.21 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5\text{ m}$, b) $z=1\text{ m}$, c) $z=1.5\text{ m}$.	117
4.21	Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=2.21 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5\text{ m}$, b) $z=1\text{ m}$, c) $z=1.5\text{ m}$.	118
4.22	Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=3.69 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5\text{ m}$, b) $z=1\text{ m}$, c) $z=1.5\text{ m}$.	120
4.23	Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=3.69 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5\text{ m}$, b) $z=1\text{ m}$, c) $z=1.5\text{ m}$.	121
4.24	Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=3.69 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5\text{ m}$, b) $z=1\text{ m}$, c) $z=1.5\text{ m}$.	122
4.25	Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=3.69 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5\text{ m}$, b) $z=1\text{ m}$, c) $z=1.5\text{ m}$.	123
4.26	Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=3.69 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5\text{ m}$, b) $z=1\text{ m}$, c) $z=1.5\text{ m}$.	125
4.27	Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=3.69 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5\text{ m}$, b) $z=1\text{ m}$, c) $z=1.5\text{ m}$.	126

4.28	Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	127
4.29	Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	128
4.30	Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	130
4.31	Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	131
4.32	Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	132
4.33	Vectores de velocidad (m/s) en receptor inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	133
4.34	Contornos de temperatura (K) en receptor con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+15^\circ$ ($Ra=2.21 \times 10^{11}$), en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	135
4.35	Contornos de temperatura (K) en receptor con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+30^\circ$ ($Ra=2.21 \times 10^{11}$), en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	136
4.36	Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinada a $+15^\circ$ ($Ra=2.21 \times 10^{11}$), en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	137
4.37	Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+30^\circ$ ($Ra=2.21 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	138
4.38	Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+15^\circ$ ($Ra=2.21 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	140
4.39	Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+30^\circ$ ($Ra=2.21 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	141
4.40	Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+15^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	142
4.41	Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado $+30^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	143
4.42	Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado $+15^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$), en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	145
4.43	Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado $+30^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	146

147	Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+15^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	4.44
148	Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+30^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	4.45
150	Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+15^\circ$ ($Ra=5.17 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	4.46
151	Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+30^\circ$ ($Ra=5.17 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	4.47
152	Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+15^\circ$ ($Ra=5.17 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	4.48
153	Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+30^\circ$ ($Ra=5.17 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	4.49
155	Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+15^\circ$ ($Ra=5.17 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	4.50
156	Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+30^\circ$ ($Ra=5.17 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.	4.51
160	Prototipo de receptor-calorímetro.	4.52
163	Contornos de temperatura (K) en receptor-calorímetro con $v=1$ m/s, a) prototipo completo, b) plano en $z=0.625$ m, c) plano en $y=0.625$ m.	4.53
164	Capacidad de remoción de calor en función de heliostatos del receptor-calorímetro.	4.54

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
1.1	Proyectos de torre central en la actualidad.	5
3.1	Polinomios para la variación de las propiedades termofísicas del fluido con la temperatura.	23
3.2	Condiciones de frontera hidrodinámicas.	30
3.3	Condiciones de frontera térmicas.	31
3.4	Análisis de independencia de malla.	34
4.1	Resultados experimentales del coeficiente de transferencia de calor ($W/m^2 K$).	65
4.2	Resultados experimentales del número de Nusselt.	65
4.3	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.25m$, $z=0.5m$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.	67
4.4	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5m$, $z=0.25m$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.	68
4.5	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5m$, $z=0.5m$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.	70
4.6	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5m$, $z=0.75m$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.	71
4.7	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.75m$, $z=0.5m$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.	73
4.8	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.9m$, $z=0.5m$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.	74
4.9	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.25m$, $z=0.5m$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	76
4.10	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5m$, $z=0.25m$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	77
4.11	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5m$, $z=0.5m$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	79
4.12	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5m$, $z=0.75m$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	80

4.13	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.75\text{m}$, $z=0.5\text{m}$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	81
4.14	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.9\text{m}$, $z=0.5\text{m}$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	83
4.15	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo (perfil $y=0.75\text{m}$, $z=0.5\text{m}$) y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.	84
4.16	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5\text{m}$, $z=0.5\text{m}$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.	86
4.17	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo (perfil $y=0.5\text{m}$, $z=0.75\text{m}$) y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.	87
4.18	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5\text{m}$, $z=0.25\text{m}$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.	89
4.19	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.25\text{m}$, $z=0.5\text{m}$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.	90
4.20	Comparación de temperatura (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.0$, $z=0.5\text{m}$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.	92
4.21	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo ($y=1.0$, $z=0.5\text{m}$) y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.	93
4.22	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $x=0.5\text{m}$, $z=0.5\text{m}$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.	94
4.23	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.75\text{m}$, $z=0.5\text{m}$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	96
4.24	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5\text{m}$, $z=0.5\text{m}$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	97
4.25	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5\text{m}$, $z=0.75\text{m}$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	99
4.26	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5\text{m}$, $z=0.25\text{m}$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	100

4.27	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.25m$, $z=0.5m$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	101
4.28	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.0$, $z=0.5m$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	103
4.29	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo (perfil $y=1.0$, $z=0.5m$) y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	104
4.30	Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo (perfil $x=0.5m$, $z=0.5m$) y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.	105
4.31	Comparación de resultados del número de Nusselt en cavidad abierta con paredes de aluminio pulido.	107
4.32	Comparación de resultados del número de Nusselt en cavidad abierta con paredes pintadas de negro.	108
4.33	Independencia de malla para los receptores de cavidad	110
4.34	Coefficiente de transferencia de calor ($W/m^2 K$) en receptor de cavidad.	157
4.35	Número de Nusselt en receptor de cavidad.	157
4.36	Porcentaje de contribución del intercambio radiativo en el receptor de cavidad.	159
4.37	Independencia de malla para receptor-calorímetro.	159
4.38	Resultados de transferencia de calor en receptor-calorímetro.	162

NOMENCLATURA

A = corriente eléctrica (A).

C_p = calor específico a presión constante (J/kg K).

g = aceleración de la gravedad (m/s^2).

I = intensidad de radiación (W/m^2).

I_b = intensidad de cuerpo negro (W/m^2).

k = energía cinética turbulenta (J/kg).

k_a = absorptividad (adimensional).

L = longitud de la cavidad (m).

Nu = número de Nusselt total promedio (adimensional).

q'' = flux de calor (W/m^2).

r = vector posición (m).

Ra = número de Rayleigh = $g\beta q L^4 / \alpha \nu \lambda$ (adimensional).

s = longitud de trayectoria geométrica.

$\hat{s}$ = vector unitario en una dirección dada.

T_h = temperatura promedio de la pared caliente (K).

T_∞ = temperatura ambiente (K).

t = tiempo (s).

V = tensión eléctrica (V).

v = velocidad (m/s).

x, y, z = sistema coordenado (m).

Símbolos griegos.

α = difusividad térmica (m^2/s).

β = coeficiente de expansión térmica ($1/K$).

β_e = coeficiente de extinción (adimensional).

σ_s = coeficiente de dispersión (adimensional).

ε_t = disipación de la energía cinética turbulenta (J/kg).

λ = conductividad térmica (W/m K).

ε = emisividad (adimensional).

μ_t = viscosidad turbulenta (kg/m s).

ν = viscosidad cinemática (m²/s).

Ω = ángulo sólido (sr)

ρ = densidad (kg/m³).

ρ_r = reflectividad (adimensional).

ω = razón de disipación específica de turbulencia (adimensional).

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, amigos y compañeros por sus consejos y apoyo en todo momento.

A mi director de tesis, Dr. Jesús Fernando Hinojosa Palafox, por su amistad y guía que me ha brindado.

A mis sinodales: Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor, Dr. Rafael Enrique Cabanillas López, Dr. Manuel Pérez Tello y Dr. Camilo Arancibia Bulnes, por sus valiosas observaciones y sugerencias en este trabajo de Tesis.

A la Universidad de Sonora y al Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química, por darme la oportunidad de desarrollarme en esta Institución.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado para el desarrollo del Posgrado.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción.

El consumo de energía es inherente a la vida, en particular al ser humano. Una de las características de los organismos más sencillos hasta los más complejos es la necesidad de consumir energía para llevar a cabo sus procesos metabólicos. Pero en lo que al ser humano se refiere, esta necesidad se ha extrapolado más allá de esta característica debido al desarrollo tecnológico que se ha incrementado desde el inicio de la revolución industrial. De acuerdo a la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) el consumo energético mundial ha aumentado en un 73% desde 1973 a la fecha. Así también, para el año 2011 las fuentes primarias de energía en el mundo recayeron en fuentes no renovables en un 86.7% siendo el petróleo el principal contribuyente con un 31.5%, seguido por el carbón con un 28.8 %, gas natural con un 21.3% y la nucleenergía con un 5.1% [54].

La República Mexicana no es la excepción en cuanto a la dependencia energética en fuentes no renovables se refiere, ya que de acuerdo al Balance Nacional de Energía 2012, las fuentes primarias de energía fueron los hidrocarburos con un 88.5 %, carbón con un 3.6 % la nucleenergía con un 1.01 % [3].

Lo anterior lleva consigo una huella ambiental inequívoca que está ocasionando cambios en el sistema climático mundial ya que la atmósfera y los océanos se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el volumen del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado. Como ejemplo los datos de la superficie terrestre y oceánica muestran un calentamiento de 0.85 °C, durante el periodo 1880-2012 [40]. Este trastorno al clima traerá consigo un desequilibrio en los ciclos naturales que provocará sequías, inundaciones, extinción de flora y fauna y en última instancia mermará a la especie humana, que en aras de mejorar su calidad de vida ha venido dañando de forma impactante el sistema medio ambiental que le ha propiciado su existencia.

Una vía para reducir la dependencia de los energéticos no renovables y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero es la utilización de fuentes renovables de energía, como lo es la energía solar. Los sistemas solares fototérmicos utilizan dispositivos de concentración solar para convertir la energía solar en energía térmica a alta temperatura, sus principales configuraciones son: (a) sistemas de enfoque en línea que concentran la luz solar en tubos colocados a lo través de un canal parabólico reflectivo, (b) sistemas de disco o plato de enfoque puntual que utilizan platos o discos parabólicos para reflejar la luz en un receptor en el foco del disco y (c) sistemas de receptor central (SRC) de enfoque puntual (torre central) que utilizan grandes campos de reflectores que siguen la luz solar (heliostato) para concentrarla en un receptor colocado en la parte superior de la torre.

De todas la tecnologías, la que está teniendo mayor auge es la de sistemas de receptor central, entre otros factores debido a: (a) ofrece mayor eficiencia en los sistemas de conversión de potencia al alcanzar altas temperaturas (de hasta 1000 °C), (b) fácil integración en plantas actuales de producción de energía eléctrica para la operación híbrida en una amplia variedad de opciones, (c) potencial para la generación de energía eléctrica con factores anuales de capacidad altos a través del almacenamiento térmico [46]. En la Tabla 1.1 se aprecian los proyectos actuales bajo desarrollo, construcción y operación de plantas termosolares de producción de potencia eléctrica que van desde 1 MW en el país asiático de China hasta los 500 MW en los Estados Unidos.

Un elemento clave de los SRC es el receptor, el cual es el intercambiador de calor donde la radiación solar es absorbida y transformada en energía térmica aprovechable. Las principales configuraciones de receptores solares son los receptores volumétricos donde la radiación solar incide en un arreglo de material poroso donde el paso del fluido de trabajo es forzado; el receptor externo donde a un material absorbedor se le incide la radiación solar para calentar el fluido de trabajo que discurre por el interior del mismo y el receptor de cavidad donde la radiación solar pasa a través de una abertura en una estructura tipo caja antes de incidir en la superficie absorbidora [46].

Por otro lado, con el propósito de crear infraestructura de investigación para el desarrollo en México de la tecnología termosolar de torre central, el 28 de octubre de 2011 se inaugura el Campo de Pruebas de Helióstatos (CPH) construido en el campo experimental del Departamento de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora. Esta instalación es una de las tres con las que cuenta el Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar (LACYQS), cofinanciado por el CONACYT, la UNAM y la Universidad de Sonora.

El CPH es el primero en su tipo en México y Latinoamérica, que permitirá desarrollar investigación y desarrollo tecnológico para aprovechar la abundante radiación solar del Noroeste de México como alternativa para la generación de energía eléctrica y producción de calor de proceso. En una primera etapa se busca realizar investigación aplicada y desarrollo tecnológico dirigido a los heliostatos (estructura, sistema de seguimiento, sistema de control, caracterización, etc.). En la segunda etapa del proyecto el campo está siendo ampliado y se desarrollará un receptor térmico, pasando a denominarse Campo Experimental de Torre Central.

Como parte del proceso de desarrollo de receptores térmicos se considera de mucha relevancia poder analizar detalladamente la transferencia de calor en receptores de cavidad, para su diseño óptimo y de esta manera aumentar el aprovechamiento de la energía solar colectada por los heliostatos en el Campo Experimental de Torre Central (CEToC). En el presente proyecto de investigación doctoral se plantea estudiar detalladamente la transferencia de en el receptor de cavidad de un sistema termosolar de torre central.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estudiar numérica y experimentalmente la transferencia de calor en el receptor de cavidad de un sistema termosolar de torre central.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Estudiar numéricamente la transferencia de calor en el receptor de cavidad de un sistema termosolar de torre central mediante la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).
2. Evaluar experimentalmente la transferencia de calor en el receptor de cavidad.
3. Analizar la transferencia de calor en un receptor-calorímetro para el campo experimental de torre central de la Universidad de Sonora.

Tabla 1.1 Proyectos de torre central en la actualidad.

Nombre	Localización	Estado	Cap. (MW)	Fluido de trabajo	Almacenamiento
Demostrativas					
Dahan P.P.	Beijing, China	Operación (desde 2012)	1	Agua/Vapor	Si (1h)
Greenway CSP	Mersin, Turquía	Operación (desde 2012)	1.4	Agua	Si (4 MW/h)
Jülich ST	Jülich, Alemania	Operación (desde 2008)	1.5	Aire	Si (1.5 h)
Acme S.T.	Bikaner, India	Operación (desde 2013)	2.5	Agua/Vapor	No
L. Cargelligo	L.G., Australia	Operación (desde 2011)	3	Agua/Vapor	Si
Sierra S.T.	California, EUA	Operación (desde 2009)	5	Agua	No
Comerciales					
PS10	Sevilla, España	Operación (desde 2007)	11	Agua	Si (1h)
PS20	Sevilla, España	Operación (desde 2009)	20	Agua	Si (1 h)
Gemasolar	F. de A., España	Operación (desde 2011)	20	Sales Fundidas	Si (15 h)
Khi Solar One	Upington, Sudafrica	Construcción (desde 2014)	50	Agua/Vapor	Si (2 h)
PS Cerro dominador	Calama, Chile	Construcción (a partir de 2018)	110	Sales fundidas	Si (17.5 h)
Crescent Dunes SEP	Tonopah, Nevada	Construcción (desde 2013)	110	Sales Fundidas	Si (10 h)
Ashalim Thermal SPS	Ashalim, Israel	Construcción (arranque en 2017)	121	Agua/Vapor	No
Rice SEP	Rice, EUA	Desarrollo (a partir de 2016)	150	Sales fundidas	Si
Ivanpah	Primm, EUA	Operación (desde 2013)	377	Agua	No
Palen SEGS	Desert Center, EUA	Desarrollo (a partir 2016)	500	-----	No

Fuente: SOLARPACES 2014

CAPÍTULO 2

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En la literatura especializada hay varios estudios sobre la transferencia de calor en cavidades abiertas (1-57). Algunos enfocados a receptores de cavidad de sistemas termosolares de torre central. A continuación se presentan un breve resumen de los estudios teóricos, experimentales y teóricos-experimentales reportados en la literatura.

2.1 Estudios numéricos.

Sönke *et al.* [47] presentaron un método analítico para calcular la transferencia de calor radiativa semi-gris que ocurre dentro de un recinto rodeado de paredes difusas; este modelo fue usado para encontrar una distribución óptima de las emisividades para las longitudes de onda de la radiación térmica y solar que abarcan al receptor de cavidad de torre central. El modelo mostró que una manera eficiente de reducir las pérdidas de calor de la cavidad es minimizar las temperaturas de las paredes pasivas a través de la manipulación de las propiedades radiativas de las superficies. Encontrando que para las superficies absorbedoras con una absorptividad de 0.95 y una emisividad en la banda térmica de 0.1 y superficies pasivas reflectivas con emisividades de 0.1 en todo el espectro, la eficiencia térmica del receptor puede aumentar un 0.7% comparado con uno con paredes con emisividad de 0.95.

Yu *et al.* [55] modelaron un campo de heliostatos para simular la distribución de flux solar en las superficies internas de un receptor de cavidad utilizando del método de trazado de rayos de Monte Carlo. Dicho campo consiste de 100 heliostatos de 10 x 10 m c/u en donde el receptor está localizado a 78 m de una torre de 118 m. Los resultados mostraron que la energía solar concentrada se distribuye mayormente en las paredes traseras y laterales del receptor, por lo que se debe prestar atención al tipo de materiales para retirar el calor de estas paredes.

Clausing [10] presentó un método analítico para la determinación de las pérdidas de calor por convección en receptores solares de cavidad. Las predicciones analíticas de estas pérdidas

normalmente se habían tomado como imposibles de realizar; las predicciones experimentales son difíciles debido a los grandes tamaños y altas temperaturas que se ven involucradas por lo que las leyes involucradas son difíciles de satisfacer. Los resultados mostraron que la influencia del viento en condiciones normales de operación (un viento de 8 m/s ó menos) es mínima. La orientación de la abertura es crítica ya que influye fuertemente no solo el flujo flotante sino también la altura de la zona convectiva dentro de la cavidad.

Zoschak *et al.* [57] se enfocaron en aspectos del diseño y operación de un receptor de cavidad para la generación de vapor en una planta termosolar de torre central. Para el diseño geométrico se utilizó un procedimiento iterativo junto con el desarrollo del arreglo de heliostatos en el campo colector. El tamaño óptimo, la forma, y la orientación de las superficies absorbedoras de energía, así como el diseño de la abertura son dependientes del arreglo de los heliostatos y de patrón proyectado de vectores radiativos. Así también, una cavidad mayor al tamaño óptimo resulta en un pico y flujos de calor más bajos, pero llevaría a una distribución un poco más uniforme de la energía sobre las paredes activas. El diseño térmico-hidráulico y estructural del receptor, se probó en un amplio rango de condiciones de operación, alcanzándose una temperatura máxima para el vapor producido de 528°C y un flujo máximo de vapor de 1.41 kg/s. Con este trabajo se confirmó un diseño operativo para una planta termosolar de torre central con orientación del receptor al norte, y por último, el generador de vapor fue estable, fácilmente controlable y altamente sensible sobre un amplio rango de condiciones de arranque y potencias transientes de entrada. Es de suma importancia minimizar las pérdidas de calor durante la operación y los periodos de pausa y/o días nublados, estas pueden ser por radiación y convección a través de la abertura y conducción a través de las paredes de la cavidad; para un flujo de entrada de 40.5 MW se tuvo una pérdida de calor total del 6.3%.

Muftuoglu y Bilgen [34] presentaron un trabajo donde se estudia la transferencia de calor en cavidades rectangulares inclinadas, las cuales podrían ser usadas como receptores de radiación solar concentrada. Se consideró despreciable la transferencia de calor por radiación. Una de las paredes fue expuesta a radiación solar concentrada y la otra mantenida a temperatura constante. Los parámetros considerados fueron el número de Rayleigh (de 10^3 a

10^{12}), la relación de aspecto de la cavidad ($A=L/H$) de 0.5 a 2 y un ángulo de inclinación de 30 a 90°. Fue un estudio en 2D y se utilizó la aproximación de Boussinesq. Los resultados mostraron que para un ángulo de inclinación de 90° la transferencia de calor está dominada por la conducción para números de Rayleigh bajos. La transferencia de calor es una función del número de Rayleigh y una función lineal con la relación de aspecto. También se concluye que la transferencia de calor es mejor cuando el receptor está en posición horizontal y esta se ve reducida mínimamente con el aumento del ángulo con respecto a la horizontal.

Yu *et al.* [56] presentaron un trabajo donde se modelan las partes clave de un sistema termosolar de torre central: el sistema colector y el receptor. Los dos sistemas fueron acoplados y simulados en la plataforma STAR-90. El sistema colector consiste de 100 heliostatos de 100 m² cada uno, con un receptor localizado a 78 m de una torre de 118 m de altura. Cada heliostato consiste de 64 espejos montados en un poste de 6.6 m. El receptor de cavidad tiene una abertura de 5 x 5 m, el cual cuenta con una capacidad de 8 ton/h de vapor sobrecalentado a 400 °C con una presión de 2.8 MPa. Con el fin de analizar la variación de la densidad del flujo de calor en toda el área, las superficies internas de la cavidad fueron divididas en varias áreas. Los resultados mostraron que la densidad de flujo de calor en la superficie trasera del receptor es la mayor durante todo el día, mientras que las superficies laterales alcanzan casi la mitad del pico de calor correspondiente a la pared trasera. Así también, la superficie superior no recibe prácticamente nada de radiación solar por lo que es innecesario colocar paneles en dicha superficie.

Wang *et al.* [51] llevaron a cabo una simulación para obtener la distribución del flujo de calor de un receptor de cavidad usando el método de Monte Carlo, el cual consiste de seis caras laterales más el techo y el piso y una abertura de 2 x 2 m en la cara frontal. Las tres caras internas de la cavidad que corresponden a los paneles absorbedoras están formadas por una serie de tubos soldados. Las otras dos caras laterales están aisladas térmicamente lo que disminuye su capacidad de absorber energía. Los resultados numéricos mostraron que la distribución del flujo de calor fue similar a los datos experimentales obtenidos en la planta CESA-I. También, cuando la radiación de las paredes fue considerada, la distribución del flujo de calor se mejoró, por lo que el 49.1% de la energía total incidente fue absorbida por

los paneles centrales, el 47.02% por los paneles laterales y el 3.88% restante fue desbordado por la abertura. Con respecto al pico de flujo de calor, el valor fue de 1196.4 kW/m^2 en el centro de los paneles.

Montes *et al.* [31] presentaron un nuevo diseño termofluidodinámico para un receptor solar, el cual optimiza la transferencia de calor en la superficie absorbadora. Este diseño cuenta con las siguientes características: el patrón de flujo del fluido está diseñado acorde a la simetría del flujo de radiación, por lo que se alcanzan temperaturas más uniformes en la salida del receptor; las irreversibilidades en la transferencia de calor son reducidas al circular el fluido de una zona de baja temperatura hacia una zona de alta temperatura en la superficie del absorbedor; la anchura de cada paso está ajustada al gradiente de radiación solar, para obtener menores diferencias de temperaturas entre los tubos laterales en cada paso; y los requerimientos de enfriamiento están asegurados en términos de ajustar la velocidad de flujo del fluido por tubo tomando en cuenta la caída de presión. Este esquema fue aplicado a un caso particular de un receptor de sales fundidas, además, la configuración propuesta es recomendable para otros diseños de receptores y fluidos de trabajo.

Fang *et al.* [14] presentaron un método combinado para la evaluación del desempeño térmico de un receptor solar de cavidad. Este método acopla el método de Monte Carlo, la correlación de transferencia de calor para flujo en dos fases, y el cálculo de pérdidas de calor al ambiente. Por lo que se puede calcular el flujo de calor dentro de la cavidad, la temperatura superficial de los tubos y las pérdidas de calor del receptor solar mediante una solución iterativa. Con este método se simula el desempeño térmico de un receptor de cavidad productor de vapor saturado, en diferentes condiciones de viento. La temperatura máxima de las tuberías fue de 150°C mayor a la temperatura de saturación del agua, la cual se presenta en la parte superior de los paneles absorbadores. Al cambiar el ángulo del viento o la velocidad, se afecta la velocidad del aire dentro del receptor. La velocidad del aire alcanza un valor máximo cuando el viento viene de lado al receptor. La pérdida de calor máxima se presenta también durante esta condición de viento (de lado).

Khalsa y Ho [23] presentaron un método que permite a los códigos de CFD centrarse solamente en el dominio de un receptor de cavidad al transformar con precisión las distribuciones radiativas calculadas en la abertura del receptor en condiciones de frontera radiativas para las simulaciones. Este método permite a la radiación incidente interactuar con medios participantes, como pueden ser los receptores de cavidad con partículas sólidas descendentes. Las condiciones de frontera radiativas del modelo pueden considerar características complejas del haz de rayos causados por forma solar, oscurecimiento, errores de pendiente, forma de faceta de heliostato, múltiples heliostatos, aberraciones fuera de eje, efectos atmosféricos, bloqueo, sombreado y puntos focales múltiples.

Fang *et al.* [13] presentaron la investigación numérica del desempeño en el arranque de un receptor solar de cavidad productor de vapor saturado, consistente de un prisma de seis lados con las paredes inferior y superior inclinados. Se consideró el aumento de la temperatura durante el arranque como la condición principal calculando la tasa de evaporación, curvas de aumento de temperatura del agua y la energía neta requerida para el arranque. Se estableció un modelo computacional para el proceso de arranque para calcular la energía requerida en la abertura durante todo el proceso. Se logró aumentar la eficiencia durante el arranque, la cual es muy baja en esta etapa debido a las pérdidas convectivas. La velocidad del aire alrededor de la cavidad puede afectar en forma importante durante el proceso de arranque.

Tu *et al.* [48] reportaron un estudio sobre el desempeño térmico de un receptor solar de cavidad productor de vapor saturado, con diferentes profundidades geométricas utilizando un modelo computacional combinado. Se obtuvieron las tendencias de variación de la eficiencia térmica y las pérdidas de calor, así como también, la energía neta absorbida por los paneles absorbedores, el flujo másico del vapor generado, las distribuciones de flujo de calor y las temperaturas de la pared de los paneles. Los resultados mostraron que existe un pico en la eficiencia térmica cuando el receptor es reducido y la distribución del flujo de calor en los paneles absorbedores se comporta más uniforme. Finalmente, se encontró una profundidad confiable para el receptor estudiado en este trabajo.

Lin y Xin [28] investigaron numéricamente la convección mixta turbulenta y la radiación superficial en una cavidad cuadrada abierta con una pared calentada. El fluido fue aire y el modelo de turbulencia empleado fue el $k-\epsilon$. Los cálculos se realizaron para números de Grashof (Gr) de hasta 10^{10} y el número de Richardson (Ri) cubre un rango de 4 hasta 45×10^3 . Mostrando que en un amplio rango del número de Richardson, los efectos de la radiación en la transferencia de calor y flujo de fluido en la cavidad es significativo, no deben ser ignorados y se vuelven mayores con el aumento del Ri and Gr .

Sobin *et al.* [46] analizaron la factibilidad de utilizar tecnología aeroespacial en productores de vapor compactos y cámaras de combustión de cohetes para su utilización como receptores en centrales solares. Probando un generador que reducía el tamaño de la caldera en una relación de 300:1. Discutiendo la fabricación del receptor central en cuanto a detalles de diseño y materiales aplicables.

Penot [36] presentó cálculos numéricos con código propio para la convección natural en una cavidad abierta isotérmica en dos dimensiones examinando el efecto de la variación del número de Grashof y la inclinación. Observó dos tipos de movimiento inestable en la cavidad. Uno es térmico por naturaleza y ocurre para $Gr > 10^5$ en una cavidad vertical. El otro, es de origen hidrodinámico y está presente cuando la cavidad está viendo hacia arriba. Además, todas las soluciones tienden a estado estable cuando la cavidad es inclinada hacia abajo.

Hinojosa *et al.* [16] realizaron la investigación numérica del número de Nusselt para la convección natural y radiación térmica superficial en una cavidad cuadrada abierta inclinada. La pared opuesta a la abertura se mantuvo a 500 K mientras que la temperatura del ambiente que interactúa con la abertura estuvo a 300 K, las paredes restantes se mantuvieron aisladas. El número de Rayleigh abarcaba de 10^4 a 10^7 y los ángulos de inclinación desde 0° hasta 180° . Los resultados mostraron que el Nusselt aumenta con el incremento del Rayleigh, excepto el Nusselt convectivo para el caso de 180° , donde se mantuvo prácticamente constante. El número de Nusselt cambia sustancialmente con el ángulo de inclinación de la cavidad, mientras que el Nusselt radiativo es insensible a este cambio en la cavidad.

Chan y Tien [7] llevaron a cabo un estudio numérico en dos dimensiones, de la convección natural laminar en estado estable en una cavidad abierta alargada. Reportaron isotermas y líneas de corriente en una cavidad con relación de aspecto de 0.143, para números de Rayleigh hasta 10^6 usando propiedades constantes y la aproximación de Boussinesq. Los resultados mostraron que los patrones del flujo saliente y los resultados de transferencia de calor son influenciados fuertemente por las características de la cavidad calentada.

Balaji y Venkateshan [2] llevaron a cabo una investigación numérica de la interacción de la radiación superficial con la convección natural en una cavidad cuadrada usando el método de volumen finito con una malla no uniforme de 21×21 . El modelo es generalizado ya que toma en consideración diferentes emisividades para las paredes laterales, superior e inferior. Los factores de vista son evaluados por el método de las cuerdas cruzadas de Hottel. El modelo arrojó información de la importancia de la radiación aun a bajas emisividades y niveles de temperatura y proporcionó información sobre las discrepancias entre las correlaciones teóricas y experimentales.

Balaji y Venkateshan [1] desarrollaron correlaciones para la convección natural y la radiación superficial en una cavidad cuadrada con aire como fluido térmico. Los cálculos se realizaron para $10^3 \leq Gr \leq 10^6$, con emisividades que iban desde 0 hasta 1. Teniendo como resultado que la radiación superficial reduce la transferencia de calor por convección a lo largo de la cavidad y al mismo tiempo contribuye con la transferencia de calor total por efecto de la transferencia de calor radiante a través de la cavidad.

Nouanegue *et al.* [35] realizaron una investigación numérica de la transferencia de calor conjugada por convección, conducción y radiación en cavidades abiertas. Las ecuaciones de conservación fueron resueltas por el método de diferencias finitas y volumen de control. Los parámetros fueron: número de Rayleigh de 10^9 a 10^{12} , número de Prandtl de 0.7, relación de aspecto de la cavidad entre 0.4 y 1, espesor de la pared de 0.02 a 0.08, relación de conductividad entre 1 y 50 y emisividad de la superficie de 0 a 1.

Encontraron que la radiación superficial afecta los patrones de temperatura y flujo considerablemente. La radiación superficial disminuye los flujos calor por convección natural y conducción mientras que el flujo radiativo aumenta con el aumento de la emisividad. El número de Nusselt combinado y el flujo volumétrico aumenta con el aumento de la emisividad, particularmente a números de Rayleigh altos.

Sezai y Mohamad [42] llevaron a cabo una simulación en tres dimensiones de la convección natural en cavidades con una abertura, donde el flujo fue inducido por el calentamiento de una pared mientras que el resto se consideraron aisladas térmicamente. El número de Rayleigh fue de 10^3 a 10^6 mientras que el número de Prandtl se consideró constante a 0.71. La relación de aspecto en dirección lateral se varió de 0.125 hasta 2. Se encontró que la transferencia de calor predicha por un modelo de dos dimensiones fue concordante con un modelo de tres dimensiones para un número de $Ra < 10^5$. Para $Ra > 10^5$ el efecto de las paredes laterales aumenta requiriendo el uso de un modelo en tres dimensiones.

Hinojosa y Cervantes [17] simularon numéricamente la convección natural transiente y en estado estable, en una cavidad isotérmica cubica abierta en régimen laminar y utilizaron la aproximación de Boussinesq. Las ecuaciones de conservación en variables primitivas fueron resueltas usando el método de volumen finito y el algoritmo SIMPLEC. Los términos advectivos se aproximaron con el esquema SMART y los términos difusivos se aproximaron usando el esquema de diferencias centradas. Se obtuvieron resultados para números de Rayleigh entre 10^4 a 10^7 . El modelo numérico predijo inestabilidades en el flujo y oscilaciones en el número de Nusselt para números de Rayleigh altos.

Wang *et al.* [52] resolvieron numéricamente la transferencia de calor combinada por convección natural, conducción y radiación superficial en una cavidad abierta utilizando el algoritmo SIMPLE con el esquema QUICK. El flujo en estado transiente y la transferencia de calor exhiben oscilaciones periódicas o comportamiento caótico debido a la formación de plumas térmicas en la pared del fondo. Si la formación de plumas térmicas es periódica, las oscilaciones del flujo y la transferencia de calor también son periódicas.

Así también, la conducción de calor de la pared conductiva aumenta la transferencia de calor total, pero este efecto se acerca al límite cuando la relaciones de conductividad exceden el valor de 100.

Prakash *et al.* [38] analizaron numéricamente la transferencia de calor por convección natural, en cavidades abiertas de tres formas geométricas diferentes: cúbicas, esféricas y hemisféricas, con la misma área de transferencia de calor. Usaron el software comercial Fluent en un modelo de tres dimensiones con paredes isotérmicas a 100, 200 y 300°C. Se estudió el efecto de la inclinación y las relaciones de aspecto de las cavidades. Como resultado se obtuvo que las pérdidas de calor disminuyen con el aumento de la inclinación, siendo la mayor a 0° y la menor a 90°. La geometría que tuvo la mayor pérdida de calor fue la hemisférica. Se obtuvo una correlación que incluye la forma de la cavidad, el número de Rayleigh, el ángulo de inclinación y la relación de aspecto de la abertura.

Juarez *et al.* [21] llevaron a cabo un estudio numérico de la transferencia de calor en una cavidad abierta considerando la convección natural y las propiedades del fluido como función de la temperatura. Las ecuaciones de continuidad, momento y energía en términos de variables primitivas fueron resueltas utilizando el método de volumen finito. El número de Rayleigh abarcó de 10^4 hasta 10^7 . La diferencia de temperatura entre la pared caliente y el fluido se varió entre 10 y 500 K. Los resultados mostraron que el espesor de la capa límite hidrodinámica en la vecindad de la pared caliente aumenta a medida que la temperatura adimensional aumenta de 0.03 hasta 1.6.

LeQuere *et al.* [25] realizaron un estudio numérico para la convección natural con flujo en geometrías rectangulares. Se usó una técnica de segundo orden para interpolar las diferencias finitas de los términos convectivos en las ecuaciones de transporte, con el fin de reducir errores por difusión numérica. Se variaron parámetros como la relación de aspecto de la cavidad, el ángulo de inclinación, la temperatura interior de la pared y el número de Grashof. Se obtuvieron campos de flujo y temperatura dentro de la cavidad determinados principalmente por el coeficiente local de transferencia de calor.

Polat y Bilgen [37] estudiaron numéricamente la transferencia de calor conjugada en cavidades abiertas, donde una pared delgada viendo hacia la abertura recibe un flujo de calor constante, las paredes restantes se consideraron aisladas y la abertura está en contacto con un fluido a temperatura y presión constante. Los parámetros considerados fueron: el número de Rayleigh de 10^6 a 10^{12} , la relación de conductividad de 1 a 60, la relación de aspecto entre 1 y 0.125, el espesor adimensional de la pared de 0.05 a 0.20 y el ángulo de inclinación entre 0° y 45° . Se reportaron isotermas, líneas de corriente y se calculó la transferencia de calor. Se encontró que el número de Nusselt aumenta con el número de Rayleigh y disminuye con la relación de conductividades.

2.2 Estudios experimentales.

Boehm [5] presentó una revisión de las pérdidas convectivas de receptores solares. En esta revisión se consideró a estudios efectuados en receptores ya instalados y en simulaciones de geometrías que se aproximan a receptores de torre central. Se encontró que los datos basados en el desempeño no tienen buena correspondencia con los datos basados en las pérdidas de calor. Los efectos de la convección forzada y mixta no estaban bien establecidos en la información disponible al momento.

Hess y Henze [15] llevaron a cabo una investigación de la convección natural en cavidades abiertas. Se obtuvieron perfiles de velocidad detallados usando velocimetría de laser Doppler para números de Rayleigh entre 3×10^{10} y 2×10^{11} , correspondientes a una condición de frontera de temperatura elevada. Los patrones de flujo obtenidos mostraron características de 2 y 3 dimensiones; además, se reportaron patrones de capa límite en transición a la turbulencia, así como patrones de flujo en el interior y exterior de la cavidad.

Leibfried y Ortjohann [27] caracterizaron térmicamente receptores para sistemas termosolares de disco parabólico y torre central. Examinaron dos tipos de geometría: una cavidad esférica y una semiesférica, ambas con un diámetro interno de 400 mm. El diámetro de la abertura varió entre 60 y 195 mm y la temperatura de la pared entre 573 y 873 K. Se reportaron pérdidas de calor basados en la inclinación de la cavidad, radio de la abertura; y

se reportaron dos algoritmos que permitían el cálculo de las pérdidas por convección en receptores viendo hacia arriba.

McMordie [29] estudió experimentalmente las pérdidas por convección en un receptor de cavidad, en donde se usó sales fundidas como fluido de trabajo y estaba diseñado para absorber 5 MW de energía. El receptor fue montado en el centro de pruebas de receptores de laboratorios SANDIA en Albuquerque NM, E.U.A. La superficie absorbidora era de 5.6 x 3.5 m compuesta de 288 tubos de acero Incoloy 800 con un diámetro de 0.75 plg. Se encontró que las pérdidas por convección fueron de 1.43%, lo que indica que las pérdidas en este tipo de geometrías son pocas, además, el efecto del viento tiene un efecto despreciable en el cálculo de las pérdidas radiativas.

Kim *et al.* [22] llevaron a cabo un estudio experimental sobre las pérdidas de calor de un receptor de cavidad para un sistema termosolar de torre central. Llevaron a cabo experimentos en un túnel de viento de sección cruzada de 2x2m, en cuatro diferentes tipos de cavidad, temperaturas de la superficie absorbidora de 300, 400 y 500 °C, velocidades de viento entre 2 y 8 m/s y cuatro ángulos de inclinación. Las pérdidas de calor fueron obtenidas midiendo el calor suministrado con el fin de hacer constante la temperatura de la superficie absorbidora. Se obtuvieron los efectos de la convección natural en las pérdidas totales y las características de estas pérdidas.

Upton y Watt [49] llevaron a cabo un estudio experimental de la convección natural transiente, en un recinto inclinado rectangular donde llevaron a cabo mediciones simultaneas de temperatura y velocidad en dos dimensiones, utilizando interferometría electrónica de multicanal y velocimetría por imagen de partícula digital. Las condiciones de frontera transientes fueron impuestas al calentar y enfriar súbita y simultáneamente dos paredes opuestas. La evolución del flujo hacia el estado estable fue determinada para un fluido con un número de Prandtl de 6.38, un número de Rayleigh de 1.5×10^5 , una relación de aspecto de 1 y ángulos de inclinación de $\pi/4$, $\pi/2$ y $3\pi/4$.

Chakroun *et al.* [8] realizaron mediciones experimentales del coeficiente de transferencia de calor en una cavidad inclinada abierta y semiabierta. Todas las paredes se consideraron adiabáticas excepto la pared opuesta a la abertura la cual fue calentada con flujo de calor constante. Se usó aire en la cavidad y los experimentos fueron llevados a cabo a un número de Grashof de 5.5×10^8 . El ángulo de inclinación se varió entre -90° y $+90^\circ$ en incrementos de 15° . Las relaciones de aspecto de las cavidades y de la abertura fueron de 1, 0.5 y 0.25. Los resultados obtenidos fueron presentados en términos del número de Nusselt promedio.

Chan *et al.* [7] investigaron experimentalmente la convección natural en una cavidad abierta en 2 dimensiones usando la técnica de velocimetría laser Doppler, la cavidad es rectangular con una pared vertical calentada viendo hacia a la abertura y dos paredes horizontales aisladas. Se usó agua como fluido y los números de Rayleigh iban de 10^6 a 10^7 bajo condiciones de flujo laminar. Los perfiles de temperatura y velocidad mostraron el efecto de la frontera abierta el cual consiste de dos partes: el fluido saliente de la cavidad que mostraba características de la misma y el fluido entrante influenciado por las condiciones exteriores.

Chakroun y Elsayed [8] investigaron experimentalmente la convección natural en una cavidad cuadrada, inclinada y parcialmente abierta. Los ángulos de inclinación iban desde 0° hasta 180° , con un número de Grashof modificado para un flujo de calor constante de 5.5×10^8 . Todas las superficies se consideraron adiabáticas excepto la pared opuesta a la abertura, a la cual se le aplicó un flujo de calor constante, encontrándose que el número de Nusselt presenta gran diferencia teniendo la abertura en la pared inferior o superior donde la última transfiere mayor calor a los alrededores que la inferior.

2.3 Estudios numérico-experimentales.

Skok *et al.* [45] llevaron a cabo un estudio sobre el flujo inducido por fuerzas de flotación en una cavidad abierta. Realizaron una simulación numérica en dos dimensiones para predecir el patrón de flujo en la cavidad. La experimentación verificó la validez de la predicción del número de Nusselt.

Se utilizó una cavidad rectangular inmersa en un tanque con agua y glicerol como fluido térmico. La observación del flujo en el prototipo experimental mostró concordancia cualitativa con el patrón de flujo predicho, aunque los efectos en tres dimensiones no pudieron ser predichos por la simulación.

Showole y Tarasuk [44] presentaron un estudio numérico-experimental de la transferencia de calor por convección laminar en dos dimensiones en cavidades abiertas horizontales e inclinadas de sección rectangular. Usaron un interferómetro Mach-Zehnder y la técnica numérica de diferencias finitas. Los resultados mostraron zonas de flujo recirculante en la cavidad a $Ra \geq 10^5$. La inclinación de la cavidad induce el arrastre del flujo, causando separación del mismo en las esquinas inferiores y reincorporación del mismo en las esquinas superiores de la abertura. Para todos los números de Rayleigh, la inclinación de la cavidad comparada con la horizontal causa un muy pequeño aumento de la transferencia de calor.

Dehghan y Bhenia [11] resolvieron numéricamente la transferencia de calor por convección natural, conducción y radiación en una cavidad abierta en dos dimensiones. La comparación de los coeficientes de transferencia de calor locales para el análisis conjugado y la inclusión de la radiación revela que la consideración de la última tiene un efecto insignificante en el desempeño de la fuente de calor. Sin embargo, los resultados de la comparación numérico-experimental muestran que las predicciones de flujo y campos de temperatura son fuertemente dependientes en la consideración de la transferencia de calor en el caso numérico.

Montiel *et al.* [32] presentaron un estudio sobre la convección natural con radiación térmica superficial en una cavidad abierta de un lado. Se resolvieron las ecuaciones de transporte en variables primitivas utilizando el método de volumen finito y el algoritmo SIMPLEC. En el modelo numérico de dos dimensiones se consideraron las variables termofísicas del fluido como función de la temperatura en un caso y se utilizó la aproximación de Boussinesq en otro caso con el fin comparar los resultados. El número de Rayleigh abarcaba de 10^4 a 10^6 . La diferencia de temperatura entre la pared caliente y la temperatura de bulto del fluido varía entre 10 y 400 K.

Los resultados experimentales incluyen la medición de la temperatura del aire dentro de la cavidad comparándose con los teóricos y la desviación promedio entre ambos fue de 3% cuando se utilizó propiedades termofísicas variables y 5.4% cuando se utilizó la aproximación de Boussinesq.

Humphrey y To [19] analizaron numérica y experimentalmente la convección natural y mixta en régimen turbulento en una cavidad calentada en estado permanente en dos dimensiones. Obtuvieron buena concordancia en las comparaciones de temperatura y velocidad para la convección natural, pero el coeficiente de difusión de remolino y la energía cinética turbulenta son subpredicados cuando el ángulo de inclinación es 0° . Como resultado, aun cuando las tendencias relativas en la transferencia de calor como función de la relación de aspecto y la inclinación están en buena concordancia con las mediciones experimentales, los números de Nusselt difieren significativamente en su valor absoluto.

La revisión bibliográfica indica que hay pocos trabajos enfocados a estudiar la transferencia de calor por convección natural turbulenta y radiación superficial en cavidades abiertas. Así mismo, entre los trabajos numéricos que analicen el comportamiento con variación de la inclinación de la cavidad tenemos que Muftuoglu y Bilgen [34], Penot [36], Hinojosa *et al.* [16] y Polat y Bilgen [37] consideraron un modelo de dos dimensiones, Prakash *et al.* [38] consideraron la inclinación en un modelo de tres dimensiones en régimen laminar. Los trabajos que consideraron régimen turbulento tenemos el de Lin y Xin [28] y Hess y Henze [15]. Entre los estudios numéricos de tres dimensiones tenemos el de Lee y Lin [25] y el de Sezai y Mohamad [42] solo que en estos estudios consideraron régimen laminar. De los trabajos experimentales que consideren la inclinación tenemos el de Leibfried y Ortjohann [26], Kim *et al.* [22], Upton y Watt [49], Chakroun y Elsayed [8], todos en régimen laminar. De los trabajos teórico-experimentales que consideraron la inclinación se encuentra Showole y Tarasuk [44] en régimen laminar; Humphrey y To [19] realizaron un estudio en régimen turbulento, aunque los resultados teóricos los obtuvieron en dos dimensiones.

De lo anterior, se concluye que no existe un trabajo teórico-experimental de la convección natural turbulenta y la radiación térmica superficial, que estudie el efecto del ángulo de inclinación y la variación del número de Rayleigh con un modelo teórico de tres dimensiones.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Descripción del problema físico.

En este trabajo se estudia la transferencia de calor en una cavidad cúbica abierta (Figura 3.1) con una dimensión de arista de 1 m. La pared vertical izquierda recibe un flux de calor constante y uniforme (q''), mientras que la pared vertical derecha está abierta al ambiente a una temperatura constante. Las paredes restantes se consideraron adiabáticas. El fluido térmico es aire y el flujo es considerado como turbulento. Con el fin de analizar la radiación térmica superficial en un caso se consideró un valor de emisividad de $\varepsilon=0.05$ (paredes cubiertas con película de aluminio pulido) y en el otro un valor de $\varepsilon=0.9$ (paredes pintadas de color negro mate). El eje de rotación para la inclinación de la cavidad fue el eje z y el ángulo fue medido a partir de la parte positiva del eje x . Se consideraron las siguientes inclinaciones de la cavidad: $+15$, $+30$, $+45$, 0 , -15 , -30 y -45° . El cubo en líneas punteadas corresponde al dominio extendido utilizado para la simulación numérica.

3.2 Descripción del modelo matemático.

3.2.1 Modelo matemático.

En este estudio se realizaron las siguientes consideraciones para establecer el modelo matemático: estado permanente, fluido incompresible y Newtoniano, flujo de fluido en régimen turbulento, propiedades termofísicas del fluido como función de la temperatura de acuerdo a un polinomio de octavo grado (véase Tabla 3.1), disipación viscosa despreciable, el medio no participa en la transferencia de calor radiativa y las paredes se comportan como emisores difusos.

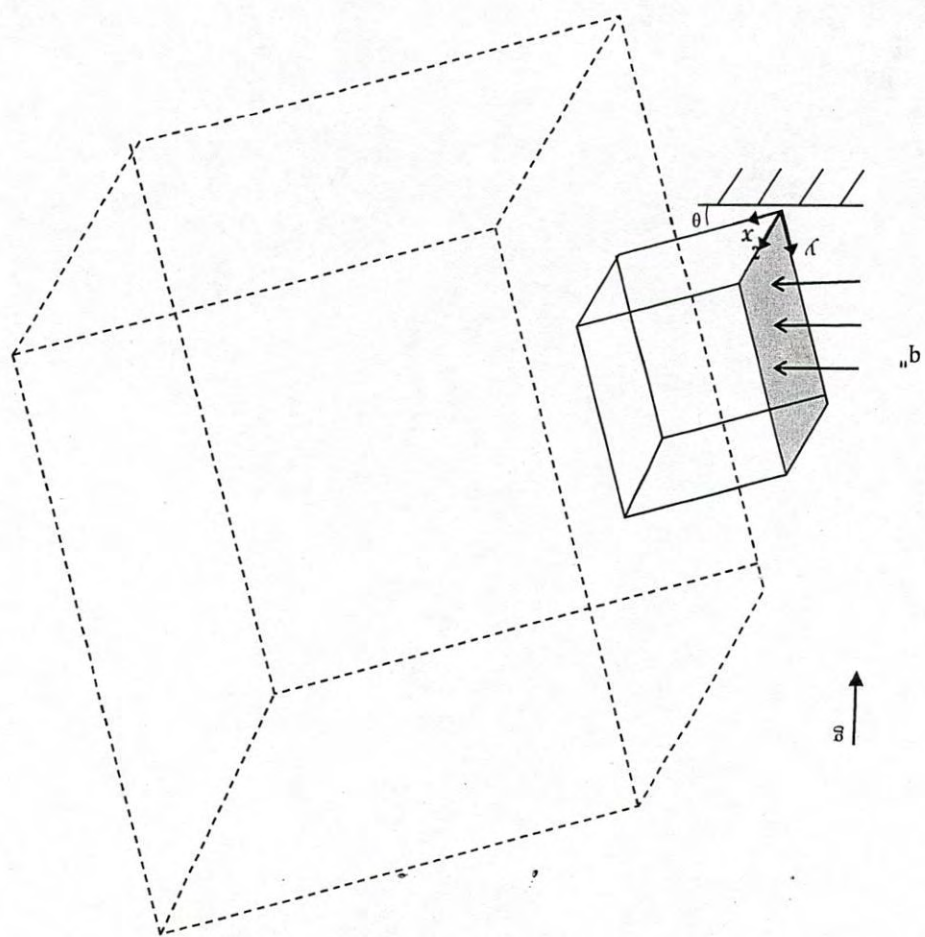


Figura 3.1 Esquema del modelo físico de la cavidad de estudio (Caso -15°).

Tabla 3.1 Polinomios para la variación de las propiedades termofísicas
del fluido con la temperatura [30].

$\Psi = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4 + fT^5 + gT^6 + hT^7$				
Coeficiente	ρ (kg/m ³)	λ (W/m K)	Cp (J/kg K)	μ (kg/m s)
<i>a</i>	5.467574143	0.061296206	1203.42803	-6.29158x10 ⁻⁶
<i>b</i>	-0.03644233	-0.000645759	-2.05649456	1.6655x10 ⁻⁷
<i>c</i>	0.000134708	3.71597x10 ⁻⁶	0.008703624	-5.95923x10 ⁻¹⁰
<i>d</i>	-3.02101x10 ⁻⁷	-1.02557x10 ⁻⁸	-2.03614x10 ⁻⁵	1.76719x10 ⁻¹²
<i>e</i>	4.21124x10 ⁻¹⁰	1.65126x10 ⁻¹¹	2.98834x10 ⁻⁸	-3.28629x10 ⁻¹⁵
<i>f</i>	-3.56688x10 ⁻¹³	-1.56764x10 ⁻¹⁴	-2.61465x10 ⁻¹¹	3.60618x10 ⁻¹⁸
<i>g</i>	1.6805x10 ⁻¹⁶	8.12384x10 ⁻¹⁸	1.22738x10 ⁻¹⁴	-2.12792x10 ⁻²¹
<i>h</i>	-3.37707x10 ⁻²⁰	-1.76913x10 ⁻²¹	-2.35884x10 ⁻¹⁸	5.18944x10 ⁻²⁵

Las ecuaciones gobernantes (continuidad, momentum y energía) promediadas en el tiempo y bajo las consideraciones descritas previamente, se presentan a continuación en notación tensorial:

Continuidad:

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Momentum:

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \right] + \rho g_i \quad (2)$$

Energía:

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{1}{C_p} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \rho C_p \bar{T} \bar{u}_j \right] \quad (3)$$

Donde x_i y x_j son las coordenadas cartesianas del sistema ($i=x, y, z$ y $j=x, y, z$), $\bar{u}$ es la velocidad promedio, $\bar{P}$ es la presión promedio, $\bar{T}$ es la temperatura promedio, g es la aceleración gravitacional, y μ , ρ , λ , C_p , son la viscosidad dinámica, densidad, la conductividad térmica y el coeficiente de calor específico a presión constante, respectivamente.

Las ecuaciones anteriormente descritas no están completas debido a la presencia del tensor de esfuerzos de Reynolds ($\rho \bar{u}_i \bar{u}_j$) en la ecuación de momentum, además de la presencia del vector calor turbulento ($\rho C_p \bar{T} \bar{u}_j$) presente en la ecuación de energía. En la familia de los modelos de viscosidad de remolinos (EVM: Eddy viscosity models), el tensor de esfuerzos de Reynolds se establece a través de la hipótesis de Boussinesq de la siguiente manera:

$$\overline{\rho u_i' u_j'} = -\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

El modelo de alto número de Reynolds (HRN: High Reynolds Number), considera que la viscosidad turbulenta (μ_t) se encuentra definida por:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k_t^2}{\varepsilon_t} \quad (6)$$

donde C_μ es una constante.

Los flujos de calor turbulentos se expresan de la siguiente forma:

$$\rho C_p \overline{T' u_j'} = -\frac{\mu_t}{\sigma_T} \left[\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

donde σ_T es el número de Prandtl turbulento.

3.2.1.1 Modelos de turbulencia.

En este estudio se probaron seis diferentes modelos de turbulencia: el modelo k- ε_t estándar ($sk\varepsilon_t$), el modelo k- ε_t realizable ($rk\varepsilon_t$), el modelo k- ε_t renormalizado ($rngk\varepsilon_t$), el modelo de esfuerzos de Reynolds (rsm), el modelo k- ω estándar ($sk\omega$) y el modelo de esfuerzo cortante k- ω ($sstk\omega$).

El modelo k- ε_t estándar [23] es un modelo semi-empírico de viscosidad de remolino de dos ecuaciones basado en la hipótesis de Boussinesq que hace la suposición que los esfuerzos de Reynolds pueden ser expresados en términos de gradientes promedio de velocidad y que la viscosidad turbulenta de remolino está relacionada con la energía cinética turbulenta (k) y la razón de disipación (ε_t); su robustez, económica de cálculo y una razonable precisión para un amplio rango de flujos turbulentos lo ha hecho muy popular en simulaciones de flujo y transferencia de calor.

El modelo $k-\varepsilon$ realizable [41] es una modificación del modelo $sk\varepsilon$ en dos aspectos importantes: contiene una nueva formulación para la viscosidad turbulenta y una nueva ecuación de transporte para la razón de disipación que han sido deducidas a partir de una ecuación exacta del transporte de la fluctuación de vorticidad cuadrática media.

La teoría de grupos renormalizados desarrolló un modelo $k-\varepsilon$ modificado [9], el cual es similar al $sk\varepsilon$ pero incluye las siguientes refinaciones: contiene un término adicional en la ecuación de ε que mejora la precisión para flujos forzados, el efecto de remolino de la turbulencia se incluye y provee una forma analítica para los números de Prandtl turbulentos, mientras que $sk\varepsilon$ usa una constante específica establecida por el usuario.

El modelo de esfuerzos de Reynolds [18] es el modelo de turbulencia más elaborado entre los modelos basados en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds (RANS). No utiliza la hipótesis de Boussineq y en lugar de asumir una viscosidad turbulenta isotrópica, el rsm cierra las ecuaciones RANS resolviendo ecuaciones de transporte individuales para los esfuerzos de Reynolds, junto a una ecuación para la razón de disipación. Esto agrega cinco ecuaciones de transporte adicionales para modelos en dos dimensiones y siete ecuaciones de transporte adicionales para simulaciones en tres dimensiones.

El modelo $k-\omega$ estándar [52] incorpora modificaciones para efectos de números de Reynolds bajos, compresibilidad y difusión de esfuerzos cortantes. Predice tasas de disipación de esfuerzos cortantes que están en concordancia con mediciones en flujos con capas mezclantes, jets radiales, planos y redondos y es aplicable en flujos rodeados por paredes y flujos con esfuerzos cortantes.

El modelo $k-\omega$ de transporte de esfuerzos cortantes [33] fue desarrollado para combinar efectivamente la formulación robusta y precisa del modelo $sk\omega$ en la región de cercanía con la pared con la independencia de libertad de corriente del modelo $k-\varepsilon$ en el campo lejano, incluye las siguientes refinaciones: las constantes de modelación son diferentes, se modificó

la definición de viscosidad turbulenta para cuantificar el transporte de esfuerzos cortantes turbulentos e incorpora un término de difusión cruzada en la ecuación de ω .

3.2.1.2 Método de solución de la ecuación de transferencia radiativa.

La transferencia de energía radiativa en un medio no isotrópico que absorbe, emite, y dispersa radiación, se describe matemáticamente por la siguiente expresión conocida como ecuación de transferencia radiativa (ETR):

$$\frac{dI}{ds} = \hat{s} \cdot \nabla I(\mathbf{r}, \hat{s}) = k_a(\mathbf{r})I_b(\mathbf{r}) - \beta_e(\mathbf{r})I(\mathbf{r}, \hat{s}) + \frac{\sigma_s(\mathbf{r})}{4\pi} \int_{4\pi} I(\mathbf{r}, \hat{s}') \Phi(\mathbf{r}, \hat{s}', \hat{s}) d\Omega' \quad (8)$$

donde:

I: intensidad de radiación.

s: longitud de trayectoria geométrica.

$\hat{s}$: vector unitario en una dirección dada.

$\mathbf{r}$: vector posición (m).

I_b : intensidad de cuerpo negro.

k_a : absorptividad.

β_e : coeficiente de extinción

σ_s : coeficiente de dispersión

Ω : ángulo sólido (sr)

La ecuación anterior es válida para un medio gris o, en una base espectral, para un medio no gris y se complementa con la siguiente condición de frontera:

$$I(\mathbf{r}_p, \hat{s}) = \varepsilon(\mathbf{r}_p)I_b(\mathbf{r}_p) + \frac{\rho_r(\mathbf{r}_p)}{\pi} \int_{\hat{n} \cdot \hat{s}' < 0} I(\mathbf{r}_p, \hat{s}') |\hat{n} \cdot \hat{s}'| d\Omega' \quad (9)$$

donde:

ε : emisividad.

ρ_r : reflectividad.

$\hat{n}$: superficie normal unitaria (apuntando en dirección opuesta desde la superficie hacia el medio).

En este estudio se utilizó el método de ordenada discreta [39] (MOD) el cual consiste en evaluar la integral de la ETR en términos de una cuadratura Gaussiana sobre todo el ángulo sólido. En lo que se refiere a transferencia de calor el MOD es muy usado para una amplia variedad de problemas donde se tiene acoplamiento de conducción-convección-radiación

3.2.2 Parámetros de transferencia de calor.

Con el propósito de generalizar los resultados, se utilizaron los números adimensionales Rayleigh y Prandtl definidos de la siguiente manera:

$$Ra = \frac{g\beta q'' L_y^4}{\nu\alpha\lambda} \quad (10)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (11)$$

donde ν es la viscosidad cinemática, q'' es el flujo de calor en la pared calentada y α es la difusividad térmica. El número de Nusselt es definido como la relación entre el flujo de calor en presencia de la convección natural y el flujo de calor debido a conducción solamente, i.e.:

$$Nu = \frac{q_{conectivo}}{q_{conduccion}} = \frac{-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0}}{\lambda (\bar{T}_h - T_\infty) / L_y} = \frac{h L_y}{\lambda} \quad (12)$$

donde $\bar{T}_h$ y T_∞ son la temperatura promedio de la pared caliente y la temperatura ambiente, respectivamente, h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor y L_y es la altura de la cavidad.

3.3 Condiciones frontera.

Las condiciones de frontera hidrodinámicas (Tabla 3.2) fueron de no deslizamiento en las paredes, por lo tanto, las componentes de velocidad son iguales a cero. Para el dominio extendido (líneas punteadas de Figura 3.1) las condiciones fueron fijadas como entradas y salidas de presión. Las condiciones de frontera térmica (Tabla 3.3) fueron: flujo de calor uniforme en la pared calentada (opuesta a la abertura) y el resto de las paredes como adiabáticas.

3.4 Solución del modelo matemático.

El sistema de ecuaciones para la transferencia de calor en el problema propuesto no tiene una solución analítica, por lo que se utiliza el método numérico de volumen finito el cual fue desarrollado originalmente como una formulación especial de diferencias finitas. Este método es la base de varios códigos comerciales de dinámica de fluidos computacional, como el caso de Fluent. Este método numérico consta de los siguientes pasos:

- a) Integración de las ecuaciones gobernantes del flujo de fluido, sobre todos los volúmenes de control del dominio de solución.
- b) Discretización mediante la sustitución de algún tipo de aproximación, en los términos de las ecuaciones integradas que representan procesos de flujo como: convección, difusión y términos fuente. Esto convierte a las ecuaciones integradas en un sistema de ecuaciones algebraicas.
- c) Solución de las ecuaciones algebraicas mediante un método iterativo.

Tabla 3.2 Condiciones de frontera hidrodinámicas.

$x = 0$	$\bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = 0$ $k = 0; \varepsilon_t = 0$
$x = L_x$	$\bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = 0$ $k = 0; \varepsilon_t = 0$
$y = 0$	$\bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = 0$ $k = 0; \varepsilon_t = 0$
$y = L_y$	$\bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = 0$ $k = 0; \varepsilon_t = 0$
$z = 0$	$\bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = 0$ $k = 0; \varepsilon_t = 0$
$z = L_z$	$\bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = 0$ $k = 0; \varepsilon_t = 0$
$x = 4L_x$	$P _{x=4L} = P_{atm}$
$y = -L_y$	$P _{y=-L} = P_{atm}$
$y = 2L_y$	$P _{y=2L} = P_{atm}$
$z = 2L_z$	$P _{z=2L} = P_{atm}$
$z = -L_z$	$P _{z=-L} = P_{atm}$

Tabla 3.3 Condiciones de frontera térmicas.

$x = 0$	$\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{q''}{\lambda}$
$x = L_x$	$\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x} \right)_{x=L_x} = T_\infty$
$y = 0$	$\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right)_{y=0} = 0$
$y = L_y$	$\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right)_{y=L_y} = 0$
$z = 0$	$\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right)_{z=0} = 0$
$z = L_z$	$\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \right)_{z=L_z} = 0$

Este método comienza con la discretización de las ecuaciones gobernantes, para lo cual se tiene que decidir dónde colocar los nodos de las velocidades (y por lo tanto sus volúmenes de control). El dominio de estudio se subdivide en un número finito de volúmenes de control (VC) contiguos y las ecuaciones de conservación se aplican a cada volumen de control. En el centro de cada VC se coloca un nodo computacional en el cual las variables son calculadas. Se interpola para expresar los valores de las variables en las superficies de los VC en términos de los valores nodales, como resultado se obtiene una ecuación algebraica para cada VC, en la cual aparecen valores de los nodos vecinos.

Debido a la naturaleza no lineal del sistema de ecuaciones y a la falta de una ecuación para la presión, se utiliza un algoritmo iterativo para acoplar las ecuaciones de momentum y masa, conocido como algoritmo SIMPLE. El acrónimo SIMPLE significa método semi-implícito para ecuaciones acopladas con la presión, con el cual se realizan las iteraciones necesarias para obtener el resultado. Este algoritmo se puede resumir de la siguiente manera:

1. Se establece un valor inicial de las variables: componentes de la velocidad, presión, temperatura, energía cinética turbulenta y la disipación de la energía cinética turbulenta.
2. Se obtiene una solución aproximada del campo de velocidad, resolviendo las ecuaciones de momento a partir del campo de presión supuesto.
3. Se calcula la corrección de presión.
4. Se realiza la corrección de las velocidades y la presión.
5. Se resuelve la ecuación de energía, la energía cinética turbulenta y la disipación de la energía cinética turbulenta.
6. Se verifica la convergencia, en caso de no satisfacerse el criterio de convergencia entonces se actualizan los valores para repetir los pasos 2-5 nuevamente.
7. Alcanzada la convergencia se determina el valor del número de Nusselt total a partir del campo de temperatura.

Además, los términos convectivos son discretizados aplicando el esquema MUSCL [50]. El criterio de convergencia fue alcanzado cuando los residuales ponderados de cada ecuación gobernante fueron de 10^{-3} .

3.5 Análisis de independencia de malla.

Para determinar el tamaño apropiado de la malla computacional se llevó a cabo un estudio de independencia de malla. Con el fin de lograr una economía computacional, primeramente, se llevó a cabo una simulación en la sección transversal del problema de estudio, representando un estudio de dos dimensiones. Alcanzada la independencia, se procedió a extrapolar esta malla a tres dimensiones buscando que la posición del primer nodo en la dirección del eje x coincidiera. Esto se llevó a cabo fijando un flujo de calor de 300 W a la pared calentada. Como se muestra en la Tabla 3.4 el valor de número de Nusselt promedio en la cavidad se vuelve independiente usando una malla no uniforme con 10 nodos en los primeros 5 cm y 30 nodos en los restantes 95 cm de la dirección x , y 30 nodos en las direcciones z y y , dando un total de 36000 nodos computacionales.

3.6 Sistema experimental.

A continuación se describe la estructura del dispositivo así como la metodología para llevar a cabo el estudio experimental.

3.6.1 Cavidad experimental.

La cavidad experimental construida (Figura 3.2. y Figura 3.3) consta de 5 volúmenes contruidos de fibro-madera de mediana densidad (MDF) de $\frac{1}{2}$ " de espesor. Rellena de poliestireno expandido para reducir la transmisión de calor por las paredes. La pared calentada tiene un elemento calefactor en su interior emparedado entre MDF y una lámina de aluminio. Se construyeron dos: una con las caras internas cubiertas con una película de aluminio pulido ($\epsilon=0.05$) y otra pintada con pintura negro mate ($\epsilon=0.95$) en su interior. Estas se muestran en la Figura 3.2 y 3.3.

Tamaño de malla	Posición 1er nodo (m)	Nusselt promedio	% diferencia
35x30x30	9.9×10^{-3}	153	---
40x30x30	4.9×10^{-3}	204	33
45x30x30	3.3×10^{-3}	209	2.4
50x30x30	2.5×10^{-3}	213	1.9
55x30x30	2.0×10^{-3}	212	0.4
Relación no uniforme con malla	Posición 1er nodo (m)	Nusselt promedio	% diferencia
0.83	2.02×10^{-3}	208	---
0.84	2.16×10^{-3}	209	0.4
0.85	2.97×10^{-3}	213	1.9
0.86	2.31×10^{-3}	210	1.4
0.87	2.47×10^{-3}	211	0.4

Tabla 3.4 Análisis de independencia de malla.



Figura 3.2 Cavity experimental con paredes de aluminio pulido.

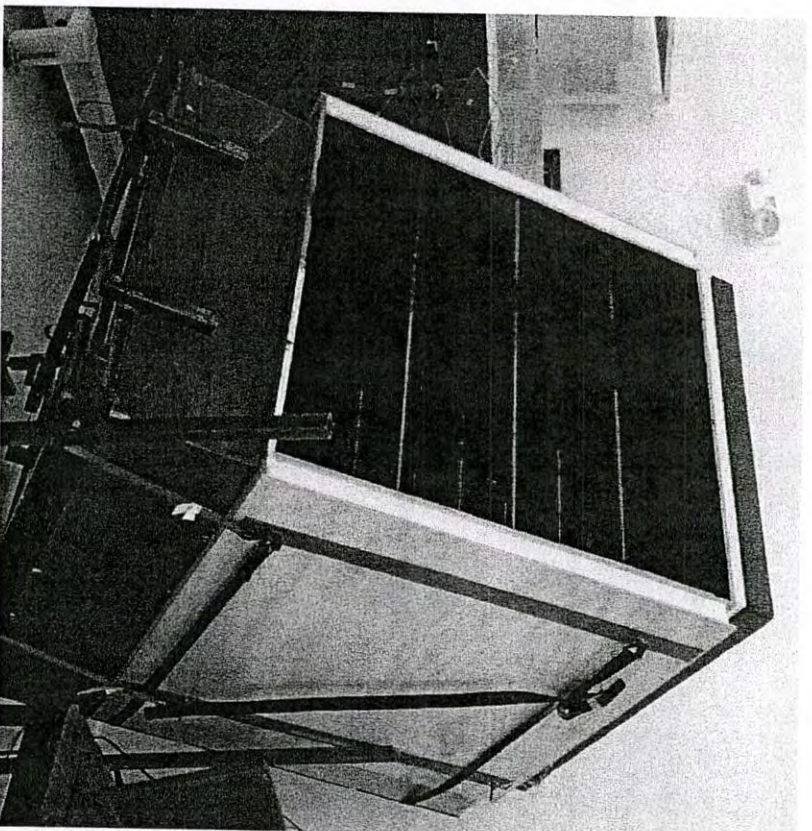


Figura 3.3 Cavity experimental con paredes pintadas de negro.

3.6.2 Paredes aisladas térmicamente.

Las paredes adiabáticas del dispositivo fueron construidas en forma de cajones de MDF los cuales se rellenaron con poliestireno expandido con un espesor de 0.05 m. Esto, con el fin de asegurar la menor disipación de calor posible en estas paredes y tratar de alcanzar la condición adiabática impuesta en el modelo de estudio.

3.6.3 Sistema de suministro de calor.

El sistema de suministro de calor (Figura 3.4) está compuesto por una resistencia eléctrica flexible de grado industrial cubierta de silicón con las siguientes dimensiones: 0.91 m por 1.009 m (Figura 3.4). La cual tiene una potencia máxima de 500 W operando con 120 V. El suministro de energía eléctrica se llevó a cabo un reóstato de la marca Powerstat con entrada de 120 V y salida de 0 a 140 V y 22 A. La resistencia está en contacto directo con una lámina de aluminio hacia el interior de la cavidad y ésta es soportada por una placa de MDF en la parte que da hacia el exterior de la cavidad.

3.6.4 Sistema de sensores de temperatura y sistema de adquisición de datos.

El sistema de adquisición de datos está compuesto por dos adquisidores de la marca Agilent modelo 34970A; cada adquisidor tiene capacidad para 3 tarjetas multiplexoras con capacidad de 20 termopares cada una. Para el monitoreo y registro de la temperatura se utilizaron termopares tipo K con un diámetro de 0.06 mm (40 AWG) de la marca Omega a diferentes posiciones dentro de la cavidad. Este sistema se conectó a una computadora Lanix con procesador Pentium 4 2.4 GHz con un 1 Gb de memoria Ram y sistema operativo Windows XP para el procesamiento de los datos.

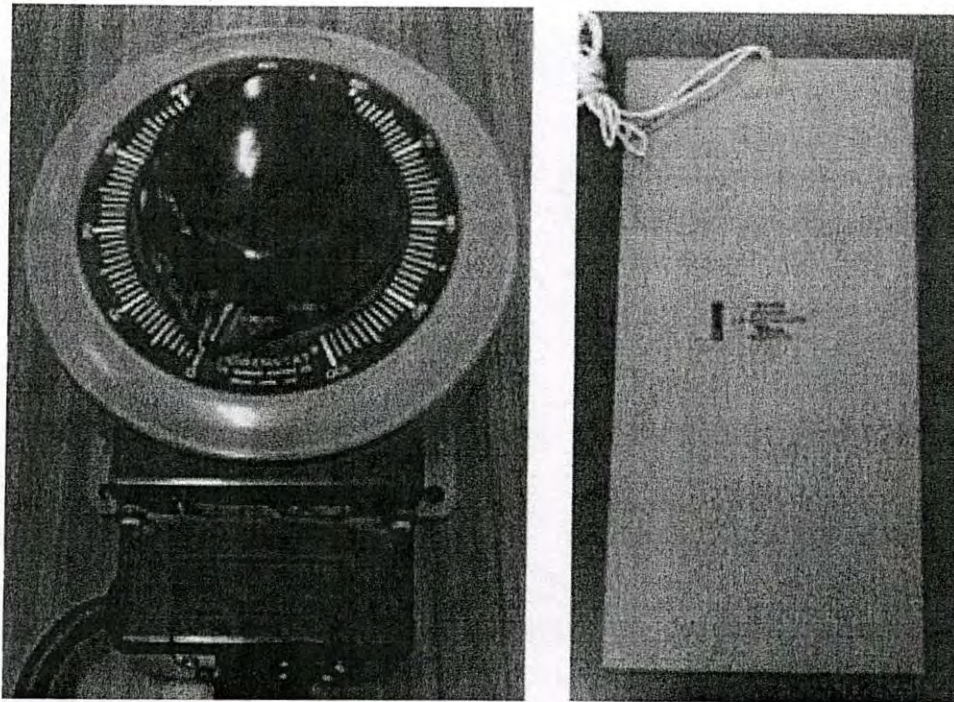


Figura 3.4 Sistema de suministro de calor.

Se colocaron termopares en las siguientes alturas de la cavidad: $y= 0.25, 0.50, 0.75$ y 0.90 m y en tres profundidades $z= 0.25, 0.50$ y 0.75 m. La colocación de los sensores en el eje x , se decidió con base en simulaciones numéricas para determinar el espesor de la capa límite térmica. Los termopares se colocaron en $0.004, 0.008, 0.012, 0.016, 0.02, 0.03, 0.5, 0.98$ y 0.99 m. Con el fin de medir las pérdidas de calor de la pared calentada, se colocó un termopar a la distancia media del cajón que protegía al elemento calefactor. Además, se midió la temperatura ambiente con otro termopar que estaba en las inmediaciones de todo el prototipo. Por último, la temperatura de la pared calentada fue medida con 12 termopares dispuestos en una matriz de 4×3 elementos en las alturas y profundidades mencionadas anteriormente.

3.7 Procedimiento y tratamiento de datos experimentales.

3.7.1 Procedimiento experimental.

Para la obtención de los datos las mediciones se realizaron de la siguiente manera:

1. Se enciende la computadora y los adquisidores de datos.
2. Se enciende y ajusta el reóstato con la tensión eléctrica correspondiente.
3. Se inicia el registro de datos ejecutando el comando de grabado.

En este estudio se obtuvieron los resultados experimentales del coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) a partir de la ley de enfriamiento de Newton:

$$q'' = h[\bar{T}_h - \bar{T}_\infty] \quad (13)$$

en donde:

q'' = Flux de calor, (W/m^2).

h = Coeficiente convectivo de transferencia de calor, ($W/m^2 K$).

T_h = Temperatura promedio de la superficie caliente, (K).

T_∞ = Temperatura promedio del ambiente, (K).

Se tiene entonces que h esta dado por:

$$h = \frac{q''}{A[\bar{T}_h - \bar{T}_\infty]} \quad (14)$$

Considerando que $q = VA$ y $Area = L_y L_z$, entonces se tiene:

$$h = \frac{VA}{L_y L_z [\bar{T}_h - \bar{T}_\infty]} \quad (15)$$

en donde:

V = Tensión eléctrica, (V).

A = Corriente eléctrica, (A).

L_z = Ancho de la cavidad, (m).

L_y = Altura de la cavidad, (m).

3.7.2 Tratamiento de datos experimentales.

A continuación se detalla el tratamiento de la información experimental. El procedimiento se ilustra con datos obtenidos para la cavidad con aluminio pulido a 300 W y una inclinación de -45° . El experimento se lleva a cabo hasta alcanzar el estado permanente con una duración total de 12 horas de experimentación. Se verifica este estado calculando los valores promedio y desviaciones estándar de las últimas 3 horas de medición. Como se muestra en la Figura 3.5 la naturaleza fluctuante de la turbulencia se verifica en la variación de los valores obtenidos de temperatura. En la Figura 3.5 se tiene un perfil de temperatura a lo largo de toda una corrida, mientras que en la Figura 3.6 se tiene el segmento de tiempo seleccionado para llevar a cabo este estudio donde se aprecia la relativa estabilidad de los resultados. En la Figura 3.7 se tiene el comportamiento de la temperatura ambiente en las últimas tres horas de experimentación. Por último, el comportamiento de la temperatura de la pared caliente se presenta en la Figura 3.8, donde se aprecia que después de 4 horas los valores de temperatura se mantienen casi constantes.

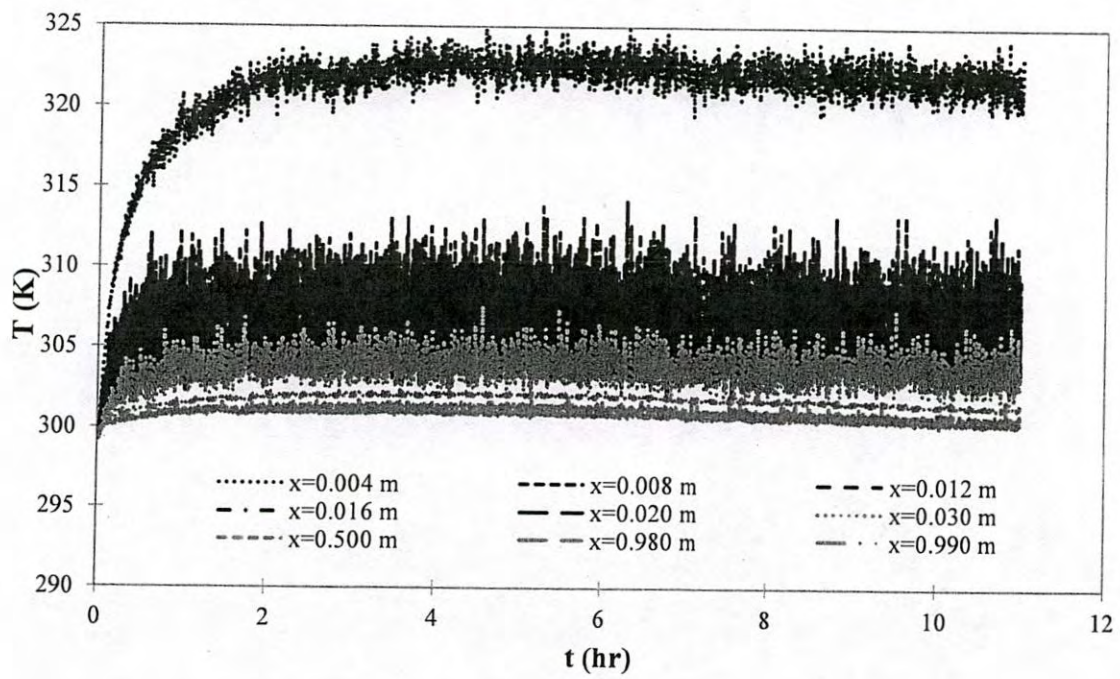


Figura 3.5 Comportamiento de un perfil de temperatura en el tiempo.

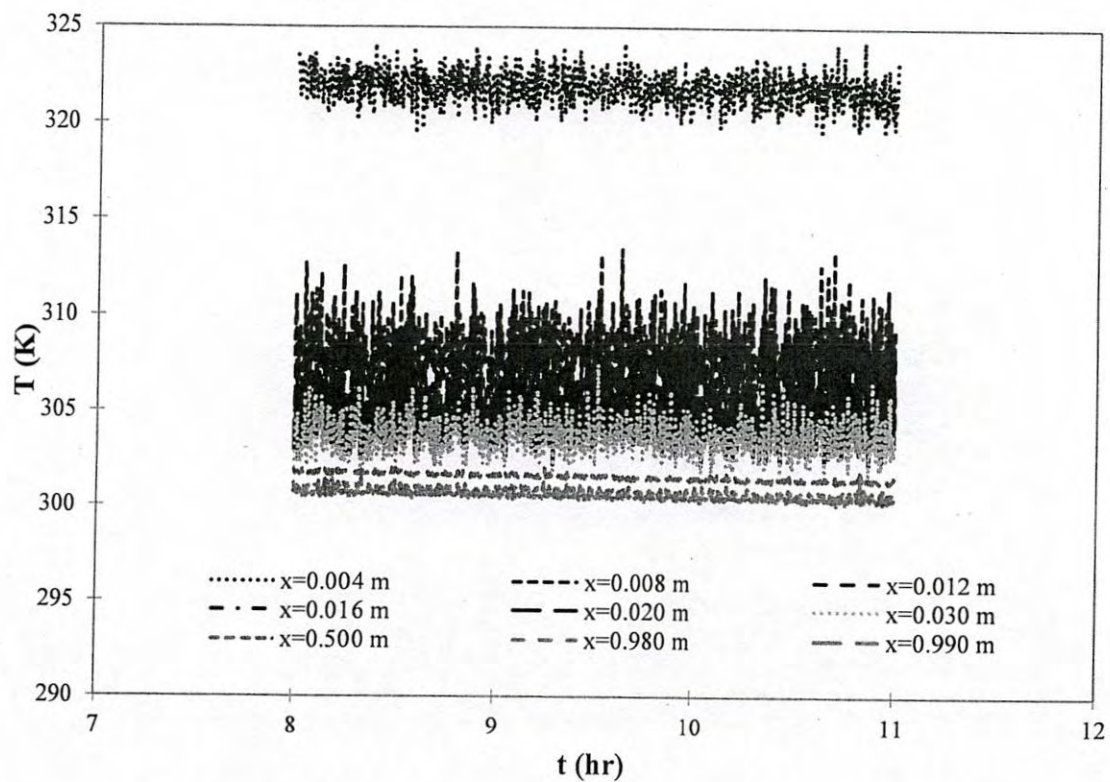


Figura 3.6 Intervalo de tiempo seleccionado en este estudio para el análisis de los datos experimentales.

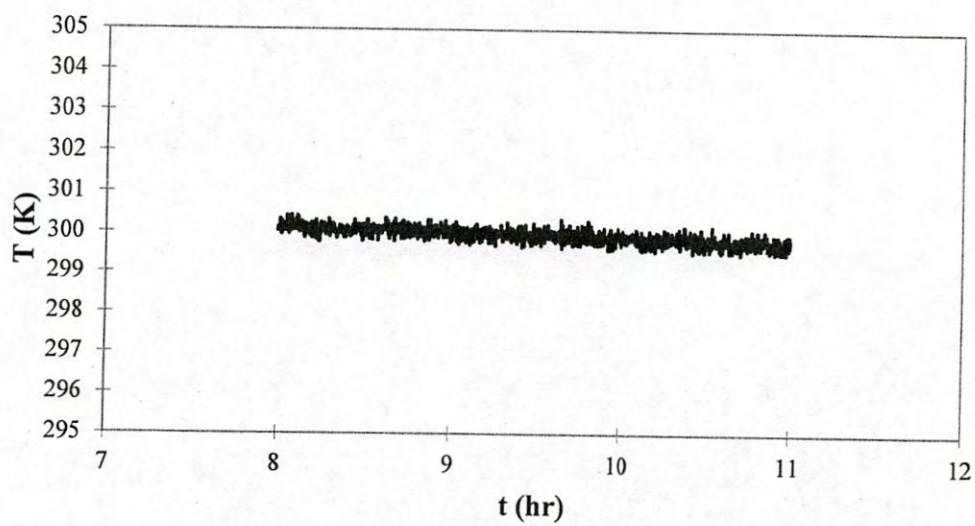


Figura 3.7 Comportamiento de la temperatura ambiente.

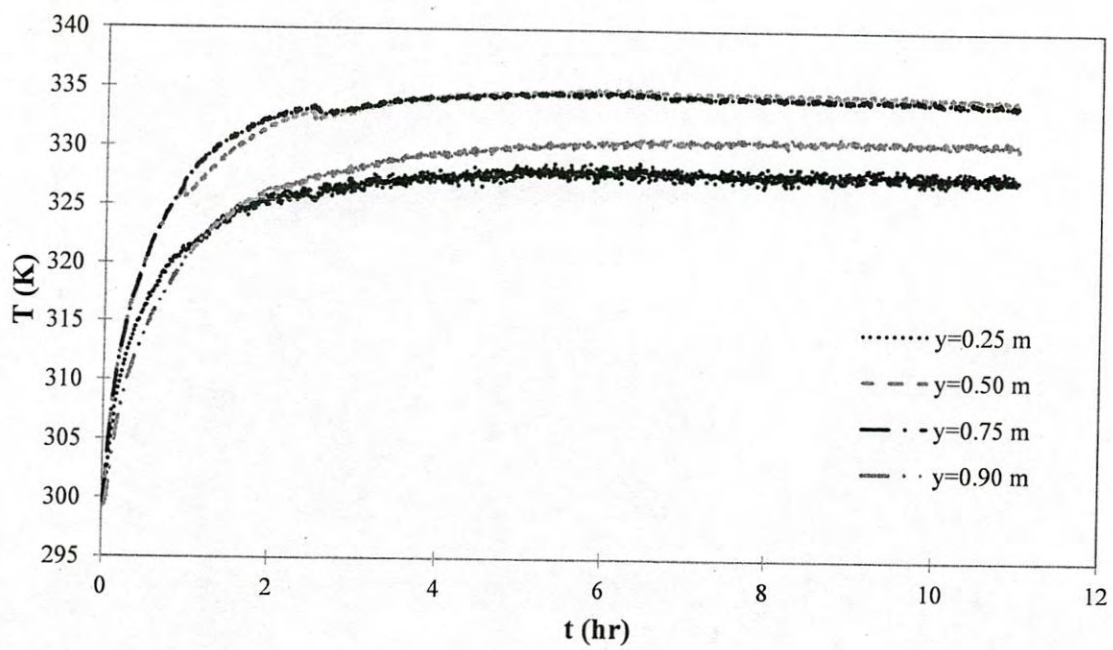


Figura 3.8 Comportamiento de las temperaturas medidas en la pared caliente.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados experimentales para una cavidad abierta inclinada, así como la comparación numérico-experimental de los resultados obtenidos con el software de dinámica de fluidos computacional. Se consideraron tres valores de números de Rayleigh (1.7×10^{11} , 3.4×10^{11} y 6.8×10^{11}), siete ángulos de inclinación ($+45^\circ$, $+30^\circ$, $+15^\circ$, 0° , -15° , -30° y -45°) y dos valores de emisividad de las superficies (0.05 y 0.9) correspondientes a paredes cubiertas de aluminio pulido (para reducir el intercambio radiativo entre las paredes) y pintadas de negro (para considerar el intercambio radiativo entre las mismas). También se presentan resultados numéricos para un receptor de cavidad para el sistema termosolar de torre central de escala real, en forma de contornos de temperatura, magnitud de velocidad, vectores de velocidad y coeficientes de transferencia de calor. Por último, se presentan resultados numéricos de la propuesta de receptor-calorímetro desarrollada en la presente investigación para medir la potencia térmica de un conjunto de helióstatos.

4.1 Resultados experimentales en cavidad abierta.

A continuación se presentan los resultados experimentales y la comparación con resultados numéricos obtenidos considerando los diferentes modelos de turbulencia descritos en el capítulo 3.

4.1.1 Cavidad abierta con paredes cubiertas con aluminio pulido ($\varepsilon=0.05$).

En la Figura 4.1 se muestra los perfiles de temperatura experimental en la cavidad sin radiación en $y=0.5$ m, $z=0.25$ m para los tres números de Rayleigh estudiados, en el inciso (a) se tiene el Ra 1.7×10^{11} donde se tiene el valor máximo de 313 K para el caso $+15^\circ$ y el mínimo para $+45^\circ$ con 308 K; los siete casos muestran el mismo comportamiento donde la temperatura disminuye en la zona de capa límite hasta el valor en el eje abscisa de 0.03, después, en los valores de $x=0.5$ y $x=0.98$ y $x=0.99$ la variación de temperatura es mínima.

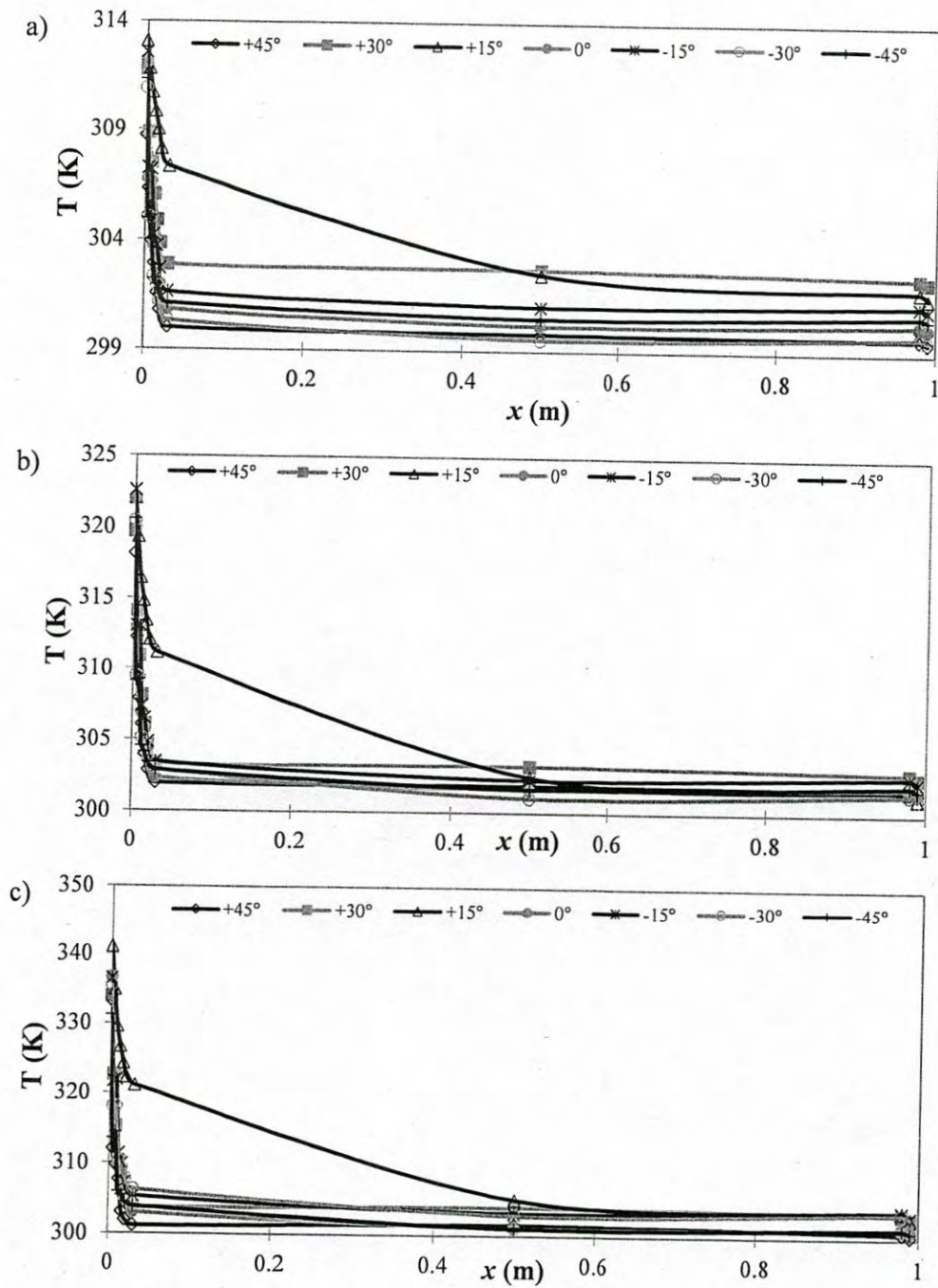


Figura 4.1 Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes cubiertas de aluminio pulido, en $y=0.5\text{m}$, $z=0.25\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

Cuando se aumenta el número de Rayleigh a 3.4×10^{11} , el valor máximo en la pared caliente aumenta a 322 K y el mínimo a 318 K para $+45^\circ$ teniendo valores de 301 a 303 K en el punto $x=0.5$ m en todos los casos; para el valor del número de Rayleigh más alto el valor máximo de temperatura es de 341 K en $+15^\circ$ y el mínimo de 331 K en -45° .

Los perfiles de la Figura 4.2 corresponden al punto $y=0.5$ m, $z=0.5$ m donde en a) el valor máximo correspondió al caso $+15^\circ$ con 315 K y el mínimo a -30° con 310 K en la pared mientras que en los puntos $x=0.5, 0.98$ y 0.99 la temperatura varía menos de 4 K entre todos los casos; en b) el máximo y mínimo valor de temperatura en la pared caliente son de 327 K y 320 K en $+15^\circ$ y -30° , respectivamente, además los 3 puntos restantes para todos los casos varían alrededor 2 K entre todos ellos. Para el valor más alto del número de Rayleigh se presentan valores mayores de temperatura en la pared caliente alcanzándose los 351 K en $+15^\circ$ y un valor mínimo de 334 K en -30° disminuyendo hasta 326 y 305 K en $x=0.03$, los demás puntos del perfil presentan variaciones de temperatura mínimas.

Los casos de $+30^\circ$ y $+15^\circ$ destacan entre los demás por sus valores mayores de temperatura en el perfil $y=0.75$ m, $z=0.5$ m como se muestra en la Figura 4.3, ya que para $Ra=1.7 \times 10^{11}$ se presentan valores máximos de 316 y 317, respectivamente, mientras que el mínimo en la pared caliente corresponde al caso -30° con 310 K. El caso de $Ra=3.4 \times 10^{11}$ se presenta el mismo comportamiento alcanzándose 327 y 329 K en valores máximos en la pared caliente para los casos $+30^\circ$ y $+15^\circ$, respectivamente, mientras que el mínimo lo tiene el caso -30° con 319 K, de igual manera la variación de temperatura en los puntos $x=0.5, 0.98$ y 0.99 es mínima comparada con los puntos $x=0.004$ a 0.03 . Finalmente, para $Ra=6.8 \times 10^{11}$ la pared presenta valores máximos de 348 y 354 K en los casos $+30^\circ$ y $+15^\circ$, respectivamente y un mínimo de 334 K en el caso -45° .

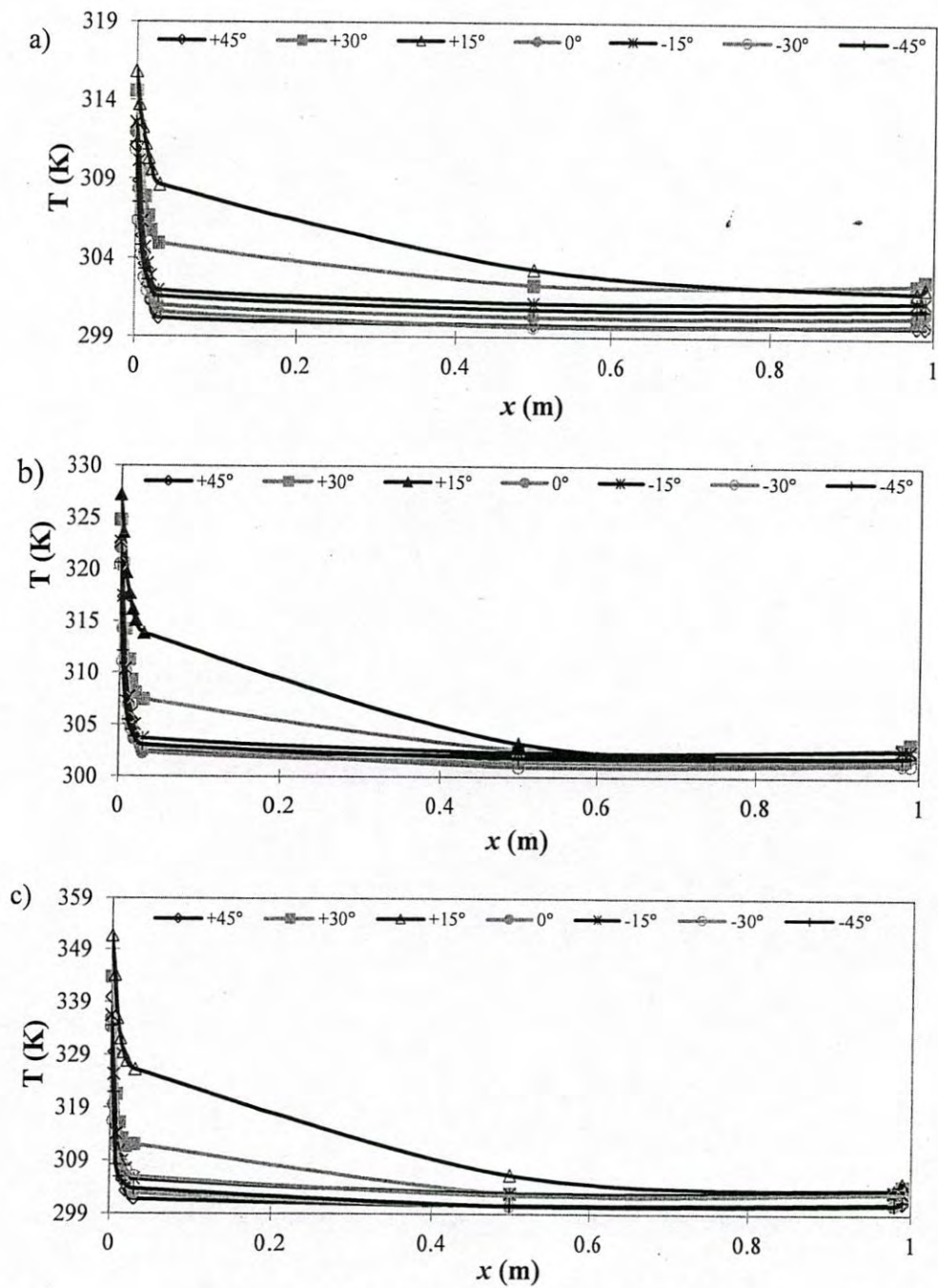


Figura 4.2 Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes cubiertas de aluminio pulido, en $y=0.5\text{m}$, $z=0.5\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

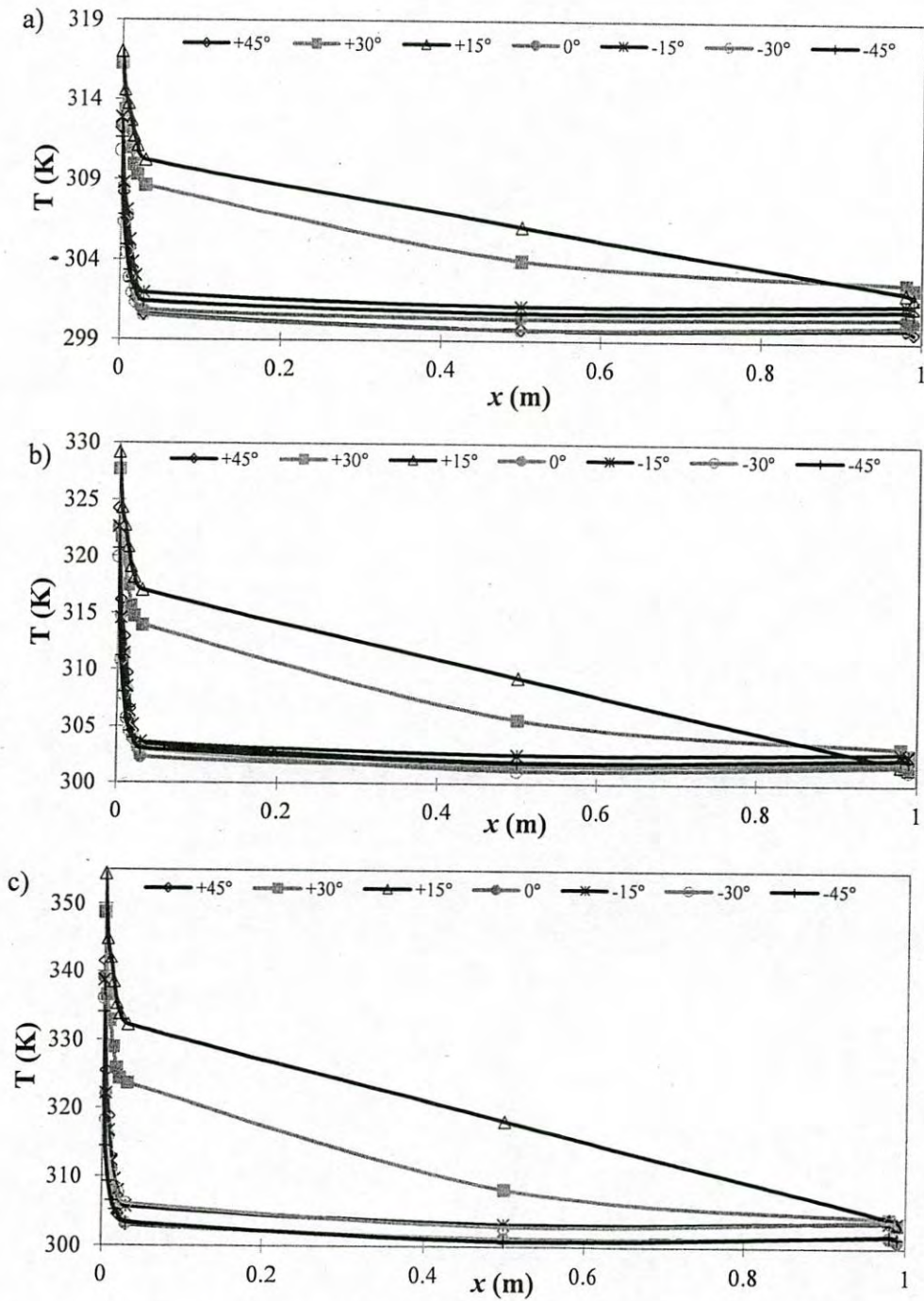


Figura 4.3 Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes cubiertas de aluminio pulido, en $y=0.75\text{m}$, $z=0.5\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

La temperatura de la parte superior de la cavidad se midió con el perfil $y=0.9$ m, $z=0.5$ m como se muestra en la Figura 4.4, donde es apreciable que para el $Ra=1.7 \times 10^{11}$ el caso con mayor temperatura corresponde a $+15^\circ$ en todo el perfil, seguido por el caso $+30^\circ$ y los perfiles con menor temperatura son los casos -30° y -45° . Este comportamiento se repite en para $Ra=3.4 \times 10^{11}$ con valores máximos de temperatura de 323 K para $+15^\circ$ y 321 K para $+30^\circ$. La temperatura aumenta en $Ra=6.8 \times 10^{11}$ llegando hasta 344 K para $+15^\circ$ y la mínima de 330 K para -45° en la pared caliente.

La parte central baja de la cavidad fue estudiada con el perfil $y=0.25$ m, $z=0.5$ m como se muestra en la Figura 4.5, donde para $Ra=6.8 \times 10^{11}$ se alcanzó un valor máximo en la pared caliente de 347 K en el caso $+15^\circ$ y mínimo de 332 K en -30° ; mientras que para $Ra=3.4 \times 10^{11}$ la temperatura en la pared caliente baja hasta 317 K en los casos de -30° y -45° , y la máxima fue de 327 K en $+15^\circ$. Finalmente cuando $Ra=1.7 \times 10^{11}$ la temperatura máxima y mínima oscila entre los 316 K y 309 K para los casos $+15^\circ$ y -45° , respectivamente.

En la Figura 4.6 se tiene el perfil de temperatura en la posición $y=0.5$ m, $z=0.75$ m donde es visible que para $Ra=1.7 \times 10^{11}$ la temperatura máxima alcanzada fue de 315 K en el caso de $+15^\circ$ y la mínima de 310 K para el caso de -30° ; cuando el número de Rayleigh aumenta hasta 3.4×10^{11} , la temperatura máxima es 326 K para $+15^\circ$ y la mínima es 319 K en -30° para la pared caliente; en el caso de $Ra=6.8 \times 10^{11}$ las temperaturas máxima y mínima aumentan hasta alcanzar los 349 K y 333 K en los casos $+15^\circ$ y -45° , respectivamente.

En todos los perfiles estudiados, el caso con una inclinación hacia abajo de 15° mantuvo los valores más altos de temperatura comparado con los demás casos, mientras que los valores mínimos abarcaron los casos hacia arriba en valores de inclinación de -30° y -45° .

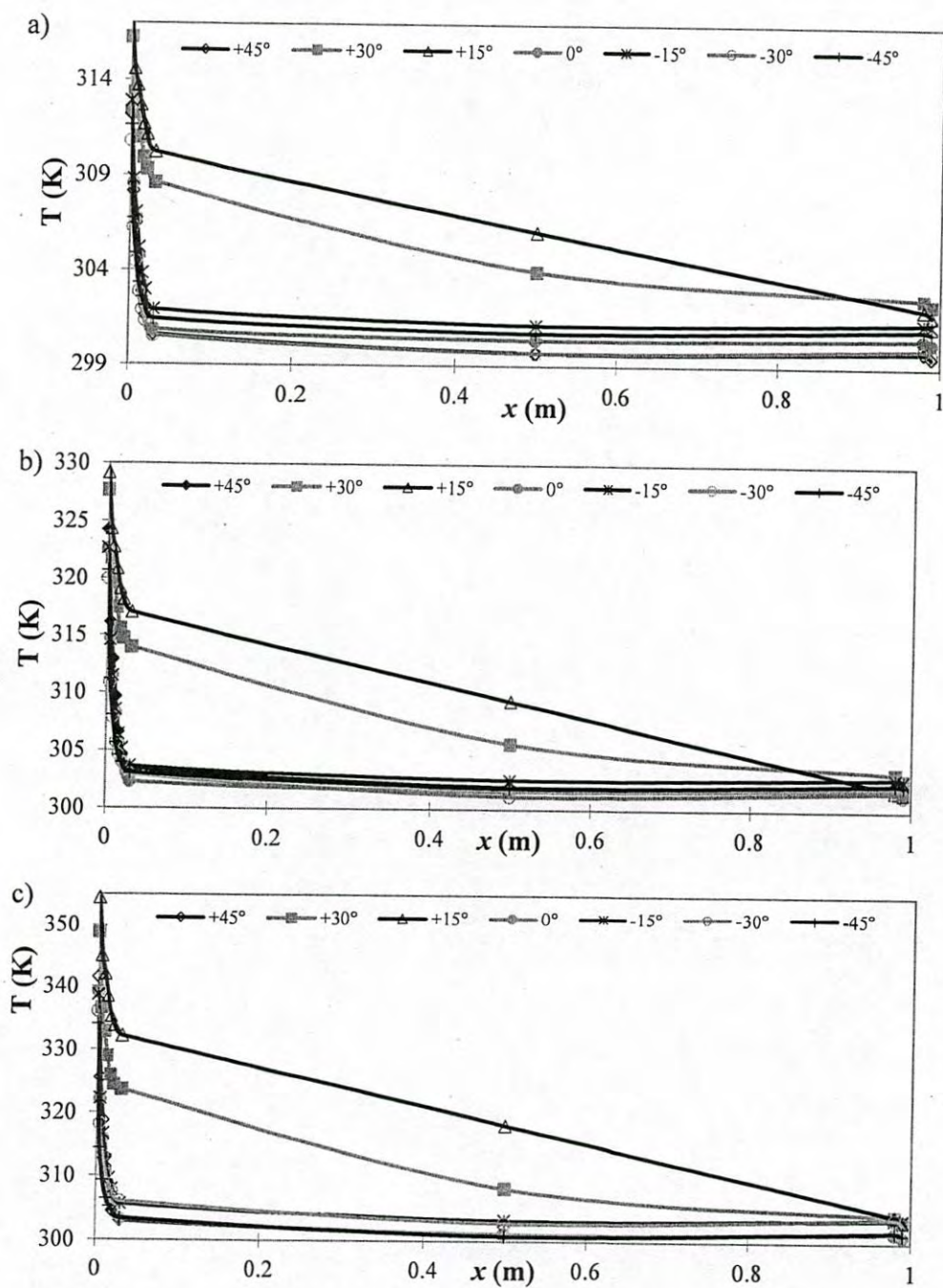


Figura 4.4 Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes cubiertas de aluminio pulido, en $y=0.9$ m, $z=0.5$ m: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

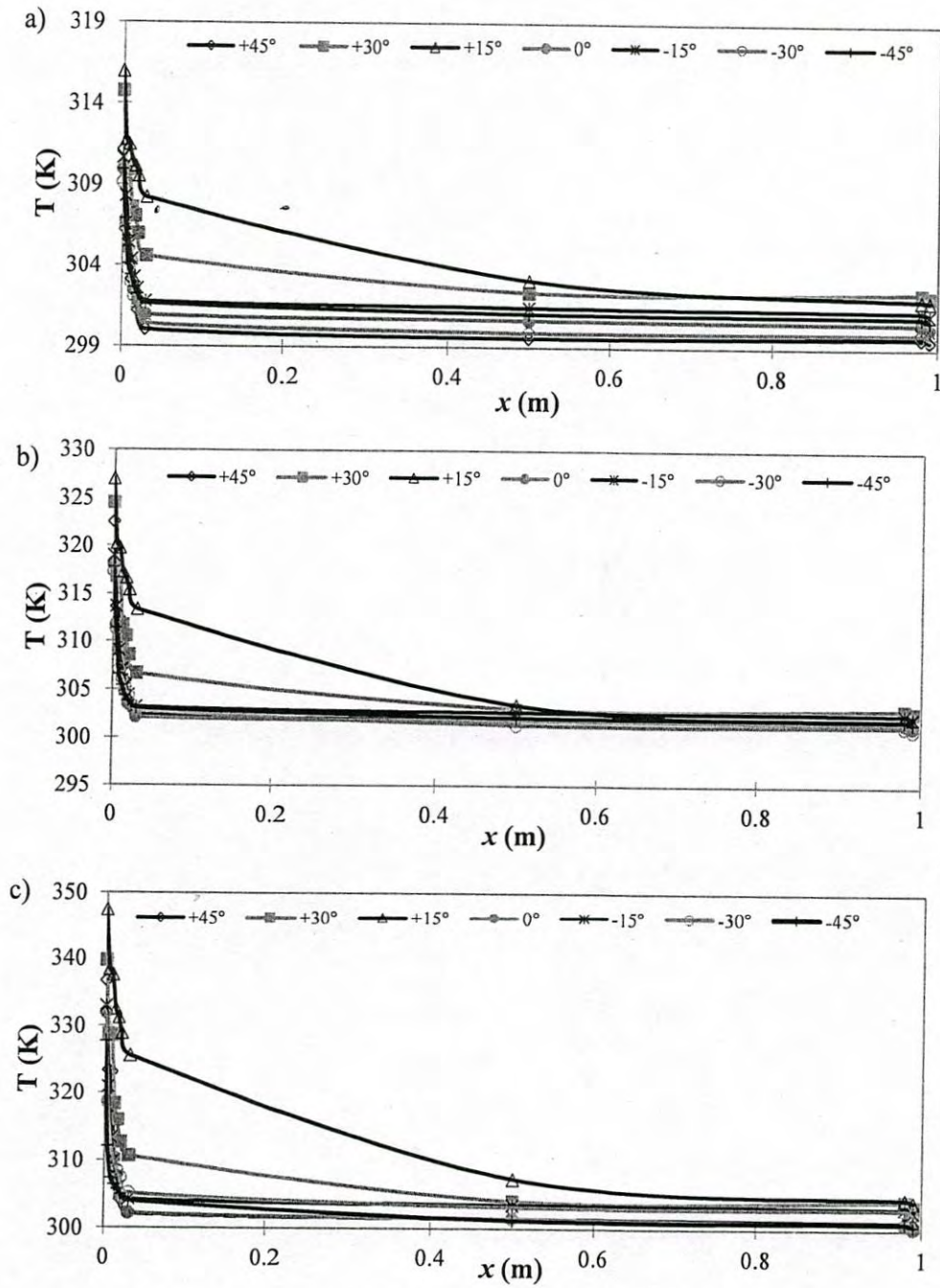


Figura 4.5 Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes cubiertas de aluminio pulido, en $y=0.25\text{m}$, $z=0.5\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

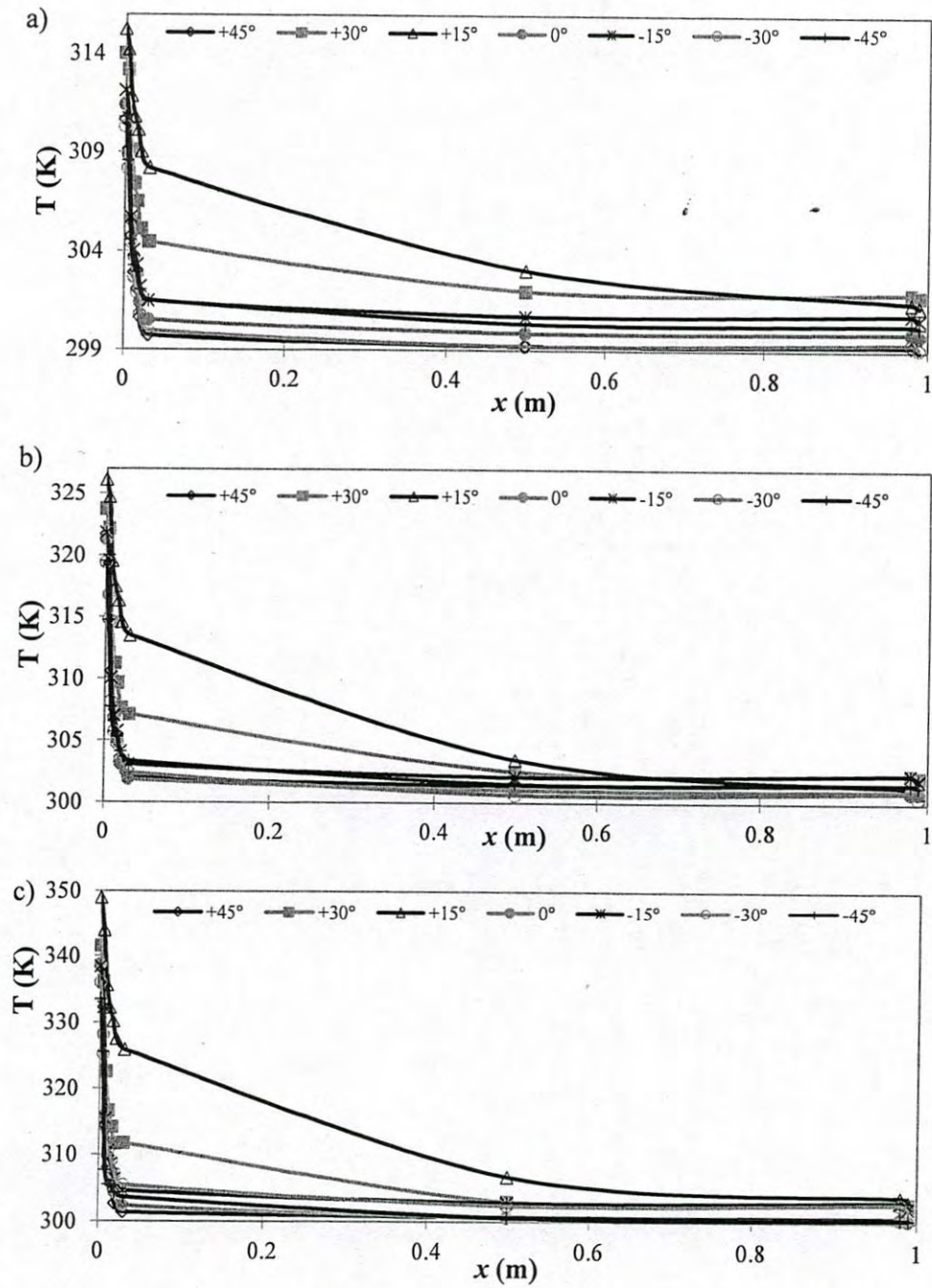


Figura 4.6 Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes cubiertas de aluminio pulido, en $y=0.5\text{m}$, $z=0.75\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

4.1.2 Cavity abierta con paredes pintadas de negro ($\epsilon=0.9$).

En la Figura 4.7 se presenta el perfil de temperatura correspondiente a la pared superior de la cavidad, en $y=1$ m, $z=0.5$ m, donde en todas las inclinaciones y todos los números de Rayleigh el valor de temperatura decrece conforme avanza la posición en el eje x ; para $Ra=1.7 \times 10^{11}$ la temperatura mayor y menor corresponde a los casos $+15^\circ$ y -45° con 311 K y 308 K, respectivamente; en $Ra=3.4 \times 10^{11}$ estos valores aumentan hasta alcanzar 323 K y 312 K en los mismos casos; y por último para $Ra=6.8 \times 10^{11}$ las temperaturas máxima y mínima aumentaron hasta 340 K y 321 en los casos anteriormente señalados.

Por otro lado, la temperatura de la pared inferior de la cavidad, fue medida en el perfil $y=0$ m, $z=0.5$ m como se muestra en la Figura 4.8. En este caso, las temperaturas máximas y mínimas son de 324 K y 316 K en los casos $+15^\circ$ y -45° en $Ra=6.8 \times 10^{11}$; mientras que en $Ra=3.4 \times 10^{11}$ disminuyeron estos valores a 314 K y 310 K en los mismos casos; llegando al valor mínimo de 307 K y 306 K en los casos anteriormente señalados para el valor de número de Rayleigh de 1.7×10^{11} . Es notable en los tres incisos de esta Figura como la temperatura del fluido aumenta conforme se acerca a la pared caliente.

La temperatura en la parte superior de la cavidad fue medida con el perfil $y=0.75$ m, $z=0.5$ m presentado en la Figura 4.9. En el inciso (a) los resultados arrojan que el valor máximo en la pared caliente fue de 315 K y el mínimo de 312 K en los casos de $+15^\circ$ y -45° , respectivamente. A partir de los puntos $x=0.75$ m los casos hacia abajo presentan menor temperatura que los casos viendo hacia arriba. En $Ra=3.4 \times 10^{11}$ la temperatura aumentó hasta 330 K y 320 K en los mismos casos que en $Ra=1.7 \times 10^{11}$ y el comportamiento de los puntos $x=0.75$, 0.98 y 0.99 m se mantiene de forma cualitativa. Por su parte, el inciso (c) presenta valores máximos y mínimos de temperatura de 353 K y 334 K en los casos de inclinación de $+15^\circ$ y -45° , respectivamente.

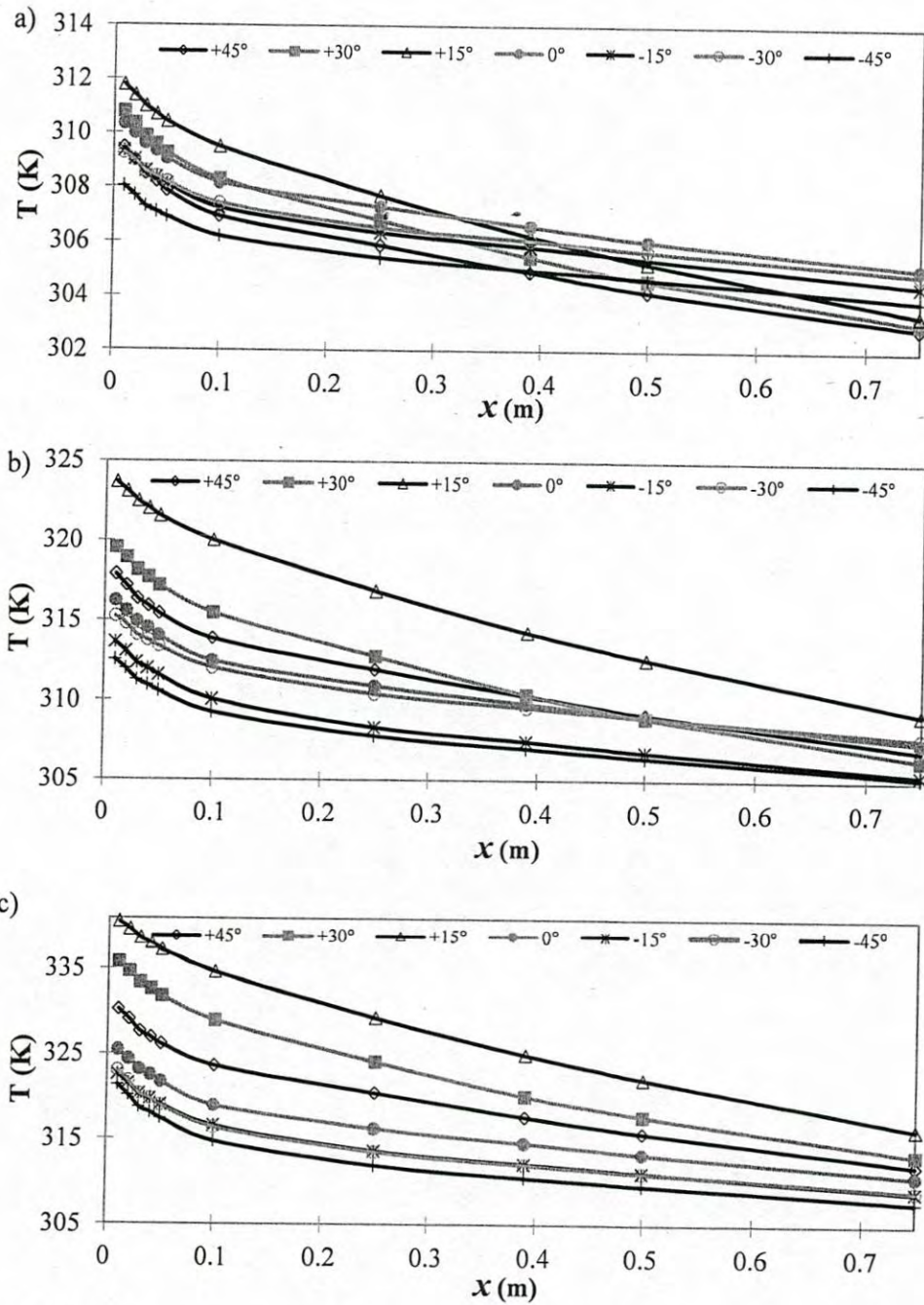


Figura 4.7 Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $y=1.0$, $z=0.5$ m: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

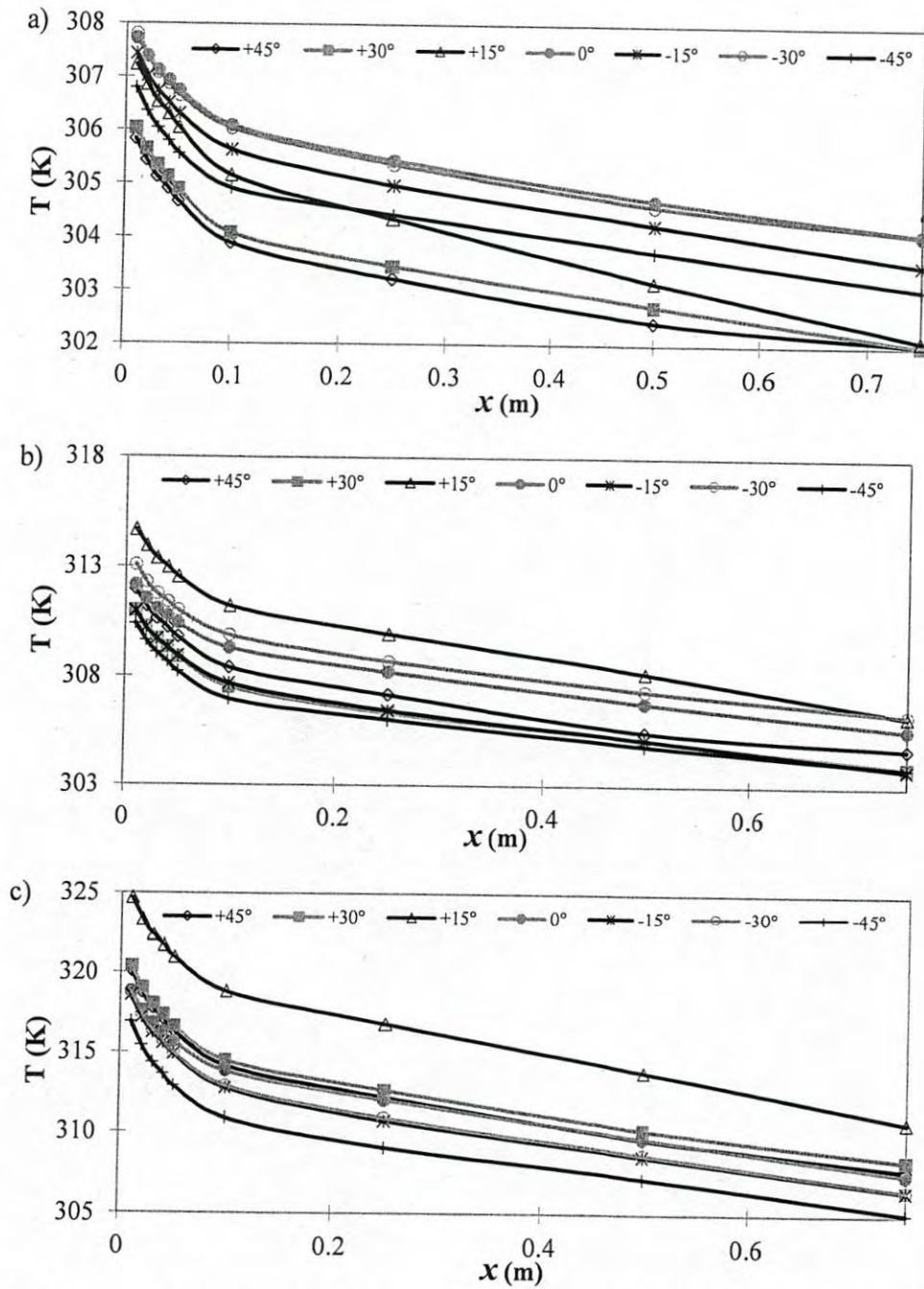


Figura 4.8 Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $y=0$, $z=0.5$ m: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

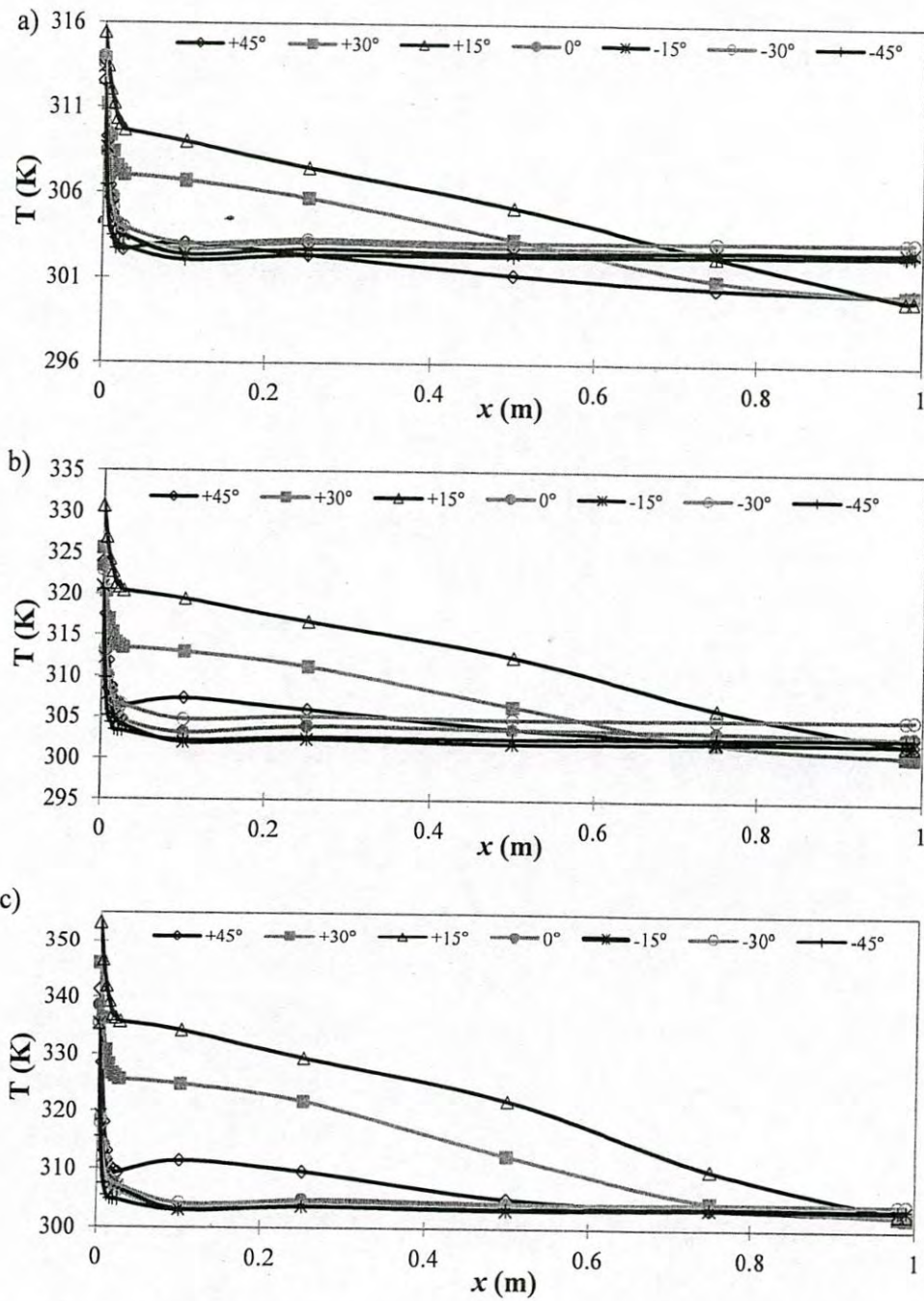


Figura 4.9 Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $y=0.75\text{m}$, $z=0.5\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

La Figura 4.10 muestra el perfil de temperatura en la zona media de la cavidad, correspondiente a $y=0.5$ m, $z=0.5$ m, donde $Ra=6.8 \times 10^{11}$, presentado en el inciso (c) tiene un valor máximo de temperatura de 350 K en el caso $+15^\circ$ y un valor mínimo en la pared caliente en el caso -45° con 335 K. Para $Ra=3.4 \times 10^{11}$ destaca el caso $+15^\circ$ por presentar valores mayores de temperatura entre todas las inclinaciones teniendo un máximo en la pared caliente de 328 K, en los demás casos se observa un valor de temperatura en la misma zona que va desde 320 K en -45° hasta 323 K en la mayoría del resto de los casos. Por último, en el inciso (a), correspondiente a $Ra=1.7 \times 10^{11}$, disminuyen los valores máximos de temperatura en la pared caliente a 314 K para el caso $+15^\circ$ y 311 K en el caso de $+45^\circ$.

En el perfil de temperatura en $y=0.5$ m, $z=0.75$ m correspondiente a la Figura 4.11 el inciso (a) muestra que $Ra=1.7 \times 10^{11}$ arrojó valores máximos y mínimos de temperatura en la pared caliente de 314 K y 311 K en los casos de $+15^\circ$ y -45° , respectivamente, además, el resto de los puntos presentan una inflexión a partir de $x=0.5$ m entre los casos viendo hacia abajo y viendo hacia arriba. El inciso (b) muestra que la temperatura aumentó hasta alcanzar los 328 K en el caso $+15^\circ$ y los demás casos están por arriba de los 320 K en la pared caliente. Finalmente, para $Ra=6.8 \times 10^{11}$, aumentó la temperatura de la pared caliente hasta alcanzar los 349 K en el caso $+15^\circ$, seguido del caso $+30^\circ$ con 340 K. A partir del punto $x=0.5$ m todos los casos tienen un comportamiento parecido a lo largo del perfil de temperatura.

La temperatura en la parte inferior de la cavidad fue medida con el perfil $y=0.5$ m, $z=0.25$ m como se muestra en la Figura 4.12; el inciso (a) muestra que el $Ra=1.7 \times 10^{11}$ dio como resultado una temperatura máxima y mínima en los casos $+15^\circ$ y -45° de 314 K y 312 K, respectivamente y un comportamiento a lo largo del perfil con una diferencia de 2 K. Para $Ra=3.4 \times 10^{11}$ se tuvo un aumento en la temperatura hasta alcanzar los 328 K como máxima y 319 K como mínima en los casos de $+15^\circ$ y -45° , respectivamente. Por último, en el inciso c muestra que la temperatura aumenta hasta los 348 K y 330 K como máxima y mínima en los casos de $+15^\circ$ y -45° , respectivamente, el resto del perfil en $Ra=6.8 \times 10^{11}$ tiene un comportamiento similar en todos los ángulos de inclinación.

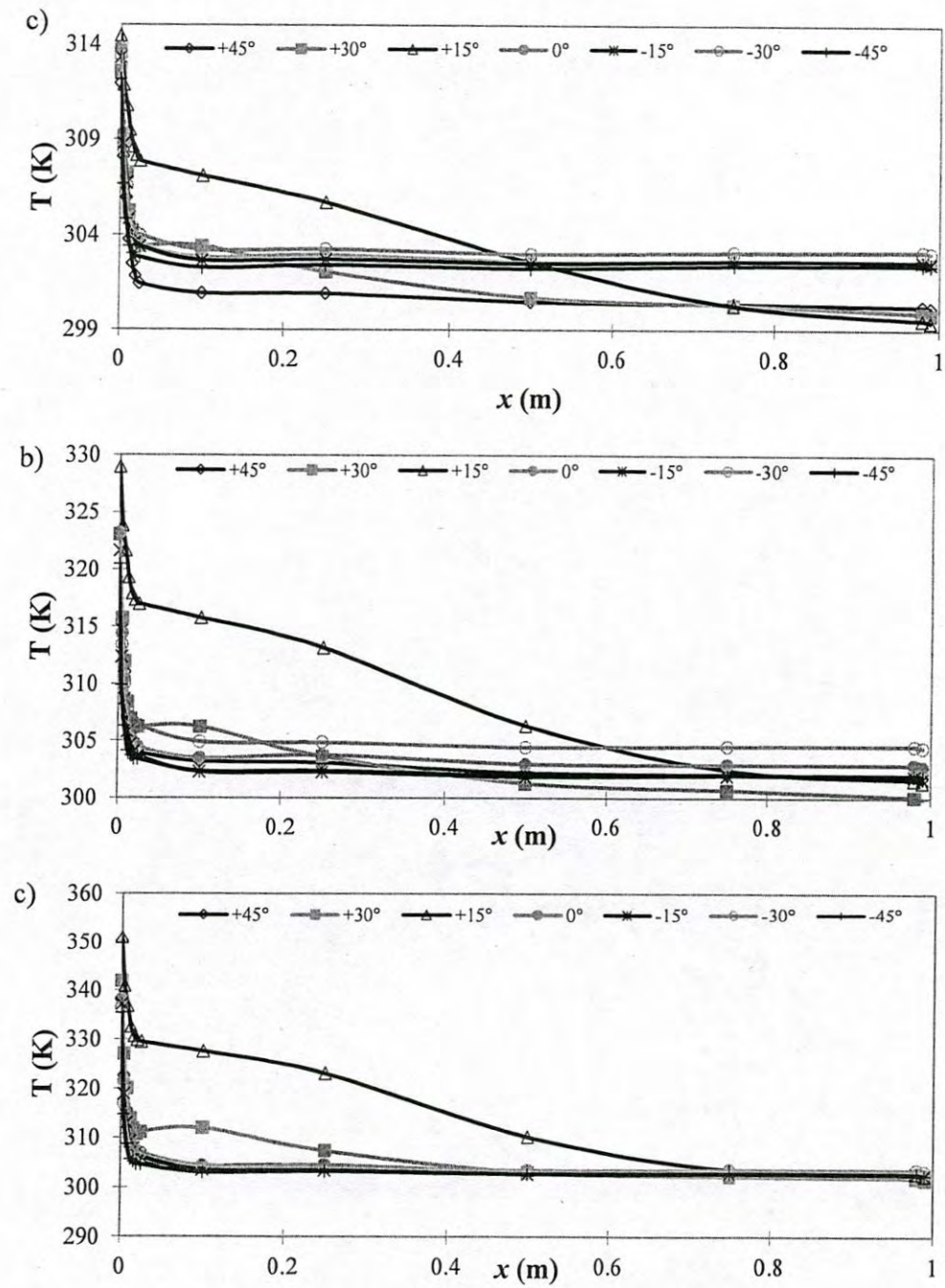


Figura 4.10 Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $y=0.5\text{m}$, $z=0.5\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

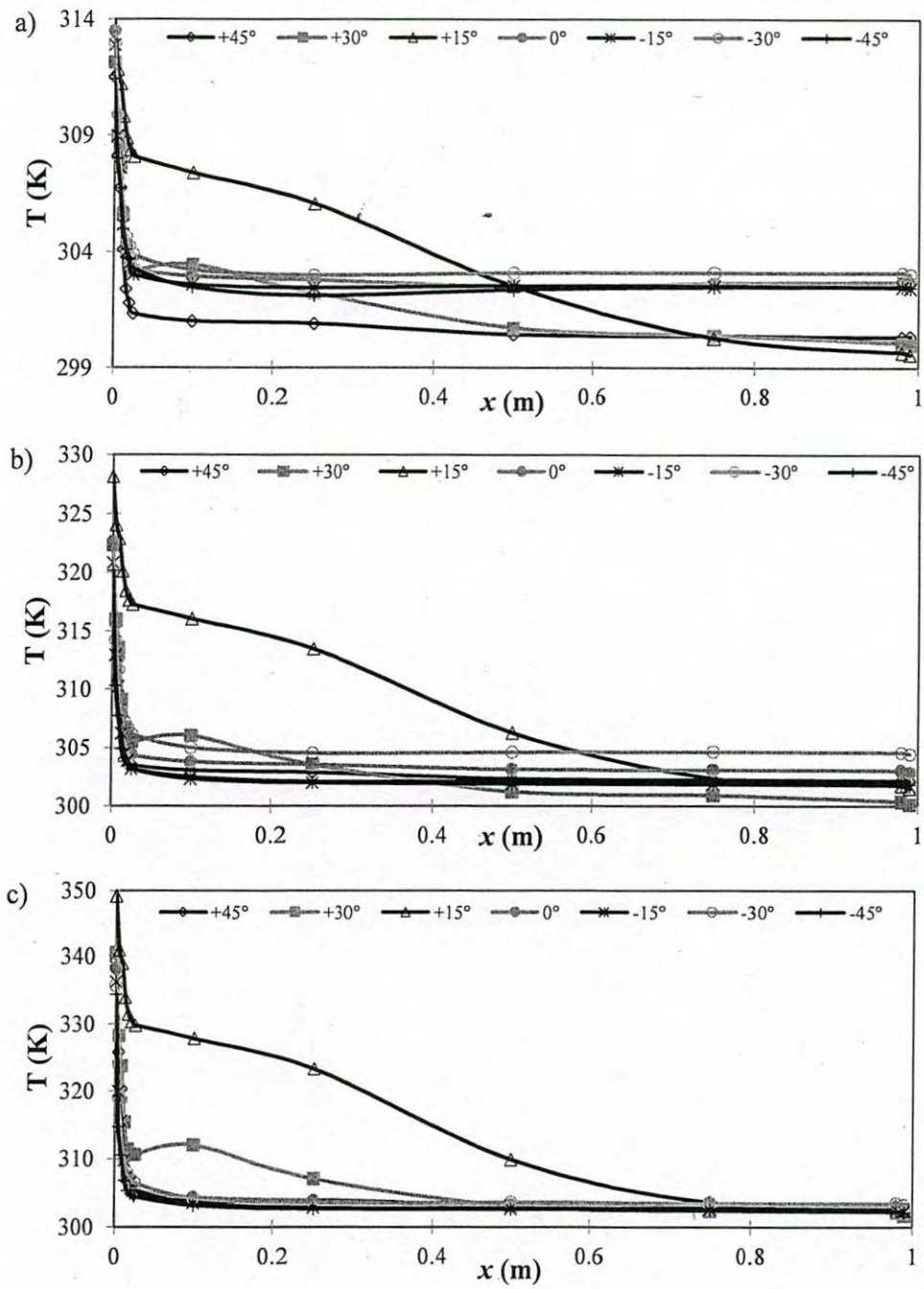


Figura 4.11 Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $y=0.5\text{m}$, $z=0.75\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

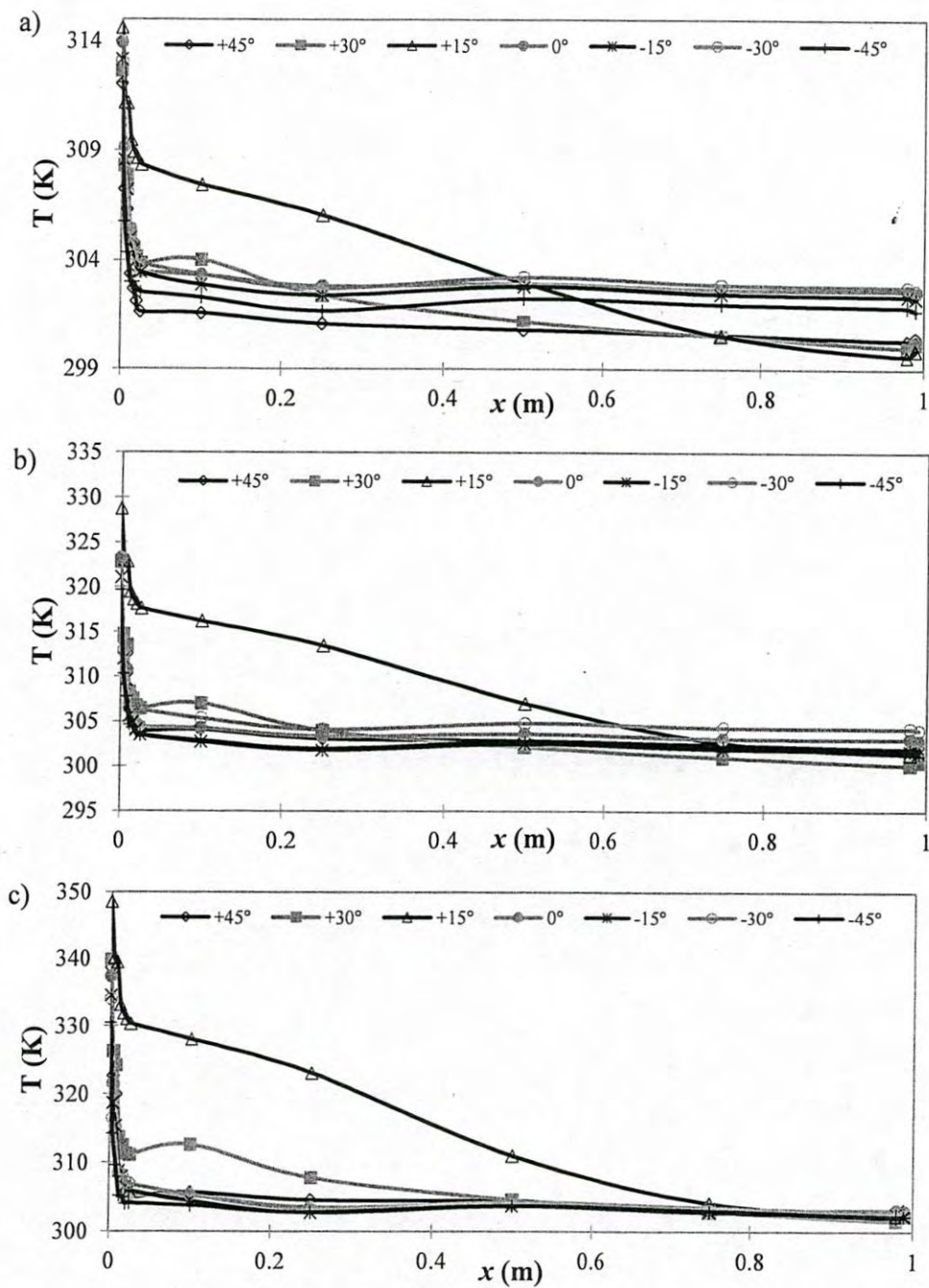


Figura 4.12 Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $y=0.5\text{m}$, $z=0.25\text{m}$: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

En la Figura 4.13 el perfil experimental de temperatura en $y=0.25$ m, $z=0.5$ m muestra que el caso $+15^\circ$ presenta la mayor temperatura en la pared caliente con 312 K y la mínima el caso -45° con 310 K, cuando $Ra=1.7 \times 10^{11}$. El inciso (b), correspondiente a $Ra=3.4 \times 10^{11}$, arroja un resultado de temperatura máxima en la pared caliente correspondiente al caso $+15^\circ$ con un valor de 324 K y una temperatura mínima de 317 K en el caso -45° . A partir del punto $x=0.5$ m el caso -30° tiene valores mayores de temperatura que el resto de los casos. Finalmente para $Ra=6.8 \times 10^{11}$, la temperatura en la pared caliente alcanza un valor máximo de 342 K en el caso $+15^\circ$ y un mínimo de 327 K en el caso -45° , para el resto del perfil los valores varían poco entre ellos.

El comportamiento de la temperatura del fluido en la corriente de aire que se mueve hacia la salida de la cavidad (en $x=0.5$ m, $z=0.5$ m) se muestra en la Figura 4.14. En el inciso (a) se muestran los valores obtenidos para $Ra=1.7 \times 10^{11}$, donde se observa que los casos con inclinación hacia abajo tienen una pendiente negativa conforme los puntos se acercan a la pared superior mientras que los casos hacia arriba muestran un comportamiento opuesto. El Ra intermedio del inciso (b) muestra una separación en el todos los valores a lo largo del perfil por parte del caso $+15^\circ$ teniendo un valor máximo de 316 K en el punto $x=0.98$ m y un valor mínimo de 313 K en el punto $x=0.996$ m. Por último, el inciso (c), nos muestra el mismo comportamiento de los dos incisos anteriores llegando a un valor máximo de 329 K en el caso $+15^\circ$ y 306 K en el caso -45° en el punto $x=0.98$ m.

En las Tablas 4.1 y 4.2, se presentan los resultados experimentales del coeficiente de transferencia de calor y el número de Nusselt. En ambas cavidades se aprecia que el coeficiente de transferencia de calor y el número de Nusselt, aumentan conforme aumenta la inclinación (para los tres valores de número de Rayleigh). En la cavidad con paredes de aluminio pulido los valores del coeficiente e transferencia de calor se encuentran entre 3.7 W/m² K (Nu=139) para el caso $+45^\circ$ con $Ra=1.7 \times 10^{11}$ y 6.73 W/m² K (Nu=253) en el caso -45° con $Ra=6.8 \times 10^{11}$. Mientras que en la cavidad con las paredes pintadas de negro, los valores del coeficiente de transferencia de calor aumentan desde un mínimo de 4.07 W/m² K (Nu=153) en $+45^\circ$ y $Ra=1.7 \times 10^{11}$, hasta 7.08 W/m² K (Nu=260) -30° y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

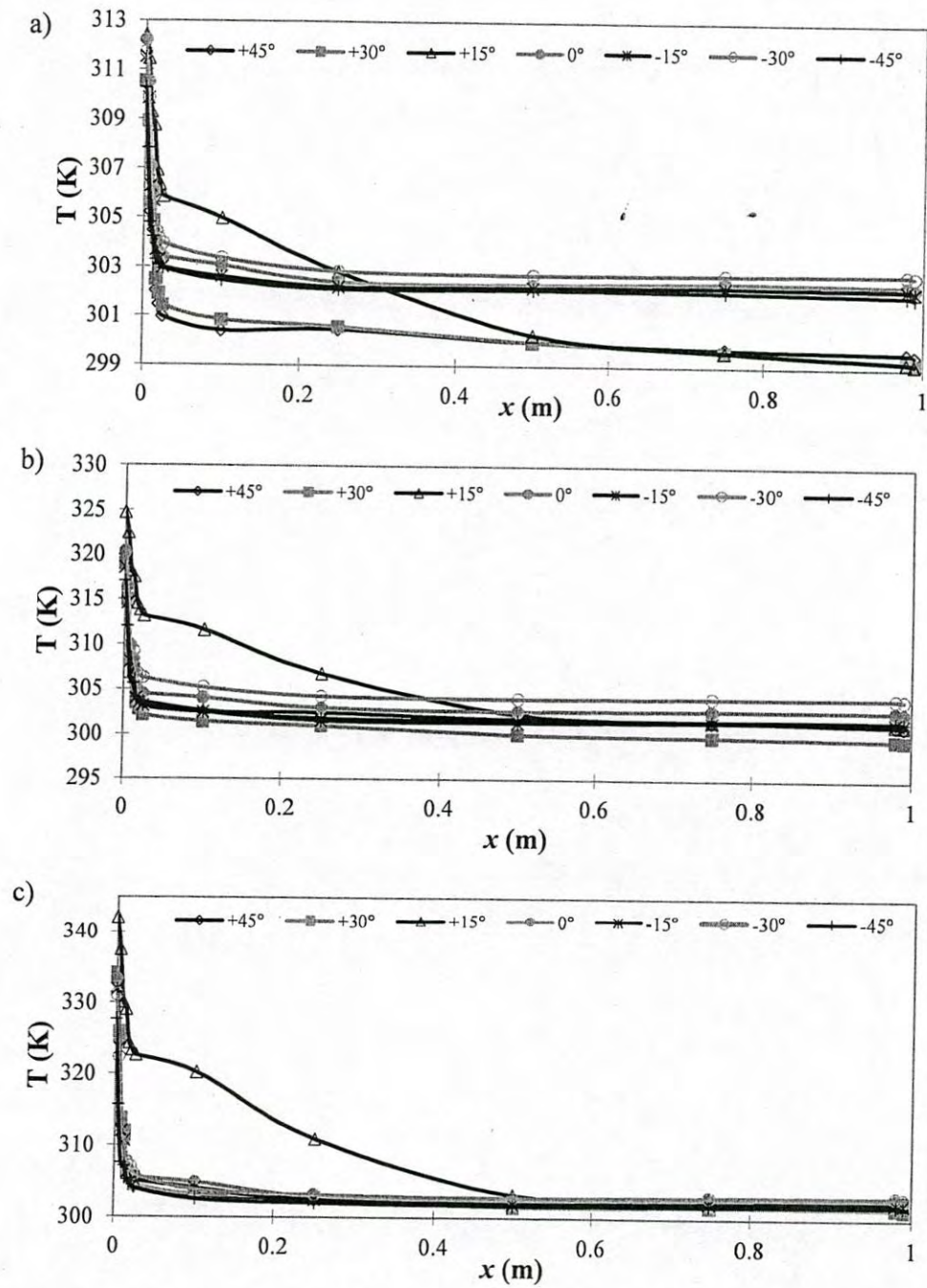


Figura 4.13 Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $y=0.25$ m, $z=0.5$ m: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

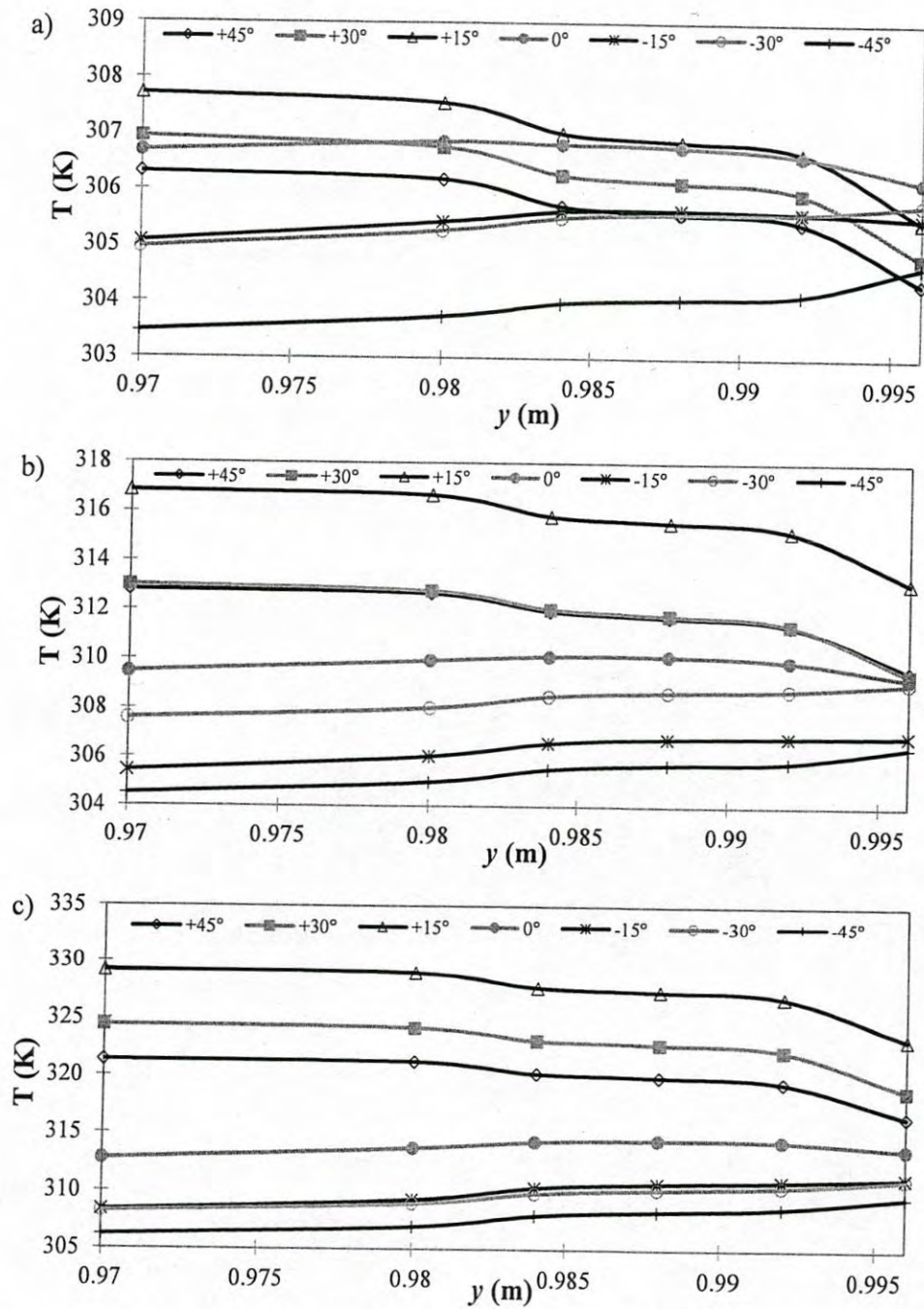


Figura 4.14 Perfiles experimentales de temperatura en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, en $x=0.5$ m, $z=0.5$ m: a) $Ra=1.7 \times 10^{11}$, b) $Ra=3.4 \times 10^{11}$, c) $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

Tabla 4.1 Resultados experimentales del coeficiente de transferencia de calor ($\text{W/m}^2 \text{K}$).

Caso	$Ra=1.7 \times 10^{11}$	$Ra=3.4 \times 10^{11}$	$Ra=6.8 \times 10^{11}$
$\varepsilon=0.05$			
+45°	3.70	4.16	4.48
+30°	4.23	4.74	5.18
+15°	4.37	5.05	5.64
0°	4.67	5.41	5.97
-15°	4.93	5.60	6.27
-30°	5.03	5.88	6.57
-45°	5.21	6.00	6.73
$\varepsilon=0.9$			
+45°	4.07	4.22	4.74
+30°	4.62	4.94	5.56
+15°	4.91	5.39	6.08
0°	5.14	5.70	6.46
-15°	5.23	5.82	6.78
-30°	5.44	6.13	6.93
-45°	5.47	6.15	7.08

Tabla 4.2 Resultados experimentales del número de Nusselt.

Caso	$Ra=1.7 \times 10^{11}$	$Ra=3.4 \times 10^{11}$	$Ra=6.8 \times 10^{11}$
$\varepsilon=0.05$			
+45°	139	156	168
+30°	159	178	195
+15°	164	190	212
0°	175	203	224
-15°	185	210	235
-30°	189	221	247
-45°	196	225	253
$\varepsilon=0.9$			
+45°	153	159	178
+30°	173	186	209
+15°	184	203	228
0°	196	214	236
-15°	197	219	255
-30°	204	230	260
-45°	206	231	266

4.2 Comparación de resultados numéricos obtenidos con diferentes modelos de turbulencia y los datos experimentales.

4.2.1 Cavidad abierta con paredes cubiertas con aluminio pulido.

En la Tabla 4.3 se presenta los resultados de la comparación numérico-experimental en el perfil $y=0.25$ m, $z=0.5$ m, para un número de $Ra=1.7 \times 10^{11}$ y los tres ángulos de inclinación hacia abajo. Para el caso de $+15^\circ$ la diferencia máxima la presenta el modelo $sk\omega$ con 1.7%, el resto de los puntos en todos los modelos de turbulencia presenta diferencias menores a la unidad. La desviación estándar de los datos experimentales va desde 0.06 hasta 0.09. La inclinación de $+30^\circ$ aumenta la diferencia hasta un 2% para el mismo modelo que la inclinación anterior, además, en la pared caliente ($x=0$ m) se encuentran las diferencias mayores en todos los modelos y para este caso la desviación estándar de los datos experimentales va desde 0.07 hasta 0.43. Finalmente, la inclinación $+45^\circ$ disminuye la desviación estándar de los datos experimentales alcanzando un máximo de 0.19 y un mínimo de 0.04. La máxima diferencia la presenta el modelo rke_t con un 4.7% y la mínima el modelo $sk\omega$ con 0.4%.

La comparación del perfil $y=0.5$ m, $z=0.25$ m para $Ra=1.7 \times 10^{11}$ se presenta en la Tabla 4.4 donde la inclinación $+15^\circ$ muestra un valor máximo y mínimo en la desviación estándar de los datos experimentales de 0.15 y 0.05, respectivamente. La mayor diferencia fue en el modelo $sk\omega$ con un 1.6%, seguido del $sstk\omega$ con 1.2% y del modelo rsm con 1%. El resto de los modelos tuvo diferencias porcentuales por debajo de la unidad a lo largo de todo el perfil. En la inclinación intermedia ($+30^\circ$) la diferencia máxima fue de 2.2% en el modelo $sk\omega$. La desviación estándar de los datos experimentales estuvo en el intervalo de 0.05 hasta 0.22. Para la inclinación de $+45^\circ$ la desviación máxima y mínima de los datos experimentales fue de 0.16 y 0.03, respectivamente. La diferencia porcentual aumentó hasta 4% en el modelo ske_t manteniéndose por arriba del 2% en la mayoría de los puntos del perfil en todos los modelos.

Tabla 4.3 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.25m$, $z=0.5m$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	$sk\epsilon_t$	dif %	$rk\epsilon_t$	dif %	$rngk\epsilon_t$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	$sstk\omega$	dif %
+15°													
0	308.7±0.09	310.8	0.7	311.3	0.8	310.4	0.5	310.9	0.7	313.9	1.7	313.2	1.4
0.004	306.3±0.09	305.6	0.2	305.5	0.3	305.7	0.2	304.6	0.6	307.4	0.4	306.4	0.0
0.008	303.9±0.08	302.6	0.4	302.7	0.4	302.5	0.5	302.6	0.4	303.3	0.2	303.2	0.2
0.012	302.9±0.08	301.0	0.6	301.0	0.6	300.7	0.7	301.7	0.4	301.9	0.3	302.0	0.3
0.016	301.6±0.07	300.0	0.5	299.9	0.6	299.7	0.6	301.2	0.1	301.3	0.1	301.6	0.0
0.02	300.8±0.06	299.5	0.4	299.2	0.5	299.2	0.5	300.8	0.0	301.0	0.1	301.4	0.2
0.03	300.0±0.06	298.8	0.4	298.6	0.5	298.6	0.5	300.3	0.1	300.7	0.2	301.1	0.4
0.5	299.8±0.06	298.3	0.5	298.3	0.5	298.3	0.5	299.3	0.2	299.9	0.0	299.9	0.0
0.98	299.7±0.07	298.3	0.5	298.3	0.5	298.2	0.5	298.7	0.3	299.1	0.2	299.2	0.2
0.99	299.5±0.07	298.3	0.4	298.3	0.4	298.2	0.4	298.7	0.3	299.1	0.1	299.2	0.1
+30°													
0	311.8±0.07	315.1	1.1	315.4	1.2	314.9	1.0	317.8	1.9	318.0	2.0	315.1	1.1
0.004	308.9±0.29	310.3	0.5	310.0	0.4	310.0	0.4	312.4	1.2	311.3	0.8	306.9	0.6
0.008	307.5±0.43	307.2	0.1	307.4	0.0	306.9	0.2	308.6	0.4	306.9	0.2	304.6	1.0
0.012	306.1±0.41	305.4	0.2	305.9	0.1	305.0	0.3	306.6	0.2	305.1	0.3	303.5	0.8
0.016	304.9±0.37	304.4	0.1	304.9	0.0	304.0	0.3	305.5	0.2	304.2	0.2	302.8	0.7
0.02	303.9±0.30	303.9	0.0	304.3	0.1	303.4	0.2	304.9	0.3	303.8	0.0	302.4	0.5
0.03	302.9±0.17	303.4	0.2	303.4	0.2	303.0	0.0	304.1	0.4	303.3	0.1	301.9	0.3
0.5	302.7±0.09	302.1	0.2	302.0	0.3	302.0	0.2	303.1	0.1	302.6	0.1	300.7	0.7
0.98	302.5±0.08	302.0	0.1	301.9	0.2	301.0	0.5	302.2	0.1	302.1	0.1	300.8	0.6
0.99	302.3±0.09	302.0	0.1	301.9	0.1	300.1	0.7	302.2	0.1	302.1	0.1	300.8	0.5
+45°													
0	313.1±0.05	323.0	3.2	327.8	4.7	320.2	2.3	318.4	1.7	311.8	0.4	309.0	1.3
0.004	311.8±0.04	318.2	2.0	316.5	1.5	316.9	1.6	314.1	0.7	305.0	2.2	303.8	2.6
0.008	310.7±0.05	315.1	1.4	314.1	1.1	314.7	1.3	312.7	0.6	302.3	2.7	302.1	2.8
0.012	309.9±0.05	313.3	1.1	313.0	1.0	313.1	1.1	312.0	0.7	301.5	2.7	301.4	2.7
0.016	309.0±0.05	312.2	1.0	312.3	1.0	312.0	1.0	311.6	0.8	301.1	2.6	301.1	2.5
0.02	308.1±0.05	311.7	1.2	311.7	1.2	311.1	1.0	311.3	1.0	301.0	2.3	301.0	2.3
0.03	307.3±0.05	311.6	1.4	310.8	1.1	309.6	0.8	310.9	1.2	300.8	2.1	300.8	2.1
0.5	302.5±0.11	301.6	0.3	302.5	0.0	302.9	0.1	302.7	0.1	300.0	0.8	300.1	0.8
0.98	301.9±0.14	301.6	0.1	301.3	0.2	301.2	0.2	301.5	0.1	300.1	0.6	300.1	0.6
0.99	301.6±0.19	301.7	0.0	301.3	0.1	301.2	0.1	301.5	0.0	300.1	0.5	300.1	0.5

Tabla 4.4 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5m$, $z=0.25m$)
con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	$sk\epsilon_t$	dif %	rke_t	dif %	$rngk\epsilon_t$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	sstk ω	dif %
+15°													
0	311.1±0.09	312.2	0.3	312.4	0.4	311.6	0.2	314.2	1.0	316.2	1.6	315.0	1.2
0.004	306.2±0.09	306.4	0.1	306.7	0.2	306.5	0.1	309.1	1.0	309.3	1.0	306.6	0.1
0.008	305.6±0.11	303.7	0.6	303.9	0.6	303.8	0.6	305.9	0.1	305.1	0.1	304.4	0.4
0.012	303.1±0.15	302.2	0.3	302.2	0.3	302.1	0.3	304.1	0.3	303.3	0.1	303.3	0.1
0.016	302.4±0.12	301.2	0.4	301.1	0.4	301.0	0.4	303.2	0.3	302.5	0.0	302.7	0.1
0.02	301.2±0.08	300.6	0.2	300.4	0.3	300.3	0.3	302.6	0.5	302.0	0.3	302.4	0.4
0.03	300.0±0.05	299.7	0.1	299.4	0.2	299.3	0.2	301.8	0.6	301.4	0.5	301.8	0.6
0.5	299.6±0.06	298.4	0.4	298.3	0.4	298.3	0.4	299.7	0.0	300.2	0.2	300.2	0.2
0.98	299.7±0.05	298.4	0.4	298.3	0.5	298.3	0.5	298.9	0.3	299.2	0.1	299.3	0.1
0.99	299.5±0.06	298.4	0.4	298.3	0.4	298.3	0.4	298.8	0.2	299.2	0.1	299.2	0.1
+30°													
0	314.8±0.05	319.0	1.3	317.3	0.8	318.7	1.2	320.4	1.8	321.6	2.2	315.6	0.3
0.004	310.0±0.07	314.4	1.4	313.4	1.1	313.6	1.2	315.1	1.6	312.9	0.9	309.2	0.3
0.008	309.9±0.06	311.5	0.5	311.4	0.5	311.1	0.4	311.7	0.6	309.6	0.1	305.4	1.4
0.012	307.6±0.10	309.8	0.7	310.2	0.8	309.6	0.7	309.5	0.6	307.9	0.1	304.0	1.2
0.016	307.1±0.12	308.8	0.6	309.4	0.8	308.7	0.5	308.2	0.4	306.8	0.1	303.3	1.2
0.02	306.0±0.16	308.3	0.8	308.8	0.9	308.0	0.7	307.4	0.5	306.0	0.0	303.0	1.0
0.03	304.6±0.22	308.2	1.2	307.9	1.1	307.2	0.8	306.9	0.8	304.6	0.0	302.6	0.7
0.5	302.4±0.08	302.7	0.1	303.9	0.5	302.2	0.1	303.6	0.4	303.1	0.2	300.8	0.5
0.98	302.4±0.10	302.4	0.0	302.0	0.1	302.0	0.1	302.0	0.1	302.3	0.0	300.8	0.5
0.99	302.2±0.10	302.7	0.1	302.0	0.1	302.0	0.1	301.6	0.2	302.3	0.0	300.8	0.5
+45°													
0	316.0±0.03	328.7	4.0	328.2	3.9	327.0	3.5	328.2	3.9	311.3	1.5	308.1	2.5
0.004	311.8±0.04	324.1	4.0	323.6	3.8	322.6	3.5	322.6	3.5	304.6	2.3	303.0	2.8
0.008	311.5±0.04	321.1	3.1	320.4	2.9	319.9	2.7	319.7	2.6	302.1	3.0	301.9	3.1
0.012	310.4±0.04	319.2	2.8	318.4	2.6	318.2	2.5	318.2	2.5	301.4	2.9	301.5	2.9
0.016	310.1±0.03	318.1	2.6	317.2	2.3	317.2	2.3	317.5	2.4	301.1	2.9	301.2	2.9
0.02	309.5±0.04	317.4	2.5	316.5	2.2	316.7	2.3	317.2	2.5	301.0	2.8	301.1	2.7
0.03	308.2±0.04	316.7	2.7	316.0	2.5	316.2	2.6	317.0	2.9	300.7	2.4	300.8	2.4
0.5	303.1±0.16	306.7	1.2	308.4	1.7	307.9	1.6	307.1	1.3	300.0	1.0	300.1	1.0
0.98	302.0±0.15	301.9	0.0	301.3	0.2	301.1	0.3	301.7	0.1	300.1	0.6	300.1	0.6
0.99	301.9±0.13	302.1	0.1	301.2	0.2	300.9	0.3	301.7	0.1	300.1	0.6	300.1	0.6

El perfil $y=0.5$ m, $z=0.5$ m de la cavidad ($Ra=1.7 \times 10^{11}$), fue comparado con los modelos de turbulencia como se muestra en la Tabla 4.5. En la inclinación de $+15^\circ$ la máxima diferencia fue para el modelo $sk\omega$ con 1.4% y el resto de los modelos tuvieron diferencias por debajo de la unidad a lo largo de todo el perfil. La desviación estándar de los datos experimentales fue desde un 0.05 hasta 0.15. En el caso de $+30^\circ$ la diferencia aumenta teniendo un máximo y mínimo de 1.8% y 0.4% en los modelos rsm y $sstk\omega$, respectivamente. La desviación estándar oscila entre 0.05 y 0.28 en los datos experimentales. Finalmente, el caso de $+45^\circ$ presentó diferencias mayores de hasta 4.1% en los modelos $sk\varepsilon_t$ y $rk\varepsilon_t$ en la pared caliente. Todos los modelos tuvieron diferencias por arriba del 2% en los puntos dentro de la capa límite (hasta $x=0.03$ m). En cuanto a la desviación estándar de los datos experimentales fue desde 0.02 hasta 0.18.

La comparación en el perfil $y=0.5$ m, $z=0.75$ m para el $Ra=1.7 \times 10^{11}$, se presenta en la Tabla 4.6. El caso $+15^\circ$ presenta desviaciones estándares experimentales entre 0.04 y 0.08; la comparación presentó diferencias porcentuales por debajo de la unidad en todos los modelos y puntos, exceptuando el modelo $sk\omega$ en el punto $x=0$ m con un valor de 1.5%. En el caso $+30^\circ$ la diferencia porcentual en la pared es mayor a la unidad en todos los casos excepto para $sstk\omega$, en el resto de los puntos del perfil hay un incremento en la diferencia porcentual comparado con el caso $+15^\circ$. De igual manera, la desviación estándar aumenta hasta alcanzar 0.27 y la mínima fue de 0.05. Por último, la inclinación $+45^\circ$ aumentó la diferencia promedio en todos los puntos dentro de la capa límite teniendo un valor máximo de 4.5% en el modelo $sk\varepsilon_t$ y una mínima en el modelo $sstk\omega$ con 1.7%, así también, los puntos hasta $x=0.03$ m arrojaron diferencias por arriba del 2% en todos los modelos. Además, la desviación estándar fue de 0.03 desde $x=0$ m hasta $x=0.03$ m y los puntos restantes alcanzaron un valor máximo de 0.15.

Tabla 4.5 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5m$, $z=0.5m$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	sk_{ϵ_t}	dif %	rk_{ϵ_t}	dif %	$rngk_{\epsilon_t}$	dif %	rsm	dif %	sk_{ω}	dif %	$sstk_{\omega}$	dif %
+15°													
0	311.1±0.09	311.8	0.2	312.0	0.3	311.2	0.0	313.3	0.7	315.5	1.4	313.9	0.9
0.004	308.8±0.09	306.6	0.7	306.9	0.6	306.8	0.7	307.3	0.5	308.8	0.0	306.6	0.7
0.008	305.4±0.11	303.8	0.5	303.8	0.5	303.9	0.5	304.9	0.2	304.6	0.3	304.3	0.4
0.012	303.6±0.15	302.1	0.5	302.0	0.5	302.1	0.5	303.6	0.0	303.0	0.2	303.2	0.1
0.016	302.3±0.12	301.1	0.4	300.9	0.4	300.9	0.4	302.8	0.2	302.3	0.0	302.6	0.1
0.02	301.3±0.08	300.5	0.3	300.2	0.3	300.2	0.4	302.2	0.3	301.9	0.2	302.1	0.3
0.03	300.2±0.05	299.6	0.2	299.3	0.3	299.2	0.3	301.4	0.4	301.4	0.4	301.6	0.5
0.5	299.8±0.06	298.4	0.5	298.3	0.5	298.3	0.5	299.8	0.0	300.1	0.1	300.1	0.1
0.98	299.7±0.05	298.4	0.4	298.3	0.5	298.3	0.5	298.9	0.3	299.3	0.1	299.3	0.1
0.99	299.7±0.06	298.4	0.4	298.3	0.5	298.3	0.5	298.9	0.3	299.2	0.1	299.3	0.1
+30°													
0	314.6±0.05	318.5	1.3	319.6	1.6	318.3	1.2	320.1	1.8	319.8	1.7	316.0	0.4
0.004	312.3±0.06	314.4	0.7	313.1	0.3	313.3	0.3	314.9	0.9	313.8	0.5	307.4	1.5
0.008	309.5±0.13	311.6	0.7	310.6	0.4	310.5	0.3	311.1	0.5	309.8	0.1	305.1	1.4
0.012	307.9±0.18	309.7	0.6	309.3	0.5	308.9	0.3	308.7	0.3	307.3	0.2	304.0	1.3
0.016	306.7±0.15	308.6	0.6	308.5	0.6	308.0	0.4	307.4	0.2	305.9	0.3	303.4	1.1
0.02	305.7±0.17	308.0	0.7	308.0	0.7	307.4	0.6	306.7	0.3	305.1	0.2	302.9	0.9
0.03	304.9±0.28	307.8	1.0	307.3	0.8	307.0	0.7	306.1	0.4	304.9	0.0	302.4	0.8
0.5	302.3±0.07	303.4	0.4	303.0	0.2	302.1	0.1	305.1	0.9	303.2	0.3	300.7	0.5
0.98	302.4±0.10	302.0	0.1	302.0	0.1	302.0	0.1	302.3	0.0	303.1	0.2	300.7	0.6
0.99	302.7±0.09	302.0	0.2	302.0	0.2	302.0	0.2	302.3	0.1	303.6	0.3	300.7	0.6
+45°													
0	315.8±0.03	328.9	4.1	328.7	4.1	327.4	3.7	327.7	3.8	308.8	2.2	308.5	2.3
0.004	313.7±0.02	324.3	3.4	323.9	3.3	323.4	3.1	323.1	3.0	303.3	3.3	303.1	3.4
0.008	312.3±0.03	321.3	2.9	320.8	2.7	320.6	2.7	320.3	2.6	302.1	3.3	301.6	3.4
0.012	311.2±0.03	319.5	2.6	318.9	2.5	318.7	2.4	318.8	2.4	301.5	3.1	301.2	3.2
0.016	310.3±0.03	318.4	2.6	317.7	2.4	317.5	2.3	318.0	2.5	301.2	2.9	301.0	3.0
0.02	309.6±0.03	317.8	2.7	317.0	2.4	316.7	2.3	317.6	2.6	301.0	2.8	300.9	2.8
0.03	308.6±0.03	317.6	2.9	316.5	2.6	316.1	2.4	317.5	2.9	300.8	2.5	300.7	2.6
0.5	303.3±0.18	305.0	0.6	308.0	1.6	307.1	1.3	306.1	0.9	300.0	1.1	300.1	1.1
0.98	301.9±0.13	301.6	0.1	301.5	0.1	301.2	0.2	301.4	0.2	300.0	0.6	300.1	0.6
0.99	302.2±0.11	301.5	0.2	301.4	0.2	301.1	0.4	301.0	0.4	300.1	0.7	300.1	0.7

Tabla 4.6 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5m$, $z=0.75m$)
con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	sk_{ϵ_t}	dif %	rk_{ϵ_t}	dif %	$rngk_{\epsilon_t}$	dif %	rsm	dif %	sk_{ω}	dif %	$sstk_{\omega}$	dif %
+15°													
0	310.7±0.08	312.1	0.5	312.4	0.6	311.8	0.4	311.4	0.3	315.3	1.5	313.4	0.9
0.004	309.1±0.08	306.5	0.9	306.9	0.7	306.8	0.7	306.5	0.9	308.4	0.2	306.8	0.8
0.008	304.7±0.07	303.7	0.3	303.8	0.3	303.7	0.4	303.4	0.5	304.5	0.1	304.3	0.1
0.012	302.9±0.06	302.2	0.3	302.1	0.3	301.9	0.3	302.2	0.2	302.8	0.0	303.1	0.1
0.016	302.1±0.06	301.2	0.3	301.0	0.3	300.9	0.4	301.7	0.1	302.1	0.0	302.4	0.1
0.02	300.6±0.05	300.5	0.0	300.3	0.1	300.3	0.1	301.4	0.3	301.7	0.4	302.0	0.5
0.03	299.7±0.04	299.6	0.0	299.4	0.1	299.4	0.1	300.9	0.4	301.3	0.5	301.5	0.6
0.5	299.2±0.07	298.4	0.3	298.3	0.3	298.3	0.3	299.7	0.2	300.0	0.3	300.0	0.2
0.98	299.3±0.05	298.4	0.3	298.3	0.3	298.3	0.3	298.9	0.1	299.2	0.0	299.3	0.0
0.99	299.0±0.06	298.4	0.2	298.3	0.2	298.3	0.2	298.9	0.0	299.2	0.1	299.3	0.1
+30°													
0	314.0±0.05	318.9	1.5	320.3	2.0	318.4	1.4	319.3	1.7	319.6	1.8	314.4	0.1
0.004	313.2±0.06	313.6	0.1	312.5	0.2	312.8	0.1	314.2	0.3	313.9	0.2	308.3	1.6
0.008	309.1±0.12	310.9	0.6	310.0	0.3	310.3	0.4	310.1	0.3	309.0	0.0	304.8	1.4
0.012	307.4±0.16	309.4	0.6	308.8	0.4	309.0	0.5	308.0	0.2	307.1	0.1	303.6	1.2
0.016	306.5±0.15	308.5	0.6	308.1	0.5	308.1	0.5	307.0	0.2	306.2	0.1	303.1	1.1
0.02	305.1±0.18	308.0	1.0	307.6	0.8	307.6	0.8	306.6	0.5	305.7	0.2	302.7	0.8
0.03	304.5±0.27	307.8	1.1	307.0	0.8	307.0	0.8	306.1	0.5	305.3	0.3	302.3	0.7
0.5	302.0±0.08	302.9	0.3	302.5	0.2	302.3	0.1	304.9	1.0	303.1	0.4	300.7	0.4
0.98	301.9±0.12	302.2	0.1	302.0	0.0	302.0	0.0	302.3	0.1	302.3	0.1	300.7	0.4
0.99	301.8±0.11	302.2	0.1	302.0	0.1	302.0	0.1	302.3	0.2	302.3	0.2	300.7	0.4
+45°													
0	315.2±0.03	329.4	4.5	328.9	4.3	326.7	3.6	330.6	4.9	310.7	1.4	309.8	1.7
0.004	314.2±0.03	324.9	3.4	324.0	3.1	322.5	2.6	325.2	3.5	304.6	3.0	304.0	3.2
0.008	311.8±0.03	321.8	3.2	320.8	2.9	319.7	2.5	321.8	3.2	303.0	2.8	302.1	3.1
0.012	310.8±0.03	319.9	2.9	318.7	2.6	317.9	2.3	319.6	2.8	302.2	2.8	301.5	3.0
0.016	310.1±0.03	318.6	2.7	317.5	2.4	316.8	2.2	318.4	2.7	301.8	2.7	301.2	2.9
0.02	309.0±0.03	317.8	2.9	316.8	2.5	316.3	2.4	317.8	2.8	301.5	2.4	301.1	2.6
0.03	308.2±0.03	316.9	2.8	316.2	2.6	316.4	2.7	317.5	3.0	301.1	2.3	300.9	2.4
0.5	303.0±0.14	303.4	0.1	306.9	1.3	307.4	1.4	305.3	0.8	300.1	1.0	300.1	1.0
0.98	301.4±0.15	301.0	0.1	301.2	0.1	301.4	0.0	302.2	0.3	300.0	0.5	300.1	0.5
0.99	301.3±0.15	300.6	0.2	301.0	0.1	301.4	0.1	302.6	0.5	300.0	0.4	300.1	0.4

La Tabla 4.7 presenta la comparación en el perfil $y=0.75\text{ m}$, $z=0.5\text{ m}$, donde el caso $+45^\circ$ tiene desviaciones estándar desde 0.02 hasta 0.15. Las diferencias máximas se encuentran en la pared caliente con 5.6% para el modelo $sk\epsilon_t$ y mínima de 1.7% para el modelo $sk\omega$; los puntos dentro de la capa límite presentan las mayores diferencias en todos los modelos estudiados. En el caso $+30^\circ$ las diferencias máximas bajan hasta alcanzar un 3.2% en $sk\epsilon_t$ y una mínima de 0.1% en la pared caliente, mientras que el resto del perfil las diferencias bajan a 2.4% como máxima hasta valores nulos de diferencia; la desviación estándar de los datos experimentales va desde 0.04 hasta 0.14. La inclinación $+15^\circ$ presenta diferencias máximas de 1.4% a 0.4% en la pared caliente en los modelos $sk\omega$ y $rngk\epsilon_t$, respectivamente. En tanto que la desviación estándar va desde 0.04 hasta 0.11.

El resultado de la comparación en el perfil $y=0.9\text{ m}$, $z=0.5\text{ m}$, se muestra en la Tabla 4.8. El caso $+15^\circ$ presentó una diferencia máxima en la pared caliente de 3% en el modelo $sk\omega$ y una mínima para el modelo $rngk\epsilon_t$ de 1.7%. Después del punto $x=0.004\text{ m}$, todos los modelos presentan una diferencia por debajo de la unidad, excepto $sk\epsilon_t$, el cual tiene una diferencia de 1.1% en el punto $x=0.03\text{ m}$. La desviación estándar de los datos experimentales va desde 0.04 hasta 0.17. A su vez, la inclinación de $+30^\circ$ aumenta hasta 5.5% la diferencia máxima en la pared caliente en el modelo $sk\epsilon_t$ y una mínima de 2.2% en el modelo $sstk\omega$. El resto de los puntos del perfil, hasta $x=0.5\text{ m}$, da diferencias porcentuales por arriba de la unidad. La desviación estándar va desde 0.04 hasta 0.08. Finalmente, la inclinación de $+45^\circ$ aumenta la diferencia hasta un 8% para el modelo $sk\epsilon_t$ y un mínimo de 0.3% para el modelo $sk\omega$ en la pared caliente, el resto de los puntos del perfil presenta diferencias desde un 2.2% hasta un 6.7% entre todos los modelos. En cambio, la desviación estándar alcanza un valor máximo de 0.13 hasta un mínimo de 0.3.

Tabla 4.7 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.75m$, $z=0.5m$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	sk_{ϵ_t}	dif %	rk_{ϵ_t}	dif %	$rngk_{\epsilon_t}$	dif %	rsm	dif %	sko	dif %	$sstk_{ko}$	dif %
+15°													
0	312.2±0.08	313.5	0.4	313.4	0.4	313.2	0.3	315.4	1.0	316.4	1.4	314.2	0.6
0.004	308.1±0.10	308.0	0.0	308.6	0.2	308.1	0.0	310.0	0.6	310.0	0.6	306.7	0.5
0.008	306.5±0.11	305.5	0.3	305.6	0.3	305.4	0.4	306.9	0.1	305.7	0.2	304.7	0.6
0.012	304.7±0.09	304.1	0.2	303.9	0.3	303.8	0.3	304.9	0.1	304.1	0.2	303.7	0.3
0.016	302.9±0.10	303.2	0.1	302.9	0.0	302.9	0.0	303.8	0.3	303.3	0.2	303.1	0.1
0.02	301.6±0.08	302.6	0.3	302.3	0.2	302.3	0.2	303.3	0.6	302.9	0.4	302.8	0.4
0.03	300.6±0.06	301.9	0.4	301.8	0.4	301.7	0.4	302.6	0.7	302.3	0.6	302.2	0.6
0.5	299.7±0.05	299.8	0.1	300.0	0.1	300.7	0.3	300.8	0.4	300.8	0.4	300.4	0.2
0.98	299.8±0.04	298.6	0.4	298.4	0.5	298.4	0.5	299.6	0.1	299.4	0.2	299.3	0.2
0.99	299.6±0.08	298.6	0.3	298.4	0.4	298.4	0.4	299.5	0.0	299.3	0.1	299.3	0.1
+30°													
0	316.3±0.04	326.2	3.2	324.9	2.7	324.2	2.5	323.8	2.4	325.3	2.9	315.9	0.1
0.004	313.3±0.07	320.9	2.4	320.7	2.4	319.3	1.9	319.3	1.9	318.9	1.8	308.6	1.5
0.008	312.2±0.08	318.4	2.0	317.3	1.6	316.6	1.4	317.6	1.7	315.4	1.0	305.6	2.1
0.012	311.0±0.08	317.1	2.0	315.5	1.5	315.0	1.3	316.6	1.8	313.7	0.9	304.5	2.1
0.016	309.9±0.10	316.3	2.0	314.9	1.6	314.2	1.4	316.0	2.0	313.2	1.1	303.9	1.9
0.02	309.3±0.12	315.8	2.1	314.9	1.8	313.9	1.5	315.5	2.0	313.3	1.3	303.6	1.9
0.03	308.6±0.14	315.3	2.2	315.4	2.2	313.9	1.7	314.8	2.0	314.0	1.8	303.1	1.8
0.5	304.0±0.12	310.2	2.0	308.2	1.4	309.0	1.7	307.8	1.3	305.3	0.4	300.9	1.0
0.98	302.7±0.08	302.6	0.0	302.3	0.1	302.2	0.2	302.7	0.0	301.4	0.4	300.7	0.7
0.99	302.4±0.09	302.6	0.1	302.3	0.0	302.2	0.1	302.7	0.1	300.3	0.7	300.7	0.6
+45°													
0	317.0±0.02	334.7	5.6	334.1	5.4	332.9	5.0	332.7	4.9	311.7	1.7	309.5	2.4
0.004	314.6±0.03	330.4	5.0	329.7	4.8	328.6	4.4	327.7	4.2	305.1	3.0	303.9	3.4
0.008	313.7±0.03	327.7	4.4	326.9	4.2	325.7	3.8	324.5	3.4	302.4	3.6	302.3	3.6
0.012	312.7±0.03	325.9	4.2	325.3	4.0	323.9	3.6	322.5	3.2	301.7	3.5	301.6	3.5
0.016	311.7±0.03	324.8	4.2	324.3	4.1	322.8	3.6	321.5	3.1	301.4	3.3	301.3	3.3
0.02	311.1±0.03	324.2	4.2	323.8	4.1	322.1	3.5	321.0	3.2	301.2	3.2	301.1	3.2
0.03	310.2±0.05	323.5	4.3	323.2	4.2	321.4	3.6	321.1	3.5	300.9	3.0	300.9	3.0
0.5	306.1±0.04	309.9	1.3	312.1	2.0	312.9	2.2	314.2	2.7	300.1	2.0	300.1	2.0
0.98	302.1±0.15	302.2	0.0	302.0	0.0	301.9	0.1	302.1	0.0	300.0	0.7	300.1	0.7
0.99	301.8±0.15	302.1	0.1	301.7	0.0	302.0	0.1	301.9	0.0	300.0	0.6	300.1	0.6

Tabla 4.8 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.9\text{m}$, $z=0.5\text{m}$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	$sk\epsilon_t$	dif %	$rk\epsilon_t$	dif %	$rngk\epsilon_t$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	sstk ω	dif %
+15°													
0	309.7±0.10	316.6	2.2	317.5	2.5	314.9	1.7	317.4	2.5	318.9	3.0	316.2	2.1
0.004	308.5±0.06	312.3	1.2	311.5	1.0	311.8	1.1	312.1	1.2	311.5	1.0	309.4	0.3
0.008	307.1±0.07	309.6	0.8	308.8	0.5	309.5	0.8	308.9	0.6	308.0	0.3	306.0	0.4
0.012	305.7±0.10	308.1	0.8	307.5	0.6	307.9	0.7	306.8	0.4	306.1	0.1	304.5	0.4
0.016	305.2±0.12	307.3	0.7	307.0	0.6	306.8	0.5	305.7	0.1	305.0	0.1	303.8	0.5
0.02	304.4±0.13	307.1	0.9	306.8	0.8	306.2	0.6	305.0	0.2	304.4	0.0	303.4	0.3
0.03	304.2±0.17	307.5	1.1	306.9	0.9	305.8	0.5	304.5	0.1	304.1	0.0	303.1	0.4
0.5	303.7±0.07	306.6	1.0	305.8	0.7	306.3	0.9	302.6	0.3	302.1	0.5	300.9	0.9
0.98	299.7±0.04	299.8	0.0	299.4	0.1	300.6	0.3	299.5	0.0	299.4	0.1	299.3	0.1
0.99	299.7±0.04	299.6	0.0	299.3	0.1	300.4	0.2	298.7	0.3	299.4	0.1	299.3	0.1
+30°													
0	313.1±0.07	330.4	5.5	329.0	5.1	328.5	4.9	330.4	5.5	330.2	5.5	319.9	2.2
0.004	314.0±0.04	326.7	4.0	324.1	3.2	323.7	3.1	326.2	3.9	324.2	3.2	311.9	0.7
0.008	313.2±0.06	324.2	3.5	321.3	2.6	321.0	2.5	323.7	3.4	320.7	2.4	309.2	1.3
0.012	312.0±0.06	322.6	3.4	319.8	2.5	319.6	2.4	322.4	3.3	319.0	2.2	307.9	1.3
0.016	311.9±0.07	321.6	3.1	319.1	2.3	319.1	2.3	321.7	3.2	318.4	2.1	306.9	1.6
0.02	311.1±0.07	321.1	3.2	318.8	2.5	319.1	2.6	321.5	3.3	318.4	2.4	306.2	1.6
0.03	310.6±0.07	320.9	3.3	318.9	2.7	319.7	2.9	321.5	3.5	319.5	2.9	304.9	1.8
0.5	307.7±0.04	312.4	1.5	310.9	1.1	312.4	1.5	312.4	1.5	313.5	1.9	301.0	2.2
0.98	302.5±0.08	304.8	0.8	305.4	1.0	304.5	0.7	302.7	0.1	303.1	0.2	300.7	0.6
0.99	302.5±0.08	304.4	0.6	305.5	1.0	304.5	0.7	302.2	0.1	303.2	0.2	300.7	0.6
+45°													
0	314.4±0.03	339.6	8.0	338.1	7.5	337.4	7.3	336.0	6.9	315.3	0.3	311.6	0.9
0.004	314.7±0.03	335.9	6.7	333.5	6.0	333.6	6.0	332.2	5.6	309.1	1.8	305.5	2.9
0.008	314.2±0.03	333.4	6.1	330.9	5.3	330.9	5.3	329.9	5.0	305.5	2.8	303.0	3.6
0.012	313.1±0.03	331.8	6.0	329.2	5.1	329.2	5.1	328.5	4.9	303.8	3.0	302.3	3.5
0.016	313.1±0.04	330.8	5.7	327.9	4.7	328.1	4.8	327.6	4.6	303.0	3.2	302.0	3.6
0.02	312.3±0.05	330.2	5.7	327.0	4.7	327.5	4.9	327.2	4.8	302.7	3.1	301.8	3.4
0.03	311.7±0.05	329.9	5.8	325.3	4.4	327.1	5.0	326.6	4.8	302.3	3.0	301.6	3.3
0.5	307.6±0.03	315.7	2.6	314.3	2.2	315.3	2.5	317.3	3.2	300.1	2.4	300.1	2.4
0.98	302.2±0.13	304.6	0.8	305.4	1.1	302.7	0.2	302.7	0.2	300.0	0.7	300.1	0.7
0.99	302.2±0.13	304.3	0.7	305.1	1.0	302.5	0.1	302.1	0.0	300.0	0.7	300.1	0.7

En el caso del $Ra=6.8 \times 10^{11}$ las Tablas 4.9 a 4.14 presentan la comparación con los modelos de turbulencia mencionados. La Tabla 4.9 muestra el perfil $y=0.25$ m, $z=0.5$ m en el que la inclinación $+15^\circ$ tuvo una diferencia máxima y mínima de 6.1% y 0.8% con los modelos $sstk\omega$ y $sk\epsilon_t$, respectivamente. La desviación estándar de los datos experimentales fue de 0.08 hasta 0.95 y la comparación a lo largo del perfil muestra que la mayoría de los puntos en el perfil tienen diferencias porcentuales menores a la unidad. A su vez, la inclinación $+30^\circ$ tuvo una diferencia máxima y mínima en la pared caliente de 4.7% y 0.3% con los modelos $sk\omega$ y $sstk\omega$, respectivamente. La desviación estándar fue de 0.11 hasta 1.59 y los modelos tuvieron diferencias menores a la unidad excepto $sstk\omega$ a lo largo de todo el perfil. Finalmente, la inclinación $+45^\circ$ aumento la diferencia máxima a 7.7% con el modelo $sk\epsilon_t$ y una mínima de 0.4% con el modelo $sstk\omega$ en la pared caliente. La desviación estándar fue de 0.10 hasta 0.32 y el comportamiento a lo largo del perfil indica que el modelo con mayor diferencia fue el $sstk\omega$.

El perfil $y=0.5$ m, $z=0.25$ m se muestra en la Tabla 4.10. La inclinación $+15^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima en la pared caliente de 7% y 0.8% con los modelos $sstk\omega$ y $rngk\epsilon_t$, respectivamente. La desviación estándar de los datos experimentales fue de 0.14 hasta 0.53 y el comportamiento a lo largo del perfil muestra que los modelos $k-\epsilon_t$ tuvieron la menor diferencia. La inclinación $+30^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima en la pared caliente de 6.1% y 2.6% con los modelos rsm y $rngk\epsilon_t$, respectivamente. La desviación estándar fue de 0.07 hasta 0.49 y el modelo $sk\omega$ tuvo la menor diferencia a lo largo de todo el perfil. Finalmente, la inclinación $+45^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima en la comparación en la pared caliente de 12% y 1% con los modelos rsm y $sstk\omega$, respectivamente. La desviación estándar fue de 0.06 hasta 0.39 y el modelo $sk\omega$ tuvo la menor diferencia a lo largo de todo el perfil.

El perfil $y=0.5$ m, $z=0.5$ m se muestra en la Tabla 4.11, en donde la inclinación $+15^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima en la pared caliente con los modelos $sstk\omega$ y $rngk\epsilon_t$ con un 8.2% y 0.3%, respectivamente.

Tabla 4.9 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.25\text{m}$, $z=0.5\text{m}$)
con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	$sk\epsilon_t$	dif %	$rk\epsilon_t$	dif %	$rngk\epsilon_t$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	$sstk\omega$	dif %
+15°													
0	333.2±0.08	335.8	0.8	338.7	1.7	336.0	0.9	339.9	2.0	321.3	3.6	312.8	6.1
0.004	312.0±0.65	318.1	2.0	317.2	1.7	317.3	1.7	320.9	2.8	304.9	2.3	302.5	3.0
0.008	309.6±0.84	309.7	0.0	308.8	0.3	309.6	0.0	310.2	0.2	302.1	2.4	301.5	-2.6
0.012	307.6±0.95	305.5	0.7	304.9	0.9	305.4	0.7	305.8	0.6	301.4	2.0	301.2	2.1
0.016	303.0±0.72	303.4	0.1	302.9	0.0	302.9	0.0	303.8	0.3	301.2	0.6	301.0	0.7
0.02	301.9±0.35	302.1	0.1	301.8	0.0	301.5	0.1	302.8	0.3	301.0	0.3	300.9	0.3
0.03	301.1±0.22	300.7	0.1	300.4	0.2	300.0	0.3	301.6	0.2	300.9	0.1	300.7	0.1
0.5	301.5±0.27	299.6	0.6	299.4	0.7	299.4	0.7	300.5	0.3	300.0	0.5	300.0	0.5
0.98	300.8±0.30	299.5	0.4	299.4	0.5	299.4	0.5	299.8	0.3	300.0	0.3	300.0	0.3
0.99	300.3±0.29	299.5	0.3	299.4	0.3	299.4	0.3	299.8	0.2	300.0	0.1	300.0	0.1
+30°													
0	333.9±0.11	339.8	1.8	341.0	2.1	340.2	1.9	345.1	3.4	349.5	4.7	332.9	0.3
0.004	322.6±0.61	323.1	0.2	322.6	0.0	321.4	0.4	325.2	0.8	325.7	1.0	313.1	2.9
0.008	315.2±1.59	314.3	0.3	314.2	0.3	313.4	0.6	314.4	0.2	313.6	0.5	307.2	2.5
0.012	310.2±1.25	309.6	0.2	309.8	0.1	309.2	0.3	309.3	0.3	309.1	0.3	303.2	2.2
0.016	307.1±0.90	306.9	0.1	307.3	0.1	306.9	0.0	306.8	0.1	307.2	0.0	302.8	1.4
0.02	305.0±0.51	305.4	0.1	305.8	0.3	305.6	0.2	305.4	0.1	306.2	0.4	302.9	0.7
0.03	303.7±0.22	303.8	0.1	304.3	0.2	304.2	0.2	304.1	0.2	305.2	0.5	302.6	0.3
0.5	303.9±0.16	301.8	0.7	301.6	0.8	301.6	0.8	302.6	0.4	303.1	0.3	300.1	1.2
0.98	303.3±0.18	301.7	0.5	301.5	0.6	301.5	0.6	302.2	0.4	302.0	0.4	300.1	1.1
0.99	302.7±0.28	301.7	0.3	301.5	0.4	301.5	0.4	302.2	0.1	302.0	0.2	300.1	0.8
+45°													
0	341.1±0.10	367.4	7.7	363.0	6.4	361.2	5.9	347.0	1.7	357.6	4.8	339.7	0.4
0.004	334.9±0.11	349.4	4.3	349.2	4.3	343.5	2.6	333.1	0.5	333.9	0.3	321.3	4.1
0.008	329.6±0.16	341.7	3.7	341.8	3.7	336.6	2.1	331.8	0.7	321.7	2.4	312.8	5.1
0.012	326.6±0.16	337.4	3.3	337.2	3.3	333.0	2.0	331.2	1.4	316.7	3.0	308.2	5.6
0.016	324.2±0.17	334.6	3.2	334.3	3.1	331.0	2.1	330.9	2.1	314.7	2.9	305.9	5.7
0.02	322.2±0.16	332.6	3.2	332.4	3.1	329.8	2.3	330.7	2.6	313.7	2.6	304.8	5.4
0.03	321.1±0.14	329.5	2.6	329.9	2.7	328.4	2.3	330.5	2.9	312.7	2.6	303.8	5.4
0.5	305.1±0.12	302.6	0.8	302.7	0.8	305.7	0.2	306.7	0.5	303.9	0.4	300.4	1.5
0.98	303.7±0.24	302.0	0.6	301.7	0.7	301.8	0.6	302.3	0.5	302.0	0.6	300.2	1.2
0.99	302.8±0.32	302.0	0.3	301.7	0.3	301.8	0.3	302.2	0.2	302.0	0.3	300.2	0.8

Tabla 4.10 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5\text{m}$, $z=0.25\text{m}$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	$sk\epsilon_t$	dif %	$rk\epsilon_t$	dif %	$rngk\epsilon_t$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	$sstk\omega$	dif %
+15°													
0	336.6±0.14	339.7	0.9	339.6	0.9	339.3	0.8	343.4	2.0	317.8	5.6	312.9	7.0
0.004	323.3±0.32	320.6	0.8	321.7	0.5	321.0	0.7	324.0	0.2	304.5	5.8	302.4	6.5
0.008	323.0±0.31	312.9	3.1	313.6	2.9	313.0	3.1	314.2	2.7	302.6	6.3	301.5	6.7
0.012	310.1±0.46	308.8	0.4	309.2	0.3	308.7	0.5	310.0	0.0	301.8	2.7	301.2	2.9
0.016	307.8±0.66	306.4	0.4	306.4	0.4	306.0	0.6	307.8	0.0	301.4	2.1	301.0	2.2
0.02	304.1±0.53	304.8	0.2	304.6	0.2	304.3	0.1	306.6	0.8	301.1	1.0	300.9	1.1
0.03	302.1±0.23	302.7	0.2	302.1	0.0	302.0	0.0	305.0	1.0	300.8	0.4	300.7	0.5
0.5	301.4±0.25	299.8	0.6	299.5	0.6	299.5	0.6	302.1	0.2	300.0	0.5	300.0	0.5
0.98	301.2±0.34	299.7	0.5	299.5	0.6	299.5	0.6	300.2	0.3	300.0	0.4	300.0	0.4
0.99	300.9±0.23	299.7	0.4	299.5	0.5	299.5	0.5	300.2	0.2	300.0	0.3	300.0	0.3
+30°													
0	339.7±0.04	351.8	3.6	352.2	3.7	348.7	2.6	360.4	6.1	357.6	5.3	329.3	3.1
0.004	328.7±0.15	333.5	1.4	331.8	0.9	330.6	0.6	344.4	4.8	334.0	1.6	313.3	4.7
0.008	328.6±0.13	325.7	0.9	324.2	1.3	322.8	1.8	334.1	1.7	322.3	1.9	305.5	7.0
0.012	318.3±0.21	321.8	1.1	320.4	0.7	318.8	0.2	327.9	3.0	316.5	0.6	302.4	5.0
0.016	315.9±0.32	319.7	1.2	318.2	0.7	316.6	0.2	324.6	2.7	313.7	0.7	301.9	4.5
0.02	312.7±0.49	318.6	1.9	316.8	1.3	315.4	0.9	323.0	3.3	312.4	0.1	302.3	3.3
0.03	310.7±0.071	318.2	2.4	315.4	1.5	314.4	1.2	323.3	4.1	311.9	0.4	303.6	2.3
0.5	304.0±0.07	303.9	0.0	301.7	0.8	302.3	0.6	308.2	1.4	304.8	0.2	300.6	1.1
0.98	304.2±0.20	302.0	0.7	301.6	0.8	301.6	0.8	302.0	0.7	302.6	0.5	290.4	4.5
0.99	303.5±0.19	302.0	0.5	301.6	0.6	301.6	0.6	301.1	0.8	302.5	0.3	281.7	7.2
+45°													
0	347.4±0.07	381.5	9.8	379.9	9.3	379.2	9.2	391.1	12	372.9	7.3	343.9	1.0
0.004	338.4±0.07	365.6	8.1	362.0	7.0	363.0	7.3	369.7	9.3	351.9	4.0	317.6	6.1
0.008	337.5±0.06	356.2	5.5	353.4	4.7	355.0	5.2	361.3	7.0	339.3	0.5	311.5	7.7
0.012	332.5±0.11	351.0	5.6	348.9	4.9	350.5	5.4	356.9	7.4	333.2	0.2	308.9	7.1
0.016	331.2±0.11	348.4	5.2	346.5	4.6	347.9	5.1	354.3	7.0	330.7	0.1	307.3	7.2
0.02	328.9±0.14	347.2	5.6	345.5	5.0	346.4	5.3	352.7	7.2	330.0	0.3	306.4	6.9
0.03	325.5±0.14	346.8	6.5	345.4	6.1	345.1	6.0	350.6	7.7	330.4	1.5	304.9	6.3
0.5	307.3±0.23	320.4	4.3	310.5	1.0	314.5	2.3	317.9	3.4	306.4	0.3	300.4	2.2
0.98	304.5±0.39	301.4	1.0	302.0	0.8	302.1	0.8	302.7	0.6	302.5	0.6	300.2	1.4
0.99	304.1±0.27	300.3	1.3	302.0	0.7	302.1	0.7	302.7	0.5	302.5	0.5	300.2	1.3

La desviación estándar fue de 0.10 hasta 0.85. La inclinación $+30^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima en la pared caliente de 4.8% y 1.4% con los modelos $sst\kappa_\omega$ y $rng\kappa_\epsilon$, respectivamente. La desviación estándar fue de 0.07 hasta 1.02 y el comportamiento en todo el perfil muestra que el modelo $sk\omega$ tuvo la menor diferencia. Por último, la inclinación $+45^\circ$ tuvo diferencias máximas de 9% y 2.8% en la pared caliente con los modelos rsm y $sst\kappa_\omega$, respectivamente. La desviación estándar fue de 0.09 hasta 0.38 y el comportamiento en todo el perfil muestra que el modelo $sst\kappa_\omega$ tuvo la mayor diferencia.

La Tabla 4.12 muestra el perfil $y=0.5$ m, $z=0.75$ m, en el cual la inclinación $+15^\circ$ presentó una diferencia máxima y mínima en la pared caliente de 7.5% y 0.3% con los modelos $sk\omega$ y $rng\kappa_\epsilon$, respectivamente. La desviación estándar fue de 0.09 hasta 0.71 y el comportamiento a lo largo del perfil indicó que el modelo $rng\kappa_\epsilon$ tuvo la menor diferencia. La inclinación $+30^\circ$ tuvo una diferencia máxima de 4.8% con el modelo $sk\omega$ y una mínima de 2.3% con el modelo $rng\kappa_\epsilon$. La desviación estándar fue de 0.06 hasta 0.71 y el comportamiento en todo el perfil tuvo al modelo $sk\omega$ con la mínima diferencia entre todos los modelos. Finalmente, la inclinación $+45^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima de 13% y 1.5% con los modelos $rng\kappa_\epsilon$ y $sst\kappa_\omega$, respectivamente. La desviación estándar fue de 0.06 hasta 0.31 y el comportamiento a lo largo del perfil tuvo al modelo $rng\kappa_\epsilon$ con la mayor diferencia entre todos.

El perfil $y=0.75$ m, $z=0.5$ m en la Tabla 4.13, muestra que en la inclinación $+15^\circ$ la mayor y menor diferencia en la pared caliente fue con los modelos $sst\kappa_\omega$ y $sk\epsilon_t$ con 8.4% y 0.2%, respectivamente. La desviación estándar fue de 0.11 hasta 0.63 y el modelo $rk\epsilon_t$ tuvo la menor diferencia a lo largo del perfil. La inclinación $+30^\circ$ tuvo diferencia máxima y mínima de 8.5% y 4.3% con los modelos rsm y $rng\kappa_\epsilon$, respectivamente. La desviación estándar de los datos experimentales fue de 0.14 hasta 0.47 y el modelo rsm tuvo la mayor diferencia lo largo del perfil. Por último, la inclinación $+45^\circ$ tuvo una diferencia máxima de 14% con el modelo rsm y una mínima de 2.7% con el modelo $sst\kappa_\omega$. La desviación estándar fue de 0.09 hasta 0.51 y el modelo rsm tuvo la mayor diferencia en todo el perfil.

Tabla 4.11 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5\text{m}$, $z=0.5\text{m}$)
con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	$sk\epsilon_t$	dif %	rke_t	dif %	$rngk\epsilon_t$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	sstk ω	dif %
+15°													
0	339.8±0.10	338.7	0.3	338.6	0.3	338.6	0.4	345.9	1.8	320.2	5.8	312.1	8.2
0.004	329.4±0.23	320.0	2.9	321.7	2.3	320.8	2.6	326.6	0.9	303.5	7.9	302.1	8.3
0.008	315.5±0.75	312.6	0.9	313.3	0.7	312.6	0.9	315.8	0.1	302.0	4.3	301.3	4.5
0.012	309.2±0.85	308.7	0.2	308.7	0.2	308.2	0.3	310.6	0.5	301.4	2.5	301.0	2.6
0.016	305.4±0.56	306.3	0.3	305.9	0.2	305.7	0.1	308.0	0.9	301.1	1.4	300.9	1.5
0.02	303.2±0.43	304.8	0.5	304.1	0.3	304.0	0.3	306.5	1.1	300.9	0.8	300.8	0.8
0.03	301.7±0.20	302.6	0.3	301.8	0.0	301.9	0.0	304.7	1.0	300.6	0.4	300.6	0.4
0.5	300.6±0.28	299.7	0.3	299.5	0.4	299.5	0.4	301.8	0.4	300.0	0.2	300.0	0.2
0.98	301.1±0.26	299.7	0.5	299.5	0.5	299.5	0.5	300.3	0.3	300.0	0.4	300.0	0.4
0.99	301.2±0.28	299.7	0.5	299.5	0.6	299.5	0.6	300.3	0.3	300.0	0.4	300.0	0.4
+30°													
0	343.8±0.12	351.0	2.1	349.8	1.8	348.7	1.4	350.9	2.1	355.8	3.5	327.1	4.8
0.004	334.5±0.18	332.8	0.5	331.9	0.8	330.3	1.3	332.4	0.6	335.5	0.3	311.0	7.0
0.008	321.5±0.46	325.3	1.2	323.5	0.6	322.7	0.4	326.5	1.6	321.5	0.0	306.5	4.7
0.012	316.0±0.53	321.6	1.8	319.1	1.0	318.8	0.9	323.7	2.4	315.8	0.1	304.5	3.7
0.016	313.0±0.39	319.7	2.1	316.7	1.2	316.6	1.1	322.2	2.9	313.7	0.2	303.4	3.1
0.02	311.6±0.56	318.7	2.3	315.5	1.3	315.4	1.2	321.3	3.1	313.0	0.5	302.8	2.8
0.03	312.0±1.02	318.4	2.1	315.0	1.0	314.6	0.8	320.3	2.7	312.8	0.3	302.0	3.2
0.5	302.8±0.07	303.3	0.2	302.5	0.1	306.6	1.2	309.0	2.0	304.9	0.7	300.1	0.9
0.98	303.3±0.23	302.0	0.4	301.7	0.5	301.6	0.5	302.6	0.2	302.6	0.2	300.1	1.1
0.99	304.4±0.17	302.0	0.8	301.7	0.9	301.6	0.9	302.5	0.6	302.6	0.6	300.1	1.4
+45°													
0	351.6±0.10	378.8	7.7	376.5	7.1	377.4	7.3	383.1	9.0	372.2	5.9	341.7	2.8
0.004	344.1±0.09	363.8	5.7	364.9	6.0	360.2	4.7	373.5	8.5	351.6	2.2	318.6	7.4
0.008	335.8±0.11	355.7	5.9	358.7	6.8	352.9	5.1	355.5	5.9	338.9	0.9	309.8	7.7
0.012	332.1±0.13	351.7	5.9	354.8	6.8	349.0	5.1	350.2	5.4	333.5	0.4	307.2	7.5
0.016	329.5±0.14	349.9	6.2	352.2	6.9	346.7	5.2	348.3	5.7	331.6	0.6	306.1	7.1
0.02	327.9±0.15	349.3	6.5	350.3	6.9	345.3	5.3	347.5	6.0	331.1	1.0	305.4	6.9
0.03	326.2±0.15	348.7	6.9	347.4	6.5	343.8	5.4	346.8	6.3	331.4	1.6	304.4	6.7
0.5	306.2±0.25	319.4	4.3	321.9	5.1	313.1	2.2	309.3	1.0	306.4	0.1	300.4	1.9
0.98	303.6±0.38	294.6	3.0	302.1	0.5	302.1	0.5	302.9	0.2	302.6	0.3	300.2	1.1
0.99	305.0±0.31	287.6	5.7	302.1	0.9	302.1	0.9	302.8	0.7	302.5	0.8	300.2	1.6

Tabla 4.12 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5m$, $z=0.75m$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	$sk\epsilon_t$	dif %	$rk\epsilon_t$	dif %	$rngk\epsilon_t$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	$sstk\omega$	dif %
+15°													
0	338.3±0.09	339.1	0.3	339.1	0.2	339.0	0.2	344.6	1.9	323.3	4.4	312.8	7.5
0.004	332.2±0.16	320.0	3.7	321.2	3.3	321.4	3.3	327.7	1.3	304.3	8.4	302.4	9.0
0.008	314.3±0.61	312.6	0.5	313.3	0.3	312.7	0.5	315.8	0.5	302.4	3.8	301.5	4.1
0.012	308.1±0.71	308.7	0.2	308.9	0.3	308.3	0.1	310.3	0.7	301.7	2.1	301.2	2.2
0.016	305.5±0.47	306.3	0.2	306.1	0.2	305.8	0.1	307.6	0.7	301.3	1.4	301.0	1.5
0.02	302.7±0.32	304.7	0.7	304.3	0.6	304.3	0.5	306.1	1.1	301.1	0.5	300.9	0.6
0.03	301.3±0.18	302.5	0.4	301.8	0.1	302.3	0.3	304.5	1.0	300.8	0.2	300.7	0.2
0.5	300.7±0.19	299.7	0.3	299.5	0.4	299.5	0.4	302.6	0.6	300.0	0.2	300.0	0.2
0.98	300.7±0.31	299.6	0.3	299.5	0.4	299.5	0.4	300.0	0.2	300.0	0.2	300.0	0.2
0.99	300.0±0.28	299.6	0.1	299.5	0.2	299.5	0.2	300.0	0.0	300.0	0.0	300.0	0.0
+30°													
0	341.6±0.08	350.2	2.5	350.8	2.7	349.3	2.3	356.9	4.5	358.1	4.8	332.5	2.6
0.004	336.1±0.05	331.8	1.3	333.1	0.9	330.1	1.8	337.7	0.5	333.2	0.9	312.0	7.2
0.008	322.5±0.26	324.1	0.5	324.3	0.6	322.8	0.1	329.2	2.1	322.7	0.0	307.2	4.7
0.012	316.6±0.36	320.4	1.2	319.6	1.0	319.1	0.8	324.7	2.6	317.3	0.2	305.2	3.6
0.016	314.1±0.38	318.6	1.5	317.1	1.0	317.1	1.0	322.2	2.6	314.4	0.1	304.1	3.2
0.02	311.6±0.60	317.9	2.0	315.9	1.4	315.9	1.4	320.6	2.9	312.8	0.4	303.4	2.6
0.03	311.7±0.71	318.2	2.1	315.3	1.2	314.9	1.0	318.8	2.3	311.9	0.1	302.6	2.9
0.5	303.1±0.06	302.2	0.3	301.9	0.4	305.4	0.8	305.9	1.0	304.9	0.6	300.2	0.9
0.98	303.2±0.27	302.0	0.4	301.6	0.5	301.6	0.5	302.3	0.3	302.6	0.2	300.1	1.0
0.99	302.8±0.22	302.0	0.3	301.6	0.4	301.6	0.4	302.3	0.2	302.5	0.1	300.1	0.9
+45°													
0	349.0±0.08	381.9	9.4	375.8	7.7	394.8	13	380.8	9.1	373.0	6.9	343.9	1.5
0.004	343.9±0.06	367.1	6.7	366.4	6.5	380.1	10	364.1	5.9	350.5	1.9	321.0	6.7
0.008	335.6±0.08	358.1	6.7	359.7	7.2	372.0	10	355.2	5.8	338.7	0.9	313.5	6.6
0.012	332.2±0.11	352.9	6.3	354.8	6.8	368.2	10	351.7	5.9	333.0	0.3	309.9	6.7
0.016	330.1±0.11	350.1	6.1	351.1	6.4	366.5	11	350.3	6.1	330.7	0.2	307.8	6.8
0.02	327.4±0.13	348.7	6.5	348.1	6.3	365.7	11	349.6	6.8	329.9	0.8	306.5	6.4
0.03	325.8±0.12	347.7	6.7	343.0	5.3	365.0	12	349.0	7.1	330.6	1.5	304.6	6.5
0.5	306.7±0.23	316.9	3.3	314.1	2.4	326.6	6.5	310.1	1.1	306.4	0.1	300.4	2.1
0.98	303.8±0.31	296.5	2.4	301.9	0.6	303.3	0.2	303.0	0.3	302.5	0.4	300.1	1.2
0.99	303.1±0.28	291.4	3.9	301.9	0.4	303.3	0.0	303.0	0.1	302.5	0.2	300.1	1.0

Tabla 4.13 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.75\text{m}$, $z=0.5\text{m}$)
con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	$sk\epsilon_t$	dif %	$rk\epsilon_t$	dif %	$rngk\epsilon_t$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	$sstk\omega$	dif %
+15°													
0	341.5±0.11	342.2	0.2	342.6	0.3	345.0	1.1	347.2	1.7	323.0	5.4	312.7	8.4
0.004	325.4±0.39	325.7	0.1	325.9	0.1	323.9	0.5	329.0	1.1	304.0	6.6	302.3	7.1
0.008	318.7±0.54	317.3	0.4	318.7	0.0	317.0	0.5	319.5	0.3	302.2	5.2	301.5	5.4
0.012	312.9±0.59	313.4	0.2	314.8	0.6	313.7	0.3	315.1	0.7	301.5	3.6	301.2	3.7
0.016	307.4±0.54	311.3	1.3	312.3	1.6	311.7	1.4	312.9	1.8	301.2	2.0	301.0	2.1
0.02	304.4±0.50	310.1	1.9	310.7	2.1	310.4	2.0	311.9	2.4	301.0	1.1	300.9	1.2
0.03	303.0±0.63	308.8	1.9	308.7	1.9	308.7	1.9	311.2	2.7	300.8	0.7	300.7	0.7
0.5	301.1±0.23	305.9	1.6	303.2	0.7	306.4	1.8	303.6	0.8	300.0	0.4	300.0	0.4
0.98	301.5±0.29	300.3	0.4	299.8	0.6	299.8	0.6	302.3	0.3	300.0	0.5	300.0	0.5
0.99	301.2±0.29	300.2	0.3	299.8	0.5	299.8	0.5	302.3	0.4	300.0	0.4	300.0	0.4
+30°													
0	348.7±0.14	368.0	5.5	371.7	6.6	363.8	4.3	378.2	8.5	372.1	6.7	333.8	4.3
0.004	336.5±0.43	352.1	4.6	349.3	3.8	350.1	4.0	365.6	8.6	351.1	4.3	309.8	7.9
0.008	332.8±0.41	343.2	3.1	344.3	3.4	341.4	2.6	359.0	7.9	340.0	2.2	306.1	8.0
0.012	328.9±0.36	338.7	3.0	341.8	3.9	336.2	2.2	355.9	8.2	335.0	1.9	304.6	7.4
0.016	325.8±0.38	336.9	3.4	340.3	4.4	333.4	2.3	354.8	8.9	333.5	2.4	303.8	6.8
0.02	324.4±0.43	336.6	3.8	339.1	4.5	332.1	2.4	354.7	9.3	333.7	2.9	303.3	6.5
0.03	323.6±0.47	337.7	4.4	336.6	4.0	332.6	2.8	355.6	9.9	336.2	3.9	302.6	6.5
0.5	308.2±0.25	322.6	4.7	316.0	2.5	320.2	3.9	315.1	2.2	312.4	1.4	300.2	2.6
0.98	304.2±0.25	298.1	2.0	302.2	0.6	301.2	1.0	290.0	4.7	298.3	1.9	300.1	1.4
0.99	303.4±0.27	293.7	3.2	302.2	0.4	300.3	1.0	278.0	8.4	293.3	3.3	300.1	1.1
+45°													
0	354.4±0.09	396.0	11	396.3	11	394.8	11	405.1	14	391.1	10	344.8	2.7
0.004	344.9±0.10	382.3	10	380.2	10	380.1	10	388.3	12	370.8	7.5	320.9	7.0
0.008	342.0±0.12	373.3	9.2	372.2	8.8	372.0	8.8	380.5	11	360.3	5.4	311.7	8.9
0.012	338.5±0.15	368.0	8.7	367.7	8.6	368.2	8.8	376.0	11	355.1	4.9	308.7	8.8
0.016	335.3±0.17	365.2	8.9	364.9	8.8	366.5	9.3	373.1	11	352.7	5.2	307.4	8.3
0.02	333.8±0.18	364.2	9.1	363.1	8.8	365.7	9.6	370.9	11	351.8	5.4	306.6	8.1
0.03	332.2±0.21	365.9	10	360.9	8.7	365.0	9.9	367.5	10	351.7	5.9	305.6	8.0
0.5	318.2±0.10	336.5	5.7	331.6	4.2	326.6	2.6	338.9	6.5	314.4	1.2	300.5	5.6
0.98	304.2±0.51	304.5	0.1	303.0	0.4	303.3	0.3	304.7	0.2	303.4	0.3	300.1	1.3
0.99	303.5±0.51	304.7	0.4	303.0	0.2	303.3	0.1	304.5	0.3	303.3	0.1	300.1	1.1

Finalmente, el perfil $y=0.9$ m, $z=0.5$ m, presente en la Tabla 4.14, muestra que la inclinación $+15^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima de 6.7% y 2.2% con los modelos rsm y $sk\omega$, respectivamente. La desviación estándar fue de 0.10 hasta 0.77 y el comportamiento en todo el perfil tuvo al modelo $sstk\omega$ con la máxima diferencia y a rke_t con la mínima. La inclinación $+30^\circ$ aumentó la diferencia máxima en la pared caliente, hasta un 15% con el modelo $sk\epsilon_t$ y la mínima bajó a 0.1% con el modelo $sstk\omega$. La desviación estándar fue de 0.08 hasta 0.30 y el modelo $sstk\omega$ tuvo la mayor diferencia en todo el perfil. Finalmente, la inclinación $+45^\circ$ tuvo una diferencia máxima y mínima de 21% y 4.5% con los modelos rke_t y $sstk\omega$, respectivamente. La desviación estándar fue de 0.09 hasta 0.51. El comportamiento a lo largo del perfil tuvo al modelo $sstk\omega$ con la menor diferencia y al modelo rke_t con la mayor diferencia.

4.2.2 Cavity abierta con paredes pintadas de negro.

En la Tabla 4.15 se presenta la comparación de temperatura para el perfil $y=0.75$ m, $z=0.5$ m y $Ra=1.7 \times 10^{11}$. La inclinación $+15^\circ$ tiene la máxima diferencia en la pared caliente con 1.3% para el modelo $sk\epsilon_t$ y la mínima el modelo rsm con 1%. La desviación estándar experimental fue de 0.06 hasta 0.42 y el comportamiento en todo el perfil muestra diferencias menores a la unidad en todos los modelos. La inclinación $+30^\circ$ tuvo una diferencia máxima y mínima en la pared caliente con 1.2% y 0.7% en los modelos rsm y $sk\epsilon_t$, respectivamente. El comportamiento de la comparación en todo el perfil muestra diferencias menores a la unidad con todos los modelos y la desviación estándar experimental fue de 0.07 hasta 0.28. Por último, la inclinación $+45^\circ$ tuvo una diferencia máxima y mínima en la pared caliente con los modelos rsm y $rngk\epsilon_t$ con 1.1% y 0.3%, respectivamente. La desviación estándar experimental fue de 0.09 hasta 0.16 y el comportamiento en todo el perfil muestra diferencias por encima de la unidad en la familia de modelos $k-\epsilon_t$.

Tabla 4.14 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.9\text{m}$, $z=0.5\text{m}$) con paredes de aluminio pulido, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	$sk\epsilon_t$	dif %	$rk\epsilon_t$	dif %	$rngk\epsilon_t$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	$sstk\omega$	dif %
+15°													
0	333.0±0.10	351.2	5.5	352.8	5.9	348.2	4.6	355.4	6.7	325.5	2.2	317.1	4.8
0.004	330.0±0.80	336.4	1.9	333.8	1.2	335.5	1.7	339.8	3.0	306.5	7.1	303.8	7.9
0.008	325.2±0.77	328.2	0.9	326.9	0.5	327.4	0.7	330.6	1.7	303.4	6.7	302.2	7.1
0.012	321.5±0.48	324.2	0.8	323.5	0.6	322.7	0.4	325.6	1.3	302.3	6.0	301.6	6.2
0.016	320.5±0.66	322.6	0.7	321.8	0.4	320.2	0.1	323.1	0.8	301.7	5.9	301.3	6.0
0.02	318.7±0.75	322.4	1.2	320.8	0.7	319.4	0.2	322.3	1.1	301.4	5.4	301.1	5.5
0.03	318.1±0.59	323.9	1.8	320.6	0.8	320.7	0.8	322.9	1.5	301.2	5.3	300.9	5.4
0.5	315.6±0.17	319.0	1.1	317.9	0.7	318.2	0.8	325.0	3.0	300.0	4.9	300.0	4.9
0.98	301.3±0.13	302.8	0.5	302.2	0.3	304.2	1.0	299.0	0.8	300.0	0.4	300.0	0.4
0.99	301.4±0.13	297.7	1.2	301.9	0.1	305.1	1.2	295.0	2.1	300.0	0.5	300.0	0.5
+30°													
0	336.6±0.08	387.1	15	376.6	11	379.6	12	377.2	12	385.8	14	337.1	0.1
0.004	341.1±0.21	362.7	6.3	366.9	7.6	364.0	6.7	365.1	7.0	364.9	7.0	315.0	7.7
0.008	338.2±0.30	357.7	5.8	359.1	6.2	355.3	5.1	363.5	7.5	354.6	4.8	308.5	8.8
0.012	334.2±0.23	355.6	6.4	353.0	5.6	351.0	5.0	362.7	8.5	350.5	4.9	306.4	8.3
0.016	333.9±0.24	354.6	6.2	348.3	4.3	349.5	4.7	362.2	8.5	349.8	4.8	305.5	8.5
0.02	332.0±0.25	354.0	6.6	344.6	3.8	349.5	5.3	361.8	9.0	350.6	5.6	305.1	8.1
0.03	331.0±0.24	353.3	6.7	338.8	2.3	352.3	6.4	360.9	9.0	353.4	6.8	304.5	8.0
0.5	321.9±0.12	336.1	4.4	322.4	0.1	329.3	2.3	342.7	6.4	325.4	1.1	300.2	6.7
0.98	303.6±0.09	308.8	1.7	305.1	0.5	308.9	1.8	306.4	0.9	298.7	1.6	300.1	1.2
0.99	303.6±0.09	308.0	1.5	305.4	0.6	303.5	0.0	306.0	0.8	293.0	3.5	300.1	1.2
+45°													
0	344.0±0.09	415.5	20	416.1	21	410.7	19	428.7	24	404.3	17	359.6	4.5
0.004	346.9±0.10	401.3	15	403.7	16	397.1	14	409.1	17	387.5	11	333.4	3.9
0.008	345.1±0.12	393.8	14	395.7	14	389.1	12	403.2	16	377.6	9.4	326.2	5.5
0.012	341.2±0.15	390.1	14	390.8	14	384.8	12	400.4	17	371.6	8.9	322.8	5.4
0.016	341.2±0.17	388.3	13	388.0	13	382.7	12	398.8	16	368.1	7.9	320.7	6.0
0.02	339.0±0.18	387.5	14	386.5	14	381.7	12	397.7	17	366.1	8.0	319.2	5.9
0.03	337.5±0.21	385.7	14	385.5	14	381.1	12	395.9	17	364.5	8.0	316.7	6.2
0.5	324.2±0.10	334.2	3.1	333.8	3.0	337.3	4.1	347.4	7.2	323.0	0.4	300.6	7.3
0.98	304.0±0.51	307.3	1.1	311.1	2.3	308.0	1.3	307.3	1.1	304.2	0.1	300.1	1.3
0.99	303.9±0.51	300.4	1.1	312.7	2.9	307.2	1.1	306.9	1.0	304.0	0.0	300.1	1.2

Tabla 4.15 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo (perfil $y=0.75m$, $z=0.5m$) y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	$rk\epsilon_i$	dif %	$rngk\epsilon_i$	dif %	$sk\epsilon_i$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	sstk ω	dif %
+15°													
0	312.5±0.06	308.7	1.2	308.3	1.3	308.5	1.3	309.3	1.0	309.3	1.0	309.0	1.1
0.004	309.2±0.19	306.5	0.9	306.4	0.9	306.5	0.9	306.5	0.9	306.9	0.8	306.5	0.9
0.008	306.4±0.35	305.0	0.4	304.9	0.5	305.1	0.4	305.1	0.4	305.1	0.4	305.0	0.5
0.012	304.6±0.42	304.0	0.2	303.9	0.2	304.1	0.2	304.3	0.1	304.0	0.2	304.0	0.2
0.016	303.3±0.28	303.3	0.0	303.3	0.0	303.4	0.0	303.8	0.2	303.4	0.0	303.4	0.0
0.02	302.9±0.22	302.9	0.0	303.0	0.0	303.0	0.0	303.5	0.2	303.0	0.0	303.0	0.0
0.025	302.6±0.23	302.6	0.0	302.7	0.0	302.7	0.0	303.2	0.2	302.8	0.0	302.7	0.0
0.1	303.0±0.35	303.3	0.1	303.7	0.2	303.1	0.0	302.7	0.1	303.5	0.2	302.6	0.1
0.25	302.4±0.14	303.0	0.2	302.9	0.2	303.4	0.4	303.7	0.4	303.4	0.3	302.8	0.1
0.5	301.2±0.15	302.1	0.3	302.0	0.3	302.0	0.3	303.3	0.7	302.4	0.4	302.1	0.3
0.75	300.5±0.14	301.3	0.2	301.3	0.3	301.5	0.3	302.0	0.5	301.6	0.4	301.7	0.4
0.98	300.2±0.12	300.8	0.2	300.7	0.2	300.9	0.2	301.6	0.5	301.2	0.3	301.3	0.3
0.99	300.3±0.12	300.8	0.2	300.7	0.1	300.9	0.2	301.6	0.4	301.1	0.3	301.2	0.3
+30°													
0	313.9±0.09	311.8	0.7	311.3	0.8	311.5	0.8	310.1	1.2	311.1	0.9	310.1	1.2
0.004	311.2±0.14	310.5	0.2	310.5	0.2	310.7	0.1	308.5	0.9	309.6	0.5	308.2	1.0
0.008	309.3±0.22	310.0	0.2	309.9	0.2	310.1	0.3	307.4	0.6	308.9	0.1	306.8	0.8
0.012	308.3±0.28	309.7	0.4	309.5	0.4	309.7	0.4	306.7	0.5	308.5	0.1	305.9	0.8
0.016	307.5±0.20	309.5	0.7	309.2	0.6	309.4	0.6	306.3	0.4	308.2	0.2	305.4	0.7
0.02	307.2±0.18	309.4	0.7	309.1	0.6	309.3	0.7	306.1	0.4	308.0	0.3	305.1	0.7
0.025	307.0±0.18	309.3	0.7	309.0	0.6	309.2	0.7	306.0	0.3	307.9	0.3	305.0	0.6
0.1	306.7±0.10	308.7	0.7	308.6	0.6	308.8	0.7	306.0	0.2	307.9	0.4	306.0	0.2
0.25	305.7±0.08	307.9	0.7	307.8	0.7	308.1	0.8	305.9	0.1	306.7	0.3	304.2	0.5
0.5	303.3±0.09	305.4	0.7	305.1	0.6	305.8	0.8	304.1	0.2	303.9	0.2	302.6	0.3
0.75	301.0±0.08	302.2	0.4	302.0	0.3	302.6	0.5	302.0	0.3	301.9	0.3	301.9	0.3
0.98	300.2±0.07	301.0	0.3	301.0	0.3	301.2	0.3	301.5	0.4	301.3	0.4	301.7	0.5
0.99	300.2±0.07	301.0	0.2	301.0	0.3	301.2	0.3	301.6	0.4	301.3	0.3	301.9	0.6
+45°													
0	315.4±0.14	314.4	0.3	314.6	0.3	314.6	0.3	311.9	1.1	313.7	0.5	313.4	0.6
0.004	313.4±0.14	314.2	0.2	314.1	0.2	314.1	0.2	310.6	0.9	312.8	0.2	310.9	0.8
0.008	312.1±0.14	314.0	0.6	313.8	0.5	313.8	0.5	310.0	0.7	312.3	0.1	310.2	0.6
0.012	311.2±0.15	313.8	0.8	313.5	0.7	313.5	0.7	309.7	0.5	312.1	0.3	309.9	0.4
0.016	310.3±0.15	313.7	1.1	313.3	1.0	313.3	1.0	309.4	0.3	311.9	0.5	309.7	0.2
0.02	310.0±0.15	313.6	1.2	313.2	1.0	313.2	1.0	309.3	0.2	311.8	0.6	309.6	0.1
0.025	309.6±0.16	313.5	1.2	313.1	1.1	313.1	1.1	309.1	0.2	311.7	0.7	309.5	0.0
0.1	309.0±0.12	312.6	1.2	312.6	1.2	312.6	1.2	308.5	0.1	311.0	0.7	308.3	0.2
0.25	307.4±0.12	311.7	1.4	311.5	1.3	311.5	1.3	307.4	0.0	309.2	0.6	304.8	0.9
0.5	305.2±0.11	309.6	1.4	309.3	1.3	309.3	1.3	306.1	0.3	304.2	0.3	302.7	0.8
0.75	302.4±0.09	305.4	1.0	304.2	0.6	304.5	0.7	303.8	0.5	301.9	0.2	301.9	0.2
0.98	299.9±0.10	301.5	0.5	301.1	0.4	301.5	0.5	301.9	0.7	301.2	0.4	301.3	0.5
0.99	299.9±0.10	301.6	0.5	301.1	0.4	301.5	0.5	301.9	0.7	301.2	0.4	301.2	0.4

El perfil $y=0.5$ m, $z=0.5$ m es mostrado en la Tabla 4.16, donde la inclinación $+15^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima de 1.4% y 1.1% con los modelos $sstk\omega$ y $sk\omega$, respectivamente. La comparación en todo el perfil muestra diferencias porcentuales menores a la unidad con todos los modelos y la desviación estándar experimental fue de 0.11 hasta 0.44. La inclinación $+30^\circ$ muestra diferencias de 1.5% y 1.1% en la pared caliente con los modelos $sstk\omega$ y rke_t , respectivamente. La desviación estándar de los datos experimentales fue de 0.09 hasta 0.24 y el comportamiento en todos los puntos del perfil muestra diferencias por debajo de la unidad en todos los modelos. Finalmente, la inclinación $+45^\circ$ presenta diferencias máxima y mínima en la pared caliente con los modelos $sstk\omega$ y $rngk\epsilon_t$ con 1.9% y 0.8%, respectivamente. La desviación estándar fue de 0.09 hasta 0.16 y el comportamiento en todos los demás puntos del perfil tuvo diferencias por debajo de la unidad excepto del modelo $sstk\omega$ con puntos con diferencias de hasta 2%.

La Tabla 4.17 muestra el perfil $y=0.5$ m, $z=0.75$ m, en el cual la inclinación $+15^\circ$ tuvo una diferencia máxima y mínima en la pared caliente de 1.2% y 0.8% con los modelos $sk\epsilon_t$ y $sk\omega$, respectivamente; la desviación estándar fue de 0.06 hasta 0.41 y el comportamiento de los demás puntos del perfil muestra diferencias por debajo de la unidad en todos los puntos con todos los modelos. La inclinación $+30^\circ$ muestra diferencias máxima y mínima en la pared caliente con los modelos rsm y rke_t de 0.9% y 0.6%, respectivamente. El comportamiento de los demás puntos del perfil presenta diferencias menores al 1% con todos los modelos y la desviación estándar va de 0.09 hasta 0.30. Finalmente, la inclinación $+45^\circ$ presentó diferencias máxima y mínima en la pared caliente con los modelos $sstk\omega$ y rke_t con 1% y 0%. La desviación estándar fue de 0.10 hasta 0.17 la comparación de los demás puntos del perfil muestra que se alcanzó diferencias mayores al 1% excepto con los modelos rsm y $sk\omega$.

Tabla 4.16 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5m$, $z=0.5m$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	rk_{ϵ_t}	dif %	$rngk_{\epsilon_t}$	dif %	sk_{ϵ_t}	dif %	rsm	dif %	sk_{ω}	dif %	sstk ω	dif %
+15°													
0	311.9±0.23	308.3	1.2	307.6	1.4	307.7	1.4	308.2	1.2	308.4	1.1	307.5	1.4
0.004	308.1±0.34	305.2	0.9	305.3	0.9	305.2	0.9	306.0	0.7	305.5	0.8	304.5	1.2
0.008	305.9±0.44	303.8	0.7	303.7	0.7	303.9	0.7	304.7	0.4	304.1	0.6	303.4	0.8
0.012	303.8±0.30	303.0	0.3	302.7	0.3	303.1	0.2	303.8	0.0	303.3	0.2	302.8	0.3
0.016	302.5±0.37	302.5	0.0	302.1	0.1	302.6	0.0	303.2	0.3	302.8	0.1	302.5	0.0
0.02	301.8±0.21	302.1	0.1	301.8	0.0	302.2	0.1	302.9	0.3	302.5	0.2	302.3	0.2
0.025	301.4±0.18	301.8	0.1	301.5	0.0	301.9	0.2	302.6	0.4	302.2	0.3	302.2	0.2
0.1	300.9±0.12	301.0	0.0	300.9	0.0	301.1	0.1	302.0	0.4	301.7	0.3	301.6	0.2
0.25	300.9±0.12	301.1	0.1	300.9	0.0	301.2	0.1	301.9	0.3	301.6	0.2	301.4	0.2
0.5	300.5±0.11	300.8	0.1	300.7	0.1	300.9	0.2	301.7	0.4	301.4	0.3	301.2	0.2
0.75	300.4±0.12	300.7	0.1	300.7	0.1	300.8	0.1	301.3	0.3	301.1	0.2	300.9	0.2
0.98	300.2±0.12	300.7	0.1	300.6	0.1	300.7	0.2	301.0	0.2	300.8	0.2	300.7	0.2
0.99	300.2±0.13	300.7	0.2	300.6	0.2	300.7	0.2	300.9	0.3	300.8	0.2	300.7	0.2
+30°													
0	312.5±0.09	309.3	1.1	309.1	1.1	309.2	1.1	308.4	1.3	309.2	1.1	307.8	1.5
0.004	309.0±0.13	307.1	0.6	307.0	0.7	307.1	0.6	306.3	0.9	307.0	0.7	305.3	1.2
0.008	307.2±0.18	305.8	0.5	305.7	0.5	305.8	0.4	305.1	0.7	305.4	0.6	303.6	1.2
0.012	305.3±0.23	304.9	0.1	305.1	0.1	305.2	0.0	304.4	0.3	304.3	0.3	303.0	0.7
0.016	304.2±0.16	304.3	0.1	304.7	0.2	304.8	0.2	303.9	0.1	303.7	0.2	302.7	0.5
0.02	303.6±0.24	304.0	0.1	304.5	0.3	304.5	0.3	303.5	0.0	303.4	0.1	302.5	0.4
0.025	303.4±0.21	303.7	0.1	304.3	0.3	304.3	0.3	303.2	0.1	303.1	0.1	302.4	0.3
0.1	303.4±0.20	304.3	0.3	304.7	0.4	304.8	0.5	302.4	0.3	303.7	0.1	301.9	0.5
0.25	302.0±0.10	302.4	0.1	303.1	0.3	303.0	0.3	302.1	0.0	302.6	0.2	301.7	0.1
0.5	300.7±0.10	301.6	0.3	301.8	0.4	301.8	0.4	301.8	0.4	301.7	0.3	301.3	0.2
0.75	300.3±0.10	301.0	0.2	301.1	0.3	301.1	0.3	301.4	0.4	301.3	0.3	301.0	0.2
0.98	299.9±0.12	300.9	0.3	301.0	0.4	301.0	0.4	301.1	0.4	301.1	0.4	300.8	0.3
0.99	299.8±0.13	300.9	0.4	301.0	0.4	301.0	0.4	301.1	0.4	301.1	0.4	300.8	0.3
+45°													
0	314.4±0.14	311.7	0.9	311.9	0.8	311.6	0.9	309.5	1.6	310.9	1.1	308.4	1.9
0.004	311.9±0.13	310.5	0.4	311.2	0.2	310.6	0.4	307.6	1.4	309.4	0.8	305.7	2.0
0.008	310.8±0.14	309.8	0.3	310.6	0.0	309.9	0.3	306.7	1.3	308.9	0.6	304.3	2.1
0.012	309.5±0.15	309.3	0.1	310.3	0.3	309.5	0.0	306.3	1.0	308.5	0.3	303.5	1.9
0.016	308.6±0.14	309.0	0.1	310.1	0.5	309.2	0.2	306.1	0.8	308.2	0.1	303.1	1.8
0.02	308.2±0.16	308.8	0.2	309.9	0.6	309.0	0.3	306.1	0.7	307.9	0.1	302.8	1.7
0.025	307.9±0.16	308.6	0.2	309.7	0.6	308.8	0.3	306.0	0.6	307.6	0.1	302.6	1.7
0.1	307.1±0.12	308.4	0.4	308.3	0.4	307.9	0.3	306.0	0.4	305.6	0.5	302.0	1.7
0.25	305.7±0.12	306.5	0.3	307.4	0.6	305.9	0.1	306.0	0.1	304.0	0.6	301.6	1.3
0.5	302.5±0.09	304.2	0.5	303.5	0.3	303.8	0.4	304.2	0.5	302.0	0.2	301.2	0.4
0.75	300.3±0.09	301.2	0.3	301.5	0.4	301.4	0.4	301.7	0.5	301.5	0.4	301.0	0.2
0.98	299.5±0.09	301.1	0.5	301.2	0.6	301.2	0.5	301.2	0.6	301.2	0.5	300.9	0.4
0.99	299.4±0.10	301.0	0.5	301.3	0.6	301.2	0.6	301.2	0.6	301.1	0.6	300.9	0.5

Tabla 4.17 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo (perfil $y=0.5\text{m}$, $z=0.75\text{m}$) y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	$r_{k\epsilon_i}$	dif %	$r_{ngk\epsilon_i}$	dif %	$s_{k\epsilon_i}$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	$sstk\omega$	dif %
+15°													
0	311.5±0.06	308.6	0.9	308.2	1.1	307.8	1.2	308.8	0.9	308.9	0.8	309.0	0.8
0.004	308.1±0.19	305.7	0.8	305.9	0.7	305.9	0.7	305.3	0.9	306.2	0.6	305.9	0.7
0.008	306.7±0.37	304.1	0.8	304.3	0.8	304.2	0.8	303.9	0.9	304.2	0.8	304.3	0.8
0.012	304.1±0.38	303.2	0.3	303.3	0.3	303.2	0.3	303.2	0.3	303.2	0.3	303.3	0.3
0.016	302.4±0.41	302.6	0.1	302.6	0.1	302.6	0.1	302.8	0.1	302.6	0.1	302.8	0.1
0.02	301.8±0.34	302.2	0.1	302.1	0.1	302.2	0.1	302.5	0.2	302.3	0.2	302.4	0.2
0.025	301.3±0.26	301.8	0.2	301.7	0.1	301.9	0.2	302.3	0.3	302.0	0.2	302.2	0.3
0.1	301.0±0.16	300.9	0.0	300.8	0.0	301.0	0.0	301.5	0.2	301.4	0.1	301.6	0.2
0.25	300.9±0.18	301.0	0.0	300.9	0.0	301.0	0.0	301.5	0.2	301.4	0.2	301.5	0.2
0.5	300.4±0.11	300.7	0.1	300.7	0.1	300.8	0.1	301.3	0.3	301.3	0.3	301.4	0.3
0.75	300.4±0.09	300.7	0.1	300.7	0.1	300.8	0.1	301.2	0.3	301.1	0.3	301.3	0.3
0.98	300.3±0.11	300.6	0.1	300.6	0.1	300.7	0.1	301.1	0.3	300.9	0.2	301.0	0.2
0.99	300.3±0.11	300.6	0.1	300.6	0.1	300.7	0.1	301.1	0.2	300.9	0.2	301.0	0.2
+30°													
0	312.1±0.09	310.1	0.6	309.3	0.9	309.9	0.7	309.4	0.9	310.1	0.7	309.4	0.9
0.004	308.9±0.11	307.8	0.4	307.9	0.3	307.8	0.4	307.2	0.6	307.2	0.6	307.0	0.6
0.008	307.8±0.23	306.3	0.5	306.4	0.5	306.5	0.4	305.7	0.7	305.5	0.8	305.0	0.9
0.012	305.6±0.24	305.3	0.1	305.2	0.1	305.6	0.0	304.6	0.3	304.4	0.4	304.0	0.5
0.016	304.0±0.29	304.6	0.2	304.4	0.1	305.0	0.3	303.9	0.0	303.7	0.1	303.4	0.2
0.02	303.5±0.27	304.1	0.2	303.9	0.1	304.5	0.3	303.4	0.0	303.3	0.1	303.0	0.2
0.025	303.2±0.29	303.8	0.2	303.7	0.2	304.2	0.3	303.0	0.0	302.9	0.1	302.7	0.1
0.1	303.5±0.30	305.0	0.5	304.6	0.4	305.5	0.7	303.0	0.1	303.2	0.1	302.2	0.4
0.25	302.2±0.19	302.6	0.1	302.5	0.1	302.9	0.2	303.5	0.4	303.1	0.3	302.0	0.1
0.5	300.7±0.10	301.3	0.2	301.3	0.2	301.5	0.3	301.6	0.3	301.5	0.3	301.7	0.3
0.75	300.4±0.11	300.9	0.2	300.9	0.2	301.0	0.2	301.4	0.3	301.3	0.3	301.5	0.4
0.98	300.1±0.12	300.8	0.3	300.8	0.3	300.9	0.3	301.0	0.3	301.0	0.3	301.1	0.4
0.99	300.0±0.11	300.8	0.3	300.8	0.3	300.9	0.3	301.0	0.3	301.0	0.3	301.1	0.4
+45°													
0	314.0±0.14	313.9	0.0	313.6	0.1	313.7	0.1	311.9	0.7	312.4	0.5	310.9	1.0
0.004	311.8±0.12	313.2	0.5	313.0	0.4	312.9	0.4	309.8	0.7	310.6	0.4	308.2	1.2
0.008	311.2±0.13	312.5	0.4	312.3	0.3	312.3	0.3	308.9	0.7	309.8	0.5	306.4	1.5
0.012	309.8±0.13	312.0	0.7	311.8	0.6	311.8	0.6	308.5	0.4	309.3	0.2	305.3	1.5
0.016	308.9±0.15	311.6	0.9	311.5	0.8	311.5	0.9	308.3	0.2	309.0	0.0	304.6	1.4
0.02	308.4±0.15	311.5	1.0	311.3	1.0	311.3	1.0	308.1	0.1	308.7	0.1	304.1	1.4
0.025	308.1±0.17	311.3	1.1	311.2	1.0	311.2	1.0	307.9	0.0	308.6	0.2	303.7	1.4
0.1	307.4±0.12	311.0	1.2	310.7	1.1	310.7	1.1	307.1	0.1	308.1	0.2	303.2	1.3
0.25	306.1±0.12	309.6	1.2	309.3	1.0	309.3	1.1	304.5	0.5	303.7	0.8	302.5	1.1
0.5	302.5±0.10	305.2	0.9	304.1	0.5	304.4	0.6	303.3	0.3	301.7	0.3	301.9	0.2
0.75	300.3±0.10	301.3	0.3	301.1	0.3	301.3	0.3	301.9	0.6	301.3	0.4	301.5	0.4
0.98	299.7±0.11	301.1	0.5	300.9	0.4	301.1	0.5	301.2	0.5	301.0	0.5	301.1	0.5
0.99	299.6±0.11	301.1	0.5	300.9	0.5	301.1	0.5	301.1	0.5	301.0	0.5	301.1	0.5

En el perfil $y=0.5$ m, $z=0.25$ m, mostrado en la Tabla 4.18, se tiene que la inclinación $+15^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima en la pared caliente de 1.3% y 1% con los modelos $rngk\epsilon_t$ y $sk\omega$, respectivamente; la comparación en los demás puntos del perfil muestra diferencias por debajo de la unidad con todos los modelos y la desviación estándar experimental fue de 0.05 hasta 0.46. La inclinación $+30^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima en la pared caliente con los modelos $rngk\epsilon_t$ y rke_t con 1.1% y 0.9%, respectivamente. La desviación estándar fue de 0.09 hasta 0.32, la comparación en los demás puntos del perfil dio diferencias por debajo del 1% en todos los puntos y con todos los modelos. Por último, la inclinación $+45^\circ$ tuvo diferencias en la pared caliente máxima y mínima de 1.2% y 0.2% con los modelos $sstk\omega$ y rke_t , respectivamente. La desviación estándar de los datos experimentales fue de 0.09 hasta 0.14 y el comportamiento en los demás puntos del perfil tuvo diferencias mayores al 1% en todos los modelos excepto en rsm y $sk\omega$.

En la Tabla 4.19 se presenta la comparación del perfil $y=0.25$ m, $z=0.5$ m, donde la inclinación $+15^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima en la pared caliente con los modelos rke_t y $sk\omega$ con 0.9% y 0.7%, respectivamente. La desviación estándar fue de 0.06 hasta 0.43 y el comportamiento de la comparación de los demás puntos del perfil presenta diferencias porcentuales por debajo de la unidad con todos los modelos en todos los puntos. La inclinación $+30^\circ$ tiene diferencias en la pared caliente con los modelos $rngk\epsilon_t$ y ske_t de 0.8% y .05% como máxima y mínima, respectivamente. El comportamiento de la comparación muestra diferencias por debajo de la unidad con todos los modelos excepto el punto $x=0.004$ m y la desviación estándar va de 0.08 hasta 0.58. Finalmente, la inclinación $+45^\circ$ tiene diferencias máxima y mínima en la pared caliente de 0.8% y 0% con los modelos $sstk\omega$ y ske_t , respectivamente, y el comportamiento de los demás puntos muestra que el modelo $sstk\omega$ tuvo las mayores diferencias porcentuales.

Tabla 4.18 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5m$, $z=0.25m$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	rke_t	dif %	$rngke_t$	dif %	ske_t	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	$sstk\omega$	dif %
+15°													
0	312.0±0.05	308.5	1.1	308.1	1.3	308.3	1.2	308.4	1.2	308.9	1.0	309.1	1.0
0.004	307.2±0.24	305.7	0.5	305.9	0.4	305.6	0.5	306.1	0.4	306.1	0.4	305.9	0.4
0.008	306.3±0.35	304.1	0.7	304.3	0.6	304.1	0.7	304.4	0.6	304.2	0.7	304.2	0.7
0.012	303.3±0.46	303.2	0.1	303.3	0.0	303.3	0.0	303.3	0.0	303.2	0.1	303.3	0.0
0.016	302.7±0.35	302.6	0.0	302.6	0.0	302.7	0.0	302.8	0.0	302.6	0.0	302.8	0.0
0.02	302.1±0.37	302.1	0.0	302.1	0.0	302.3	0.1	302.5	0.1	302.3	0.1	302.4	0.1
0.025	301.6±0.25	301.8	0.1	301.7	0.0	301.9	0.1	302.3	0.2	302.0	0.1	302.2	0.2
0.1	301.5±0.17	300.9	0.2	300.8	0.2	301.0	0.2	301.5	0.0	301.4	0.0	301.6	0.0
0.25	301.1±0.17	301.0	0.0	300.9	0.1	301.0	0.0	301.3	0.1	301.4	0.1	301.5	0.1
0.5	300.8±0.13	300.7	0.0	300.7	0.0	300.8	0.0	301.3	0.2	301.3	0.2	301.4	0.2
0.75	300.6±0.12	300.7	0.0	300.7	0.0	300.8	0.1	301.2	0.2	301.1	0.2	301.3	0.2
0.98	300.3±0.15	300.6	0.1	300.6	0.1	300.7	0.1	301.0	0.2	300.9	0.2	301.0	0.2
0.99	300.4±0.13	300.6	0.1	300.6	0.1	300.7	0.1	301.0	0.2	300.9	0.2	301.0	0.2
+30°													
0	312.6±0.09	310.0	0.9	309.3	1.1	309.8	0.9	309.5	1.0	309.9	0.9	309.6	1.0
0.004	308.3±0.14	307.9	0.1	307.8	0.2	307.9	0.1	306.7	0.5	307.3	0.3	306.8	0.5
0.008	307.8±0.22	306.3	0.5	306.3	0.5	306.5	0.4	305.2	0.9	305.5	0.8	305.1	0.9
0.012	305.1±0.32	305.2	0.0	305.2	0.0	305.5	0.1	304.3	0.3	304.4	0.3	304.0	0.4
0.016	304.6±0.23	304.5	0.0	304.4	0.1	304.9	0.1	303.7	0.3	303.6	0.3	303.4	0.4
0.02	304.1±0.28	304.0	0.0	304.0	0.1	304.5	0.1	303.3	0.3	303.2	0.3	303.0	0.4
0.025	303.8±0.28	303.7	0.1	303.7	0.0	304.2	0.1	303.0	0.3	302.8	0.3	302.7	0.4
0.1	304.0±0.16	304.8	0.2	304.7	0.2	305.3	0.4	302.5	0.5	303.1	0.3	302.2	0.6
0.25	302.4±0.16	302.6	0.1	302.6	0.1	302.8	0.2	302.2	0.1	302.9	0.2	302.0	0.1
0.5	301.2±0.10	301.3	0.0	301.3	0.0	301.5	0.1	301.6	0.2	301.5	0.1	301.7	0.2
0.75	300.5±0.13	300.9	0.1	300.9	0.1	301.0	0.2	301.4	0.3	301.3	0.3	301.4	0.3
0.98	300.0±0.16	301.1	0.3	300.8	0.3	300.9	0.3	301.1	0.4	301.2	0.4	301.1	0.4
0.99	300.2±0.14	301.2	0.4	300.8	0.2	300.9	0.3	301.1	0.3	301.3	0.4	301.1	0.3
+45°													
0	314.6±0.14	313.9	0.2	313.6	0.3	313.8	0.3	312.1	0.8	312.6	0.6	310.9	1.2
0.004	311.2±0.12	313.2	0.7	313.0	0.6	312.9	0.5	310.3	0.3	310.6	0.2	308.2	1.0
0.008	311.1±0.13	312.5	0.4	312.3	0.4	312.3	0.4	309.6	0.5	309.8	0.4	306.4	1.5
0.012	309.5±0.14	312.0	0.8	311.8	0.7	311.8	0.8	309.2	0.1	309.3	0.0	305.3	1.4
0.016	308.9±0.13	311.7	0.9	311.5	0.8	311.6	0.9	309.0	0.0	309.1	0.0	304.6	1.4
0.02	308.6±0.13	311.5	0.9	311.3	0.9	311.4	0.9	308.8	0.1	308.9	0.1	304.1	1.5
0.025	308.3±0.14	311.3	1.0	311.2	0.9	311.2	0.9	308.7	0.1	308.7	0.1	303.7	1.5
0.1	307.4±0.12	311.0	1.2	310.7	1.1	310.8	1.1	308.1	0.2	307.9	0.2	303.2	1.4
0.25	306.0±0.11	309.7	1.2	309.3	1.1	309.3	1.1	307.0	0.3	303.6	0.8	302.5	1.1
0.5	303.0±0.09	305.2	0.7	304.1	0.4	304.5	0.5	304.5	0.5	301.7	0.4	301.9	0.3
0.75	300.5±0.10	301.3	0.3	301.1	0.2	301.3	0.3	301.8	0.4	301.3	0.3	301.5	0.3
0.98	299.6±0.12	301.1	0.5	300.9	0.4	301.1	0.5	301.3	0.6	301.0	0.5	301.1	0.5
0.99	299.9±0.10	301.1	0.4	300.9	0.4	301.1	0.4	301.3	0.5	301.0	0.4	301.1	0.4

Tabla 4.19 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.25m$, $z=0.5m$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	rke_t	dif %	$rngke_t$	dif %	ske_t	dif %	rsm	dif %	skw	dif %	$sstk_w$	dif %
+15°													
0	310.4±0.06	307.7	0.9	307.5	0.9	307.5	0.9	307.7	0.9	308.3	0.7	308.3	0.7
0.004	308.8±0.19	304.9	1.2	304.5	1.4	304.7	1.3	305.4	1.1	305.5	1.1	305.4	1.1
0.008	305.2±0.54	303.3	0.6	303.0	0.7	303.3	0.6	303.7	0.5	303.5	0.6	303.6	0.5
0.012	304.4±0.40	302.5	0.6	302.3	0.7	302.6	0.6	302.8	0.5	302.6	0.6	302.7	0.6
0.016	302.0±0.43	302.0	0.0	301.8	0.1	302.1	0.0	302.4	0.1	302.2	0.0	302.3	0.1
0.02	301.5±0.34	301.7	0.1	301.6	0.0	301.8	0.1	302.2	0.3	301.9	0.1	302.0	0.2
0.025	301.0±0.27	301.4	0.2	301.3	0.1	301.6	0.2	302.1	0.4	301.7	0.2	301.8	0.3
0.1	300.4±0.13	300.7	0.1	300.7	0.1	300.9	0.2	301.3	0.3	301.2	0.3	301.4	0.3
0.25	300.4±0.16	300.7	0.1	300.6	0.1	300.8	0.1	301.1	0.2	301.1	0.2	301.3	0.3
0.5	300.0±0.19	300.6	0.2	300.6	0.2	300.7	0.3	301.1	0.4	301.0	0.4	301.2	0.4
0.75	299.7±0.11	300.6	0.3	300.6	0.3	300.7	0.3	301.0	0.4	300.9	0.4	301.0	0.4
0.98	299.6±0.08	300.6	0.3	300.6	0.3	300.7	0.3	300.8	0.4	300.8	0.4	300.9	0.4
0.99	299.5±0.08	300.6	0.4	300.6	0.4	300.7	0.4	300.8	0.4	300.8	0.4	300.9	0.4
+30°													
0	310.5±0.10	309.0	0.5	308.2	0.8	308.5	0.7	308.5	0.7	308.8	0.6	308.9	0.5
0.004	308.9±0.20	305.6	1.1	305.8	1.0	305.8	1.0	306.3	0.8	306.3	0.9	306.1	0.9
0.008	305.6±0.58	304.1	0.5	303.8	0.6	304.2	0.4	304.4	0.4	304.1	0.5	304.1	0.5
0.012	304.8±0.45	303.1	0.6	302.7	0.7	303.3	0.5	303.4	0.5	303.0	0.6	303.1	0.6
0.016	302.5±0.50	302.5	0.0	302.1	0.1	302.7	0.1	302.9	0.1	302.5	0.0	302.7	0.1
0.02	301.9±0.40	302.1	0.1	301.7	0.1	302.2	0.1	302.6	0.2	302.2	0.1	302.4	0.2
0.025	301.4±0.32	301.7	0.1	301.5	0.0	301.9	0.2	302.4	0.3	302.0	0.2	302.2	0.3
0.1	300.8±0.13	301.1	0.1	301.0	0.1	301.3	0.2	301.6	0.3	301.5	0.2	301.7	0.3
0.25	300.6±0.16	300.9	0.1	300.9	0.1	301.1	0.2	301.5	0.3	301.4	0.3	301.6	0.3
0.5	299.9±0.18	300.8	0.3	300.8	0.3	301.0	0.3	301.3	0.5	301.3	0.4	301.4	0.5
0.75	299.6±0.12	300.8	0.4	300.8	0.4	300.9	0.4	301.1	0.5	301.1	0.5	301.2	0.5
0.98	299.3±0.08	300.8	0.5	300.8	0.5	300.9	0.5	300.9	0.6	300.9	0.6	301.0	0.6
0.99	299.2±0.08	300.8	0.5	300.8	0.5	300.9	0.6	300.9	0.6	300.9	0.6	301.0	0.6
+45°													
0	312.4±0.13	312.9	0.2	312.9	0.2	312.6	0.0	312.0	0.1	310.3	0.7	310.0	0.8
0.004	311.5±0.12	311.8	0.1	311.0	0.1	311.4	0.0	309.8	0.5	307.5	1.3	307.1	1.4
0.008	309.3±0.17	310.7	0.5	310.2	0.3	310.3	0.3	308.8	0.2	305.4	1.3	304.9	1.4
0.012	308.8±0.14	310.0	0.4	309.7	0.3	309.6	0.3	308.3	0.2	304.1	1.5	303.8	1.6
0.016	306.9±0.22	309.6	0.9	309.4	0.8	309.3	0.8	308.0	0.3	303.4	1.1	303.2	1.2
0.02	306.3±0.22	309.4	1.0	309.1	0.9	309.1	0.9	307.8	0.5	303.0	1.1	302.9	1.1
0.025	305.9±0.20	309.3	1.1	309.0	1.0	308.9	1.0	307.6	0.6	302.7	1.0	302.6	1.1
0.1	305.0±0.11	308.4	1.1	307.9	1.0	307.9	1.0	306.0	0.3	302.5	0.8	302.1	0.9
0.25	302.8±0.09	305.3	0.8	304.1	0.4	304.3	0.5	302.3	0.2	301.8	0.3	301.9	0.3
0.5	300.2±0.09	301.2	0.3	301.0	0.3	301.2	0.3	301.7	0.5	301.4	0.4	301.6	0.4
0.75	299.6±0.09	301.0	0.5	300.9	0.4	301.1	0.5	301.4	0.6	301.1	0.5	301.3	0.6
0.98	299.2±0.08	301.0	0.6	300.9	0.5	301.0	0.6	301.1	0.6	300.9	0.6	301.0	0.6
0.99	299.2±0.08	301.0	0.6	300.9	0.6	301.0	0.6	301.1	0.6	300.9	0.6	301.0	0.6

La Tabla 4.20 presenta el perfil $y=0$ m, $z=0.5$ m, donde la inclinación $+15^\circ$ tuvo una desviación estándar experimental de 0.04 hasta 0.08; la mayor diferencia la tuvo el modelo $sk\epsilon_t$ y la mínima el modelo rke_t . La inclinación $+30^\circ$ tuvo ajustes de 0% en algunos puntos con todos los modelos y la desviación estándar fue de 0.08 hasta 0.11. Finalmente, la inclinación $+45^\circ$ tuvo diferencias porcentuales por debajo de la unidad excepto en dos puntos con el modelo rke_t y en un punto con el modelo $sk\epsilon_t$.

La temperatura de la pared adiabática superior fue medida con el perfil $y=1$ m, $z=0.5$ m, mostrado en la Tabla 4.21. La inclinación $+15^\circ$ tuvo diferencias porcentuales por debajo de la unidad con todos los modelos excepto con el modelo $sk\epsilon_t$ el cual tuvo una diferencia máxima de 1.6%; la desviación estándar experimental fue de 0.04 hasta 0.07. De igual manera, la inclinación $+30^\circ$ tuvo diferencias porcentuales por debajo del 1% con todos los modelos, excepto con rsm el cual tuvo diferencia máxima de 1.1% y la desviación estándar fue de entre 0.08 y 0.09. Por último, la inclinación $+45^\circ$ tuvo diferencias en todos los puntos con todos los modelos por debajo de la unidad porcentual y la desviación estándar fue de 0.11 hasta 0.13.

El perfil $x=0.5$ m, $z=0.5$ m se presenta en la Tabla 4.22. Las inclinaciones $+15^\circ$ y $+30^\circ$ presentaron diferencias porcentuales por debajo del 1% en todos los puntos con todos los modelos y la desviación estándar fue de 0.06 hasta 0.20 para la primera y 0.08 y 0.15 para la segunda inclinación. En cambio la inclinación $+45^\circ$ tuvo diferencias porcentuales por encima de la unidad alcanzando valores máximos de 1.2% en todos los modelos, excepto con rsm y $sk\omega$ los cuales presentaron diferencias menores.

Tabla 4.20 Comparación de temperatura (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.0$, $z=0.5m$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	rke_t	dif %	$rngke_t$	dif %	ske_t	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	sst $k\omega$	dif %
+15°													
0.01	305.8±0.08	304.5	0.4	304.5	0.4	307.5	0.5	304.6	0.4	304.6	0.4	304.5	0.4
0.02	305.4±0.07	304.3	0.4	304.3	0.4	307.1	0.5	304.4	0.3	304.4	0.3	304.3	0.4
0.03	305.1±0.07	304.2	0.3	304.2	0.3	306.8	0.5	304.3	0.3	304.3	0.3	304.2	0.3
0.04	304.9±0.07	304.1	0.3	304.2	0.2	306.6	0.6	304.2	0.2	304.2	0.2	304.1	0.3
0.05	304.7±0.07	304.0	0.2	304.1	0.2	306.5	0.6	304.2	0.2	304.2	0.2	304.1	0.2
0.1	303.9±0.06	303.8	0.0	303.9	0.0	305.8	0.6	303.9	0.0	303.9	0.0	303.9	0.0
0.25	303.2±0.05	303.5	0.1	303.5	0.1	304.5	0.4	303.4	0.1	303.5	0.1	303.4	0.1
0.5	302.4±0.04	303.1	0.2	303.0	0.2	303.6	0.4	302.8	0.1	303.0	0.2	302.9	0.2
0.75	302.0±0.04	302.4	0.1	302.3	0.1	303.0	0.3	302.0	0.0	302.3	0.1	302.1	0.0
+30°													
0.01	306.0±0.11	305.7	0.1	305.6	0.1	305.7	0.1	305.6	0.1	305.6	0.2	305.4	0.2
0.02	305.6±0.11	305.4	0.1	305.4	0.1	305.6	0.0	305.5	0.1	305.4	0.1	305.2	0.1
0.03	305.3±0.11	305.3	0.0	305.3	0.0	305.6	0.1	305.4	0.0	305.4	0.0	305.1	0.1
0.04	305.1±0.10	305.3	0.0	305.2	0.0	305.6	0.1	305.3	0.0	305.4	0.1	305.0	0.0
0.05	304.9±0.10	305.2	0.1	305.3	0.1	305.5	0.2	305.2	0.1	305.3	0.1	304.9	0.0
0.1	304.1±0.10	305.1	0.3	305.4	0.4	305.3	0.4	304.8	0.2	305.1	0.3	304.7	0.2
0.25	303.5±0.09	304.6	0.4	304.5	0.3	304.6	0.4	303.9	0.1	304.3	0.3	304.0	0.2
0.5	302.7±0.10	303.7	0.3	303.6	0.3	303.7	0.3	302.9	0.1	303.4	0.2	303.1	0.1
0.75	302.0±0.08	303.1	0.4	303.1	0.3	303.0	0.3	302.2	0.0	302.7	0.2	302.4	0.1
+45°													
0.01	307.2±0.15	308.2	0.3	307.6	0.1	307.8	0.2	306.9	0.1	306.6	0.2	306.1	0.4
0.02	306.8±0.14	308.0	0.4	307.4	0.2	307.5	0.2	306.6	0.1	306.4	0.1	305.9	0.3
0.03	306.5±0.14	307.9	0.4	307.4	0.3	307.5	0.3	306.6	0.0	306.3	0.1	305.8	0.2
0.04	306.3±0.14	307.8	0.5	307.4	0.4	307.6	0.4	306.6	0.1	306.2	0.0	305.7	0.2
0.05	306.0±0.13	307.9	0.6	307.5	0.5	307.6	0.5	306.6	0.2	306.1	0.0	305.7	0.1
0.1	305.2±0.12	307.9	0.9	307.4	0.7	307.5	0.8	306.5	0.4	306.0	0.3	305.5	0.1
0.25	304.4±0.12	307.4	1.0	307.2	0.9	307.3	1.0	306.0	0.5	305.8	0.5	305.3	0.3
0.5	303.2±0.12	306.1	1.0	305.9	0.9	305.9	0.9	304.5	0.4	304.7	0.5	304.3	0.4
0.75	302.1±0.10	304.5	0.8	304.4	0.8	304.2	0.7	303.0	0.3	303.4	0.4	303.0	0.3

Tabla 4.21 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo ($\gamma=1.0$, $z=0.5m$) y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	rke_t	dif %	$rngke_t$	dif %	ske_t	dif %	rsm	dif %	skw	dif %	$sstk_w$	dif %
+15°													
0.01	309.4±0.07	307.4	0.7	307.5	0.6	304.5	1.6	307.0	0.8	307.4	0.6	307.3	0.7
0.02	309.0±0.07	307.1	0.6	307.0	0.7	304.3	1.5	306.7	0.7	307.2	0.6	306.8	0.7
0.03	308.5±0.06	306.9	0.5	306.7	0.6	304.2	1.4	306.6	0.6	307.0	0.5	306.4	0.7
0.04	308.2±0.06	306.7	0.5	306.4	0.6	304.1	1.3	306.4	0.6	306.8	0.5	306.2	0.7
0.05	307.9±0.06	306.5	0.4	306.2	0.5	304.0	1.3	306.1	0.6	306.7	0.4	306.0	0.6
0.1	306.9±0.06	305.8	0.4	305.6	0.4	303.8	1.0	305.6	0.4	306.0	0.3	305.4	0.5
0.25	305.9±0.06	304.5	0.4	304.4	0.5	303.4	0.8	304.4	0.5	304.8	0.4	304.5	0.5
0.39	304.9±0.05	303.9	0.3	303.8	0.4	303.2	0.6	303.7	0.4	304.2	0.2	303.9	0.3
0.5	304.2±0.05	303.6	0.2	303.4	0.3	303.0	0.4	303.3	0.3	303.8	0.1	303.6	0.2
0.75	302.9±0.04	302.9	0.0	302.8	0.0	302.3	0.2	302.7	0.0	303.1	0.1	302.9	0.0
+30°													
0.01	310.8±0.08	309.0	0.6	308.9	0.6	309.1	0.6	307.3	1.1	308.4	0.8	307.9	0.9
0.02	310.4±0.08	308.5	0.6	308.4	0.6	308.6	0.6	307.0	1.1	308.2	0.7	307.7	0.9
0.03	309.9±0.08	308.3	0.5	308.2	0.5	308.3	0.5	306.8	1.0	308.0	0.6	307.5	0.8
0.04	309.6±0.08	308.2	0.5	308.1	0.5	308.2	0.5	306.7	0.9	307.9	0.5	307.4	0.7
0.05	309.3±0.08	308.0	0.4	308.0	0.4	308.1	0.4	306.7	0.8	307.8	0.5	307.3	0.6
0.1	308.3±0.09	307.6	0.2	307.5	0.2	307.6	0.2	306.3	0.6	307.4	0.3	306.8	0.5
0.25	306.8±0.09	306.7	0.0	306.6	0.1	306.7	0.0	305.2	0.5	306.4	0.1	305.7	0.4
0.39	305.5±0.09	306.0	0.2	305.8	0.1	306.0	0.2	304.6	0.3	305.7	0.1	305.0	0.2
0.5	304.6±0.08	305.4	0.3	305.2	0.2	305.4	0.3	304.2	0.1	305.1	0.2	304.5	0.0
0.75	303.0±0.08	304.0	0.3	303.9	0.3	304.0	0.3	303.3	0.1	303.7	0.2	302.9	0.0
+45°													
0.01	311.8±0.12	311.9	0.0	311.6	0.1	311.9	0.0	309.8	0.6	311.0	0.3	310.3	0.5
0.02	311.4±0.12	311.8	0.1	311.6	0.1	311.7	0.1	309.5	0.6	310.8	0.2	310.1	0.4
0.03	311.0±0.12	311.6	0.2	311.7	0.2	311.5	0.2	309.3	0.6	310.6	0.1	310.0	0.3
0.04	310.7±0.12	311.6	0.3	311.6	0.3	311.4	0.2	309.1	0.5	310.5	0.1	309.8	0.3
0.05	310.4±0.12	311.5	0.3	311.3	0.3	311.3	0.3	309.0	0.4	310.4	0.0	309.7	0.2
0.1	309.5±0.13	311.1	0.5	310.9	0.4	310.9	0.4	308.6	0.3	309.9	0.1	309.0	0.2
0.25	307.7±0.13	309.8	0.7	309.7	0.6	309.6	0.6	307.6	0.0	308.5	0.3	307.4	0.1
0.39	306.2±0.13	308.6	0.8	308.5	0.7	308.4	0.7	306.6	0.1	307.2	0.3	306.0	0.1
0.5	305.2±0.12	307.8	0.8	307.5	0.7	307.5	0.8	305.9	0.2	306.3	0.3	304.8	0.1
0.75	303.3±0.11	306.0	0.9	305.7	0.8	305.8	0.8	304.5	0.4	304.2	0.3	303.4	0.0

Tabla 4.22 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $x=0.5m$, $z=0.5m$)
con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=1.7 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	$rk\epsilon_t$	dif %	$rngk\epsilon_t$	dif %	$sk\epsilon_t$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	sstk ω	dif %
+15°													
0.97	306.3±0.18	305.5	0.3	305.0	0.4	305.6	0.2	304.5	0.6	305.7	0.2	304.9	0.5
0.98	306.2±0.20	305.2	0.3	304.9	0.4	305.3	0.3	304.4	0.6	305.5	0.2	304.7	0.5
0.984	305.7±0.13	305.0	0.2	304.9	0.3	305.1	0.2	304.3	0.5	305.3	0.1	304.6	0.4
0.988	305.6±0.15	304.8	0.2	304.7	0.3	304.8	0.3	304.2	0.5	305.1	0.2	304.4	0.4
0.992	305.4±0.17	304.5	0.3	304.5	0.3	304.5	0.3	304.0	0.5	304.8	0.2	304.2	0.4
0.996	304.3±0.06	304.1	0.1	304.1	0.1	304.1	0.1	303.7	0.2	304.4	0.0	303.9	0.1
+30°													
0.97	306.9±0.13	308.6	0.5	308.4	0.5	308.7	0.6	305.7	0.4	307.6	0.2	306.0	0.3
0.98	306.8±0.15	308.3	0.5	308.3	0.5	308.5	0.6	305.8	0.3	307.4	0.2	305.7	0.3
0.984	306.3±0.10	308.0	0.6	308.1	0.6	308.3	0.7	305.9	0.1	307.2	0.3	305.5	0.3
0.988	306.1±0.12	307.6	0.5	307.7	0.5	307.9	0.6	305.8	0.1	306.9	0.3	305.2	0.3
0.992	305.9±0.14	307.0	0.4	307.2	0.4	307.4	0.5	305.6	0.1	306.5	0.2	305.0	0.3
0.996	304.8±0.08	306.3	0.5	306.4	0.5	306.6	0.6	305.1	0.1	305.9	0.4	304.7	0.0
+45°													
0.97	307.7±0.13	311.4	1.2	311.2	1.1	311.2	1.1	307.7	0.0	308.8	0.3	304.3	1.1
0.98	307.6±0.13	311.1	1.1	310.9	1.1	311.0	1.1	307.5	0.0	308.6	0.3	304.5	1.0
0.984	307.0±0.12	310.8	1.2	310.6	1.2	310.7	1.2	307.4	0.1	308.5	0.5	304.6	0.8
0.988	306.9±0.13	310.4	1.1	310.2	1.1	310.3	1.1	307.2	0.1	308.2	0.4	304.7	0.7
0.992	306.7±0.13	309.8	1.0	309.6	1.0	309.7	1.0	306.9	0.1	307.8	0.4	304.8	0.6
0.996	305.5±0.12	308.9	1.1	308.7	1.1	308.8	1.1	306.5	0.3	307.1	0.6	304.8	0.2

Para $Ra=6.8 \times 10^{11}$ la Tabla 4.23 muestra el perfil $y=0.75$ m, $z=0.5$ m donde la inclinación $+15^\circ$ tuvo una diferencia máxima y mínima en la pared caliente de 3.7% y 2.8% con los modelos $rngk_{\epsilon_t}$ y sk_{ω} , respectivamente. En el resto del perfil la diferencia disminuyó con todos los modelos llegando a presentarse puntos con nula diferencia, en tanto que la desviación estándar de los datos experimentales fue de 0.08 hasta 1.52. La inclinación $+30^\circ$ presentó un valor máximo y mínimo de diferencia en la pared caliente de 3.2% y 1.5% con los modelos rsm y rke_t , respectivamente. A lo largo del perfil se presentaron diferencias de hasta 2.3% con el modelo ske_t y una mínima de 0.2% con el modelo sk_{ω} ; la desviación estándar fue de 0.13 hasta 0.89. Por último, la inclinación $+45^\circ$ tuvo una diferencia máxima y mínima en la pared caliente de 3.2% y 1% con los modelos $sstk_{\omega}$ y ske_t , respectivamente. En la comparación a lo largo del perfil la diferencia mayor la tuvo el modelo ske_t con un 3.8% y una mínima de 0% con el modelo rsm .

El perfil $y=0.5$ m, $z=0.5$ m, se muestra en la Tabla 4.24. La inclinación $+15^\circ$ tuvo una diferencia máxima y mínima en la pared caliente de 3.5% y 2.3% con los modelos ske_t y sk_{ω} , respectivamente. En el resto del perfil la diferencia fue menor al 1% a partir del punto $x=0.012$ m, con todos los modelos. La desviación estándar fue de 0.05 hasta 1.29. En la inclinación $+30^\circ$ la diferencia máxima en la pared caliente la tuvo el modelo rsm con 3.1% y la mínima la tuvo el modelo rke_t con 2.4%. La desviación estándar fue de 0.08 hasta 0.90 y el comportamiento del resto del perfil tuvo diferencias máximas de 1% con todos los modelos a partir de $x=0.008$ m. Por último, la inclinación $+45^\circ$ tuvo una diferencia máxima y mínima en la pared caliente de 4.2% y 1.3% con los modelos $sstk_{\omega}$ y rke_t , respectivamente.

Tabla 4.23 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.75\text{m}$, $z=0.5\text{m}$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	r_{ke_t}	dif %	r_{ngke_t}	dif %	s_{ke_t}	dif %	rsm	dif %	sk_{ω}	dif %	$sst_{k\omega}$	dif %
+15°													
0	341.2±0.13	329.4	3.5	328.8	3.7	329.2	3.5	329.3	3.5	331.6	2.8	331.8	2.8
0.004	328.4±1.16	320.1	2.5	319.4	2.7	318.9	2.9	319.3	2.8	321.5	2.1	320.6	2.4
0.008	317.9±1.44	314.9	1.0	314.3	1.1	314.3	1.1	314.9	1.0	314.9	1.0	314.7	1.0
0.012	312.9±1.36	311.8	0.4	311.4	0.5	311.7	0.4	312.4	0.2	311.6	0.4	311.7	0.4
0.016	310.3±0.76	309.9	0.1	309.7	0.2	310.1	0.1	310.8	0.2	310.0	0.1	310.0	0.1
0.02	309.6±0.55	308.8	0.2	308.7	0.3	309.1	0.2	309.7	0.0	309.1	0.2	309.1	0.2
0.025	309.3±0.61	308.1	0.4	308.0	0.4	308.2	0.3	308.8	0.2	308.6	0.2	308.5	0.2
0.1	311.4±1.52	311.4	0.0	312.4	0.3	308.8	0.8	307.7	1.2	311.2	0.0	309.9	0.5
0.25	309.5±0.35	309.7	0.0	309.0	0.2	311.9	0.8	313.0	1.1	310.9	0.5	309.2	0.1
0.5	305.0±0.29	306.7	0.6	306.4	0.5	305.9	0.3	307.2	0.7	307.5	0.8	306.7	0.6
0.75	303.5±0.10	304.0	0.2	303.9	0.2	304.7	0.4	305.4	0.6	305.4	0.6	305.9	0.8
0.98	302.7±0.09	303.0	0.1	302.9	0.1	303.3	0.2	304.4	0.6	304.2	0.5	304.6	0.6
0.99	302.8±0.08	302.9	0.0	302.9	0.0	303.3	0.2	304.4	0.5	304.2	0.4	304.5	0.6
+30°													
0	345.9±0.17	340.7	1.5	340.3	1.6	340.4	1.6	334.9	3.2	336.6	2.7	334.9	3.2
0.004	336.2±0.62	337.6	0.4	337.1	0.3	337.2	0.3	328.5	2.3	334.9	0.4	327.2	2.7
0.008	330.6±0.77	335.1	1.4	334.8	1.3	335.0	1.3	324.7	1.8	333.0	0.7	321.7	2.7
0.012	328.2±0.89	333.8	1.7	333.5	1.6	333.8	1.7	322.3	1.8	331.4	1.0	318.4	3.0
0.016	326.5±0.63	333.3	2.1	333.0	2.0	333.3	2.1	320.7	1.8	330.4	1.2	317.0	2.9
0.02	326.1±0.55	333.1	2.2	332.9	2.1	333.0	2.1	319.6	2.0	329.9	1.2	316.9	2.8
0.025	325.6±0.53	333.1	2.3	332.9	2.2	333.0	2.3	318.8	2.1	329.6	1.2	317.8	2.4
0.1	324.7±0.31	331.4	2.1	331.1	2.0	331.4	2.1	321.1	1.1	328.0	1.0	320.6	1.3
0.25	321.7±0.15	327.2	1.7	326.6	1.5	327.2	1.7	313.5	2.6	323.5	0.6	314.1	2.4
0.5	312.4±0.37	318.3	1.9	317.8	1.7	318.5	2.0	314.1	0.6	312.9	0.2	308.2	1.3
0.75	304.6±0.14	306.4	0.6	306.4	0.6	307.5	0.9	307.0	0.8	306.1	0.5	306.2	0.5
0.98	302.4±0.13	303.3	0.3	303.3	0.3	303.9	0.5	304.9	0.8	304.4	0.7	304.5	0.7
0.99	302.1±0.13	303.2	0.4	303.3	0.4	303.8	0.6	304.8	0.9	304.3	0.7	304.5	0.8
+45°													
0	353.2±0.37	347.9	1.5	349.7	1.0	349.7	1.0	344.0	2.6	346.6	1.9	341.9	3.2
0.004	346.5±0.36	345.5	0.3	348.3	0.5	348.1	0.5	339.7	2.0	344.7	0.5	338.4	2.3
0.008	341.9±0.37	343.4	0.5	347.3	1.6	347.3	1.6	337.2	1.4	343.0	0.3	335.4	1.9
0.012	339.2±0.38	342.0	0.8	346.6	2.2	346.6	2.2	335.6	1.1	342.0	0.8	333.8	1.6
0.016	336.9±0.36	341.1	1.3	346.1	2.7	346.0	2.7	334.5	0.7	341.6	1.4	333.3	1.1
0.02	336.3±0.38	340.7	1.3	345.9	2.9	345.7	2.8	333.7	0.8	341.5	1.6	333.4	0.9
0.025	335.7±0.40	340.5	1.4	345.9	3.0	345.6	3.0	333.0	0.8	341.5	1.7	333.5	0.6
0.1	334.2±0.32	339.4	1.6	344.3	3.0	344.2	3.0	331.7	0.7	339.5	1.6	328.6	1.7
0.25	329.4±0.29	335.2	1.8	340.9	3.5	340.9	3.5	329.4	0.0	334.3	1.5	316.8	3.8
0.5	321.9±0.23	318.0	1.2	334.1	3.8	334.3	3.8	316.2	1.8	319.1	0.9	309.6	3.8
0.75	310.1±0.13	304.6	1.7	315.0	1.6	317.1	2.3	315.4	1.7	307.1	0.9	306.8	1.0
0.98	302.9±0.13	304.2	0.4	304.1	0.4	305.5	0.8	305.3	0.8	304.8	0.6	305.0	0.7
0.99	302.9±0.12	304.2	0.4	304.1	0.4	305.4	0.8	305.4	0.8	304.7	0.6	304.9	0.7

Tabla 4.24 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5\text{m}$, $z=0.5\text{m}$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

$x\text{ (m)}$	Exp	$rk\epsilon_t$	dif %	$rngk\epsilon_t$	dif %	$sk\epsilon_t$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	sst $k\omega$	dif %
+15°													
0	337.9±0.09	328.4	2.8	326.6	3.3	326.2	3.5	328.2	2.9	330.0	2.3	330.1	2.3
0.004	322.6±0.96	316.5	1.9	315.7	2.1	316.1	2.0	318.3	1.3	318.0	1.4	318.5	1.3
0.008	315.5±1.23	311.7	1.2	310.7	1.5	311.6	1.2	312.4	1.0	311.6	1.2	312.5	0.9
0.012	309.6±1.29	309.1	0.2	308.1	0.5	309.2	0.1	309.2	0.1	309.0	0.2	309.6	0.0
0.016	307.1±0.69	307.4	0.1	306.6	0.2	307.8	0.2	307.8	0.2	307.7	0.2	308.0	0.3
0.02	305.7±0.88	306.4	0.2	305.7	0.0	306.8	0.3	307.2	0.5	306.9	0.4	307.1	0.4
0.025	305.3±0.38	305.4	0.1	304.9	0.1	305.9	0.2	306.7	0.5	306.4	0.4	306.4	0.4
0.1	304.2±0.21	303.1	0.4	303.1	0.4	303.7	0.2	304.6	0.1	304.8	0.2	305.0	0.2
0.25	304.4±0.14	303.0	0.5	302.9	0.5	303.5	0.3	304.4	0.0	304.6	0.1	304.9	0.2
0.5	303.1±0.14	302.8	0.1	302.8	0.1	303.1	0.0	304.4	0.4	304.3	0.4	304.7	0.5
0.75	302.5±0.07	302.8	0.1	302.8	0.1	303.0	0.2	303.8	0.4	303.9	0.5	304.3	0.6
0.98	302.4±0.05	302.7	0.1	302.7	0.1	302.9	0.2	303.4	0.3	303.5	0.3	303.7	0.4
0.99	302.0±0.06	302.7	0.2	302.7	0.2	302.9	0.3	303.4	0.5	303.4	0.5	303.7	0.6
+30°													
0	341.8±0.18	333.7	2.4	332.6	2.7	332.4	2.8	331.3	3.1	332.8	2.6	331.8	2.9
0.004	327.0±0.60	323.2	1.2	322.7	1.3	323.9	0.9	322.0	1.5	322.0	1.5	320.4	2.0
0.008	320.0±0.76	318.3	0.5	318.4	0.5	319.0	0.3	317.3	0.9	315.3	1.5	314.1	1.9
0.012	313.9±0.80	315.7	0.6	316.1	0.7	316.2	0.7	314.4	0.2	311.9	0.6	311.0	0.9
0.016	311.8±0.48	314.2	0.8	314.7	1.0	314.5	0.9	312.5	0.2	310.2	0.5	309.5	0.7
0.02	310.7±0.90	313.4	0.9	314.0	1.0	313.7	1.0	311.2	0.2	309.3	0.4	308.6	0.7
0.025	311.1±0.88	313.1	0.6	313.6	0.8	313.3	0.7	310.0	0.4	308.9	0.7	308.0	1.0
0.1	311.9±0.86	316.6	1.5	315.7	1.2	316.7	1.5	309.4	0.8	311.6	0.1	307.0	1.6
0.25	307.3±0.45	309.3	0.6	309.1	0.6	309.3	0.6	310.3	1.0	307.3	0.0	306.2	0.4
0.5	303.0±0.14	303.8	0.3	303.6	0.2	304.4	0.5	311.4	2.8	304.9	0.6	305.5	0.8
0.75	302.2±0.09	303.1	0.3	303.1	0.3	303.4	0.4	304.3	0.7	304.2	0.7	304.7	0.8
0.98	301.9±0.09	302.9	0.3	303.0	0.3	303.2	0.4	303.7	0.6	303.6	0.6	303.8	0.6
0.99	301.5±0.08	302.9	0.5	302.9	0.5	303.2	0.6	303.6	0.7	303.6	0.7	303.8	0.8
+45°													
0	350.9±0.38	346.5	1.3	345.9	1.4	345.8	1.5	338.3	3.6	342.0	2.5	336.2	4.2
0.004	340.9±0.34	344.6	1.1	343.7	0.8	343.7	0.8	332.3	2.5	338.2	0.8	324.4	4.8
0.008	336.8±0.34	342.9	1.8	342.1	1.6	342.1	1.6	328.9	2.4	335.5	0.4	319.3	5.2
0.012	332.6±0.37	341.7	2.7	341.1	2.6	341.1	2.5	327.1	1.7	334.2	0.5	316.5	4.9
0.016	330.6±0.31	341.0	3.2	340.5	3.0	340.4	3.0	326.2	1.3	333.7	0.9	314.7	4.8
0.02	329.8±0.36	340.7	3.3	340.2	3.1	340.1	3.1	325.9	1.2	333.4	1.1	313.6	4.9
0.025	329.4±0.35	340.5	3.4	340.0	3.2	339.9	3.2	325.7	1.1	333.2	1.1	312.9	5.0
0.1	327.5±0.28	339.4	3.6	338.6	3.4	338.6	3.4	326.3	0.4	330.1	0.8	312.9	4.5
0.25	323.0±0.24	335.2	3.8	334.1	3.4	334.3	3.5	320.7	0.7	318.7	1.3	309.1	4.3
0.5	310.2±0.21	318.0	2.5	314.5	1.4	316.6	2.1	310.8	0.2	306.5	1.2	306.9	1.0
0.75	303.5±0.09	304.5	0.3	303.9	0.1	304.6	0.4	305.3	0.6	305.1	0.5	305.5	0.7
0.98	302.8±0.10	304.3	0.5	303.7	0.3	304.3	0.5	304.7	0.6	304.2	0.4	304.4	0.5
0.99	302.3±0.13	304.3	0.6	303.7	0.4	304.3	0.7	305.3	1.0	304.1	0.6	304.4	0.7

El perfil $y=0.75$ m, $z=0.5$ m es mostrado en la Tabla 4.25. La inclinación $+15^\circ$ tuvo una diferencia máxima y mínima en la pared caliente de 3.4% y 2.5% con los modelos $sk\epsilon_t$ y $sk\omega$, respectivamente. El resto del perfil presentó diferencia menor a la unidad con todos los modelos a partir del punto $x=0.012$ m. La inclinación $+30^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima de 2.5% con el modelo rsm y 1.7% con el modelo $sk\omega$. De igual manera en todo el perfil prevalece una diferencia menor al 1% a partir del punto $x=0.012$ m. Finalmente, la inclinación $+45^\circ$ tuvo una diferencia máxima de 3.2% con el modelo $sstk\omega$ y una mínima de 0.4% con el modelo rke_t . En el resto de los puntos del perfil la diferencia aumenta hasta 5.6% en el modelo $sstk\omega$.

La Tabla 4.26 presenta el perfil $y=0.5$ m, $z=0.25$ m en donde la inclinación $+15^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima en la pared caliente de 3.2% y 2.7% con los modelos $sk\epsilon_t$ y rke_t , respectivamente. La comparación en los demás puntos del perfil fue menor a la unidad a partir del punto $x=0.012$ m. La inclinación $+30^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima de 2.6% y 0.1% con los modelos rsm y rke_t , respectivamente. La comparación en los demás puntos del perfil indicó diferencias menores al 1% en la mayoría de los puntos con todos los modelos. Por último, la inclinación $+45^\circ$ tuvo una diferencia máxima de 3.6% con el modelo $sstk\omega$ y una mínima de 0.2 con el modelo rke_t . El resto de los puntos tuvieron diferencias variadas llegando a tener valores máximos de diferencias de hasta 4.6%.

El perfil $y=0.25$ m, $z=0.5$ m mostrado en la Tabla 4.27, indica que la inclinación $+15^\circ$ tuvo una diferencia máxima y mínima en la pared caliente de 3.2% y 1.2% con los modelos $rngk\epsilon_t$ y $sstk\omega$, respectivamente. Sin embargo, en el punto adyacente ($x=0.004$ m) es donde se tuvo mayor diferencia con todos los modelos llegando hasta un 3.9% con el modelo $sk\epsilon_t$; la diferencia fue disminuyendo conforme se avanzó en la posición x en el perfil llegando a presentarse diferencia nula en algunos puntos. La desviación estándar de los datos experimentales fue de 0.10 hasta 1.56. La inclinación $+30^\circ$ tuvo diferencias máxima y mínima en la pared caliente de 2.3% y 1% con los modelos $rngk\epsilon_t$ y $sk\omega$, respectivamente. La comparación en los demás puntos del perfil fue menor que la unidad porcentual a partir del punto $x=0.016$ m con todos los modelos.

Tabla 4.25 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5m$, $z=0.75m$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	rke_t	dif %	$rngke_t$	dif %	ske_t	dif %	rsm	dif %	sko	dif %	sstk o	dif %
+15°													
0	339.3±0.16	329.3	2.9	328.7	3.1	327.7	3.4	328.0	3.3	330.7	2.5	330.8	2.5
0.004	325.7±0.60	317.3	2.6	317.5	2.5	316.7	2.8	317.9	2.4	318.7	2.2	319.2	2.0
0.008	320.2±1.27	312.1	2.5	312.5	2.4	312.1	2.6	312.0	2.6	312.0	2.6	312.5	2.4
0.012	311.2±0.93	309.4	0.6	309.6	0.5	309.6	0.5	308.9	0.8	309.3	0.6	309.5	0.5
0.016	306.8±0.90	307.6	0.3	307.8	0.3	308.0	0.4	307.3	0.2	307.9	0.4	308.0	0.4
0.02	305.5±0.67	306.5	0.3	306.6	0.4	307.0	0.5	306.6	0.4	307.0	0.5	307.2	0.5
0.025	304.7±0.45	305.5	0.3	305.6	0.3	306.1	0.5	306.3	0.5	306.4	0.6	306.5	0.6
0.1	303.7±0.16	303.1	0.2	303.1	0.2	303.7	0.0	304.6	0.3	304.8	0.3	305.0	0.4
0.25	303.8±0.17	303.1	0.3	302.9	0.3	303.5	0.1	304.4	0.2	304.7	0.3	304.9	0.3
0.5	303.1±0.13	302.9	0.1	302.8	0.1	303.1	0.0	304.1	0.3	304.3	0.4	304.7	0.5
0.75	302.8±0.16	302.8	0.0	302.8	0.0	303.0	0.1	303.7	0.3	303.9	0.4	304.3	0.5
0.98	302.7±0.07	302.7	0.0	302.7	0.0	302.9	0.1	300.6	0.7	303.4	0.2	303.7	0.3
0.99	302.3±0.06	302.7	0.1	302.7	0.1	302.9	0.2	298.0	1.4	303.4	0.4	303.7	0.4
+30°													
0	340.5±0.15	333.3	2.1	332.6	2.3	332.5	2.3	331.9	2.5	334.7	1.7	332.8	2.3
0.004	328.2±0.38	324.9	1.0	323.8	1.3	324.0	1.3	322.7	1.7	322.2	1.8	321.3	2.1
0.008	323.7±0.81	318.8	1.5	318.5	1.6	319.4	1.3	316.9	2.1	316.0	2.4	314.8	2.7
0.012	315.4±0.65	315.1	0.1	315.3	0.0	316.5	0.4	313.7	0.5	312.6	0.9	311.5	1.2
0.016	311.3±0.84	313.1	0.6	313.3	0.6	314.7	1.1	311.9	0.2	310.6	0.2	309.8	0.5
0.02	310.6±0.95	312.1	0.5	312.2	0.5	313.4	0.9	311.0	0.1	309.4	0.4	308.8	0.6
0.025	310.6±1.29	311.8	0.4	311.5	0.3	312.4	0.6	310.5	0.0	308.7	0.6	308.1	0.8
0.1	312.0±0.95	316.9	1.6	316.5	1.5	317.5	1.8	311.2	0.3	311.5	0.1	307.1	1.6
0.25	307.0±0.70	306.8	0.1	306.8	0.1	308.8	0.6	308.8	0.6	308.1	0.4	306.2	0.3
0.5	303.0±0.17	303.7	0.2	303.8	0.3	304.3	0.4	305.6	0.8	304.8	0.6	305.4	0.8
0.75	302.3±0.21	303.1	0.3	303.1	0.3	303.5	0.4	304.3	0.7	304.2	0.6	304.7	0.8
0.98	302.1±0.10	302.9	0.3	303.0	0.3	303.2	0.4	303.8	0.6	303.5	0.5	303.8	0.6
0.99	301.7±0.10	302.9	0.4	302.9	0.4	303.2	0.5	303.8	0.7	303.5	0.6	303.8	0.7
+45°													
0	349.2±0.36	347.9	0.4	346.7	0.7	347.0	0.6	339.3	2.8	343.0	1.8	337.9	3.2
0.004	340.9±0.27	345.5	1.4	344.5	1.1	344.6	1.1	335.0	1.7	338.7	0.6	325.0	4.7
0.008	338.9±0.30	343.4	1.3	342.8	1.1	342.6	1.1	332.2	2.0	335.6	1.0	319.9	5.6
0.012	333.9±0.48	342.0	2.4	341.6	2.3	341.2	2.2	330.2	1.1	334.3	0.1	317.2	5.0
0.016	331.4±0.31	341.1	2.9	340.8	2.8	340.5	2.7	328.8	0.8	333.8	0.7	315.5	4.8
0.02	330.3±0.32	340.7	3.1	340.3	3.0	340.1	3.0	327.7	0.8	333.5	1.0	314.4	4.8
0.025	329.7±0.35	340.5	3.2	340.0	3.1	339.9	3.1	326.6	1.0	333.3	1.1	313.4	4.9
0.1	327.7±0.27	339.4	3.5	338.6	3.3	338.6	3.3	321.5	1.9	330.1	0.7	314.3	4.1
0.25	323.2±0.23	335.2	3.7	334.1	3.4	334.3	3.4	319.6	1.1	318.8	1.4	309.0	4.4
0.5	309.8±0.22	318.0	2.7	314.5	1.5	316.7	2.2	310.9	0.4	306.3	1.1	306.9	0.9
0.75	303.5±0.09	304.6	0.4	303.9	0.1	304.6	0.3	305.4	0.6	305.0	0.5	305.5	0.6
0.98	303.1±0.10	304.2	0.4	303.7	0.2	304.3	0.4	303.8	0.2	304.1	0.3	304.4	0.4
0.99	302.5±0.13	304.2	0.6	303.7	0.4	304.3	0.6	303.7	0.4	304.1	0.5	304.3	0.6

Tabla 4.26 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.5\text{m}$, $z=0.25\text{m}$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	rke_t	dif %	$rngke_t$	dif %	ske_t	dif %	rsm	dif %	skw	dif %	$sstk_w$	dif %
+15°													
0	338.6±0.16	329.5	2.7	329.1	2.8	327.6	3.2	329.6	2.7	330.7	2.3	330.5	2.4
0.004	322.6±1.21	317.1	1.7	317.3	1.7	316.7	1.8	317.6	1.5	318.8	1.2	319.2	1.1
0.008	319.9±1.51	312.0	2.5	312.3	2.4	312.1	2.5	312.8	2.2	311.9	2.5	313.0	2.2
0.012	308.5±1.55	309.3	0.3	309.6	0.4	309.6	0.3	310.2	0.5	309.1	0.2	309.9	0.4
0.016	307.0±1.05	307.6	0.2	307.9	0.3	308.0	0.3	308.7	0.5	307.8	0.3	308.2	0.4
0.02	305.5±1.14	306.5	0.3	306.7	0.4	307.0	0.5	307.6	0.7	307.0	0.5	307.2	0.6
0.025	304.9±0.50	305.6	0.2	305.7	0.3	306.1	0.4	306.8	0.6	306.4	0.5	306.5	0.5
0.1	305.6±0.20	303.1	0.8	303.0	0.9	303.7	0.6	304.5	0.4	304.8	0.3	305.0	0.2
0.25	304.5±0.11	303.0	0.5	302.9	0.5	303.5	0.3	304.5	0.0	304.7	0.0	304.9	0.1
0.5	304.3±0.12	302.9	0.5	302.8	0.5	303.1	0.4	304.2	0.1	304.3	0.0	304.7	0.1
0.75	303.1±0.07	302.8	0.1	302.8	0.1	303.0	0.0	303.7	0.2	303.9	0.3	304.3	0.4
0.98	302.1±0.07	302.7	0.2	302.7	0.2	302.9	0.3	303.4	0.4	303.4	0.4	303.7	0.5
0.99	302.6±0.07	302.7	0.0	302.7	0.0	302.9	0.1	303.4	0.3	303.4	0.3	303.7	0.3
+30°													
0	339.8±0.14	339.3	0.1	330.8	2.6	332.7	2.1	331.0	2.6	334.3	1.6	332.7	2.1
0.004	326.2±0.77	322.2	1.2	325.3	0.3	324.4	0.6	324.2	0.6	322.5	1.1	321.3	1.5
0.008	324.2±1.05	317.3	2.1	320.0	1.3	319.0	1.6	319.6	1.4	316.0	2.5	314.8	2.9
0.012	313.7±1.15	315.1	0.4	315.9	0.7	315.6	0.6	316.3	0.8	312.4	0.4	311.5	0.7
0.016	312.5±0.77	313.8	0.4	313.1	0.2	313.6	0.4	313.9	0.5	310.5	0.6	309.8	0.9
0.02	311.3±1.03	313.1	0.6	311.5	0.1	312.5	0.4	312.2	0.3	309.4	0.6	308.8	0.8
0.025	311.1±1.09	312.6	0.5	310.7	0.1	311.9	0.3	310.6	0.2	308.7	0.8	308.1	1.0
0.1	312.6±1.03	317.9	1.7	316.5	1.3	317.2	1.5	311.0	0.5	311.4	0.4	307.1	1.7
0.25	307.8±0.61	307.0	0.2	307.1	0.2	309.1	0.4	310.3	0.8	308.1	0.1	306.2	0.5
0.5	304.6±0.12	303.7	0.3	303.8	0.2	304.4	0.1	308.9	1.4	304.8	0.1	305.4	0.3
0.75	302.8±0.10	303.1	0.1	303.1	0.1	303.5	0.2	304.1	0.4	304.2	0.4	304.7	0.6
0.98	301.6±0.10	302.9	0.5	303.0	0.5	303.2	0.5	303.5	0.7	303.6	0.7	303.8	0.7
0.99	302.3±0.10	302.9	0.2	302.9	0.2	303.2	0.3	303.5	0.4	303.5	0.4	303.8	0.5
+45°													
0	348.5±0.29	347.9	0.2	346.7	0.5	347.0	0.4	341.9	1.9	344.2	1.3	336.1	3.6
0.004	340.0±0.32	345.5	1.6	344.5	1.3	344.6	1.3	337.6	0.7	338.1	0.6	326.6	4.0
0.008	339.4±0.35	343.4	1.2	342.8	1.0	342.6	0.9	334.2	1.5	336.0	1.0	319.8	5.8
0.012	333.2±0.37	342.0	2.6	341.6	2.5	341.2	2.4	331.8	0.4	334.9	0.5	316.3	5.1
0.016	331.9±0.32	341.1	2.8	340.8	2.7	340.5	2.6	330.2	0.5	334.2	0.7	314.6	5.2
0.02	331.0±0.35	340.7	2.9	340.3	2.8	340.1	2.8	329.2	0.5	333.7	0.8	313.8	5.2
0.025	330.3±0.35	340.5	3.1	340.0	2.9	339.9	2.9	328.6	0.5	333.3	0.9	313.2	5.2
0.1	328.0±0.29	339.4	3.5	338.6	3.2	338.6	3.2	326.8	0.4	330.2	0.7	312.8	4.6
0.25	323.1±0.26	335.2	3.8	334.1	3.4	334.3	3.5	320.0	0.9	318.8	1.3	308.9	4.4
0.5	310.9±0.16	318.1	2.3	314.5	1.1	316.7	1.8	315.0	1.3	306.3	1.5	306.9	1.3
0.75	304.1±0.14	304.6	0.2	303.9	0.1	304.6	0.2	305.2	0.4	305.0	0.3	305.5	0.5
0.98	302.3±0.24	304.2	0.6	303.7	0.5	304.3	0.7	304.2	0.6	304.1	0.6	304.4	0.7
0.99	303.1±0.11	304.2	0.4	303.7	0.2	304.3	0.4	304.2	0.4	304.1	0.3	304.3	0.4

Tabla 4.27 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.25\text{m}$, $z=0.5\text{m}$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	$rk\epsilon_t$	dif %	$rngk\epsilon_t$	dif %	$sk\epsilon_t$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	sstk ω	dif %
+15°													
0	333.9±0.14	326.1	2.3	323.2	3.2	325.7	2.5	326.5	2.2	329.1	1.4	329.8	1.2
0.004	325.5±0.59	315.9	3.0	313.5	3.7	312.9	3.9	314.4	3.4	317.1	2.6	316.7	2.7
0.008	313.2±1.56	309.8	1.1	309.1	1.3	309.3	1.2	310.6	0.8	310.1	1.0	310.6	0.8
0.012	311.4±0.90	307.2	1.4	307.0	1.4	307.6	1.2	308.7	0.9	307.5	1.3	308.0	1.1
0.016	305.9±0.80	305.8	0.0	305.9	0.0	306.6	0.2	307.6	0.6	306.4	0.2	306.7	0.3
0.02	305.0±0.59	305.0	0.0	305.1	0.0	305.9	0.3	306.9	0.6	305.8	0.3	306.1	0.3
0.025	304.2±0.47	304.5	0.1	304.6	0.1	305.3	0.4	306.3	0.7	305.4	0.4	305.5	0.4
0.1	303.0±0.15	303.0	0.0	303.0	0.0	303.5	0.1	304.1	0.4	304.2	0.4	304.4	0.5
0.25	302.4±0.11	302.8	0.1	302.8	0.1	303.0	0.2	303.7	0.4	303.9	0.5	304.3	0.6
0.5	301.7±0.10	302.7	0.4	302.7	0.3	302.9	0.4	303.5	0.6	303.7	0.7	304.0	0.8
0.75	301.9±0.11	302.7	0.3	302.6	0.2	302.8	0.3	303.3	0.5	303.4	0.5	303.7	0.6
0.98	301.8±0.10	302.7	0.3	302.6	0.3	302.7	0.3	303.1	0.4	303.1	0.4	303.3	0.5
0.99	301.6±0.10	302.7	0.3	302.6	0.3	302.7	0.4	303.0	0.5	303.1	0.5	303.2	0.5
+30°													
0	334.1±0.21	329.3	1.4	326.5	2.3	327.9	1.8	330.0	1.2	330.7	1.0	330.2	1.2
0.004	325.9±0.83	317.4	2.6	316.7	2.8	316.5	2.9	317.7	2.5	318.1	2.4	318.7	2.2
0.008	313.8±2.06	311.1	0.8	309.9	1.2	311.8	0.6	312.5	0.4	311.1	0.9	311.5	0.7
0.012	311.9±1.39	308.0	1.3	307.2	1.5	309.3	0.9	309.8	0.7	308.5	1.1	308.7	1.0
0.016	306.3±1.22	306.4	0.0	305.9	0.1	307.7	0.5	308.2	0.6	307.3	0.3	307.4	0.4
0.02	305.3±0.93	305.4	0.0	305.2	0.1	306.7	0.4	307.1	0.6	306.6	0.4	306.8	0.5
0.025	304.4±0.73	304.7	0.1	304.6	0.1	305.9	0.5	306.3	0.6	306.1	0.6	306.3	0.6
0.1	303.1±0.19	303.3	0.1	303.4	0.1	304.2	0.3	304.8	0.6	304.8	0.5	305.2	0.7
0.25	302.7±0.18	303.1	0.1	303.1	0.1	303.6	0.3	304.4	0.6	304.5	0.6	304.9	0.7
0.5	301.5±0.09	302.9	0.5	302.9	0.5	303.3	0.6	303.9	0.8	304.0	0.9	304.5	1.0
0.75	301.6±0.09	302.9	0.4	302.9	0.4	303.1	0.5	303.5	0.6	303.6	0.7	304.0	0.8
0.98	301.5±0.09	302.8	0.4	302.8	0.4	303.0	0.5	303.2	0.6	303.2	0.6	303.4	0.6
0.99	301.3±0.09	302.8	0.5	302.8	0.5	303.0	0.6	303.2	0.6	303.2	0.6	303.4	0.7
+45°													
0	342.1±0.29	343.6	0.4	343.4	0.4	342.9	0.2	335.2	2.0	335.3	2.0	333.8	2.4
0.004	337.5±0.28	339.9	0.7	339.3	0.6	338.9	0.4	321.8	4.6	324.6	3.8	321.5	4.7
0.008	330.1±0.54	337.8	2.3	336.1	1.8	336.7	2.0	320.1	3.0	317.7	3.8	314.7	4.7
0.012	329.1±0.33	336.5	2.3	334.3	1.6	335.3	1.9	319.5	2.9	313.4	4.8	311.4	5.4
0.016	324.4±0.44	335.6	3.5	333.5	2.8	334.4	3.1	319.1	1.6	311.0	4.1	309.8	4.5
0.02	323.4±0.38	334.9	3.6	333.1	3.0	333.8	3.2	318.9	1.4	309.9	4.2	308.9	4.5
0.025	322.6±0.28	334.3	3.6	332.9	3.2	333.2	3.3	318.8	1.2	309.7	4.0	308.3	4.4
0.1	320.2±0.22	331.2	3.4	329.2	2.8	330.1	3.1	318.4	0.6	310.8	2.9	307.4	4.0
0.25	310.9±0.36	318.1	2.3	314.6	1.2	316.7	1.9	317.4	2.1	306.1	1.6	306.7	1.4
0.5	303.1±0.16	304.3	0.4	303.8	0.2	304.4	0.4	304.9	0.6	305.1	0.7	305.6	0.8
0.75	302.8±0.09	303.9	0.4	303.5	0.2	304.0	0.4	304.3	0.5	304.3	0.5	304.7	0.6
0.98	302.6±0.12	303.8	0.4	303.5	0.3	303.9	0.4	303.7	0.4	305.1	0.8	304.0	0.5
0.99	302.3±0.12	303.8	0.5	303.5	0.4	303.9	0.5	303.7	0.4	305.9	1.2	304.0	0.5

Finalmente, la inclinación $+45^\circ$ presento diferencias máxima y mínima en la pared caliente de 2.4% con el modelo $sst\omega$ y 0.2% con el modelo $sk\epsilon_t$. La desviación estándar tuvo valores entre 0.09 y 0.54 y el comportamiento de los demás puntos del perfil fue variado teniendo puntos con diferencias de hasta 5.4% con el modelo $sst\omega$ y puntos con diferencia de 0.2% con el modelo $rngk\epsilon_t$.

La comparación de la pared adiabática inferior de la cavidad presentada en la Tabla 4.28, muestra para la inclinación $+15^\circ$ diferencias máximas de 1.1% en la posición $x=0.01$ m y disminuye la diferencia en los demás puntos del perfil. La inclinación $+30^\circ$ tuvo diferencias máximas de 2.1% con el modelo $rk\epsilon_t$ y mínima de 0% con el mismo modelo. Finalmente, la inclinación $+45^\circ$ tuvo diferencias de hasta 2.9% con el modelo $rk\epsilon_t$ y mínima de 0% con el modelo rsm .

Por su parte el perfil de la pared adiabática superior de la cavidad, mostrado en la Tabla 4.29, indica que la inclinación $+15^\circ$ tuvo diferencia máxima de 1.8% con el modelo rsm y mínima de 0% con los modelos $sst\omega$ y $rngk\epsilon_t$. Para la inclinación $+30^\circ$ la diferencia llegó hasta 2% con el modelo rsm y una mínima de 0.1% con el modelo $rk\epsilon_t$. Finalmente, la inclinación $+45^\circ$ tuvo diferencia máxima de 1.7% con el modelo rsm y mínima de 0% con los modelos $k-\epsilon_t$.

Por último, la comparación del perfil $x=0.5$ m, $z=0.5$ m de la Tabla 4.30 indica que la inclinación $+15^\circ$ tuvo diferencia máxima de 2.2% con el modelo rsm y mínima de 0.1% con el modelo $sk\epsilon_t$. La inclinación $+30^\circ$ presentó diferencia máxima de 3.4% con el modelo $sk\epsilon_t$ y mínima de 0.2% con el modelo rsm . Finalmente, la inclinación $+45^\circ$ presentó diferencias máxima de 4.5% con el modelo $rk\epsilon_t$ y mínima de 0.1% con el modelo rsm . El comportamiento de la comparación de temperatura en los dos casos estudiados ($\epsilon=0.05$ y $\epsilon=0.9$) con los modelos de turbulencia seleccionados fue un aumento de la diferencia con el aumento del número de Rayleigh, además, esta diferencia aumentó con el aumento de la inclinación de la cavidad (de $+15^\circ$ hasta $+45^\circ$). Cabe señalar que los casos sin radiación tuvieron la mayor diferencia comparados con los casos donde se consideró el intercambio radiativo, ya que de una diferencia máxima puntual de temperatura del 24% sin radiación, se redujo a una diferencia máxima puntual del 5.8% en los casos con intercambio radiativo.

Tabla 4.28 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta (perfil $y=0.0$, $z=0.5m$) con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	$rk\epsilon_t$	dif %	$rngk\epsilon_t$	dif %	$sk\epsilon_t$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	sstk ω	dif %
+15°													
0.01	320.1±0.15	316.5	1.1	316.5	1.1	316.5	1.1	316.5	1.1	317.2	0.9	316.9	1.0
0.02	318.7±0.15	315.9	0.9	315.9	0.9	315.6	1.0	315.8	0.9	316.6	0.7	316.3	0.8
0.03	317.7±0.14	315.5	0.7	315.6	0.7	315.0	0.9	315.4	0.7	316.3	0.5	316.0	0.5
0.04	317.1±0.14	315.3	0.6	315.4	0.5	314.6	0.8	315.1	0.6	316.0	0.3	315.8	0.4
0.05	316.3±0.14	315.1	0.4	315.2	0.4	314.3	0.6	314.9	0.4	315.8	0.2	315.6	0.2
0.1	314.1±0.14	314.5	0.1	314.5	0.1	313.7	0.1	314.1	0.0	315.1	0.3	314.9	0.2
0.25	312.2±0.16	313.4	0.4	313.4	0.4	312.4	0.1	312.8	0.2	313.7	0.5	313.5	0.4
0.5	309.6±0.14	312.2	0.8	312.2	0.8	311.4	0.6	310.9	0.4	312.0	0.8	311.8	0.7
0.75	307.8±0.09	309.9	0.7	309.9	0.7	309.2	0.5	308.1	0.1	309.3	0.5	309.0	0.4
+30°													
0.01	320.4±0.18	320.2	0.0	319.7	0.2	319.9	0.1	319.7	0.2	320.2	0.1	319.3	0.3
0.02	319.0±0.18	319.7	0.2	319.2	0.1	319.2	0.1	319.0	0.0	319.6	0.2	318.8	0.1
0.03	318.0±0.17	319.4	0.4	318.9	0.3	318.8	0.2	318.6	0.2	319.1	0.3	318.4	0.1
0.04	317.3±0.17	319.4	0.6	318.8	0.5	318.6	0.4	318.3	0.3	319.0	0.5	318.2	0.3
0.05	316.6±0.16	319.8	1.0	319.2	0.8	319.0	0.7	318.4	0.6	319.1	0.8	318.2	0.5
0.1	314.5±0.15	321.0	2.1	321.2	2.1	319.8	1.7	318.6	1.3	319.5	1.6	318.6	1.3
0.25	312.6±0.15	317.3	1.5	317.0	1.4	316.3	1.2	315.1	0.8	316.2	1.1	315.1	0.8
0.5	310.2±0.23	314.2	1.3	314.1	1.3	313.4	1.1	311.9	0.6	313.0	0.9	311.9	0.6
0.75	308.3±0.15	312.0	1.2	312.1	1.2	311.4	1.0	309.3	0.3	310.6	0.7	309.4	0.3
+45°													
0.01	324.7±0.24	328.6	1.2	325.4	0.2	327.2	0.8	322.0	0.8	323.2	0.5	320.9	1.2
0.02	323.4±0.23	328.3	1.5	325.3	0.6	327.1	1.1	321.7	0.5	322.4	0.3	320.3	0.9
0.03	322.4±0.21	328.3	1.9	325.5	1.0	326.9	1.4	321.6	0.2	322.0	0.1	320.0	0.7
0.04	321.7±0.20	328.4	2.1	325.8	1.3	326.8	1.6	321.8	0.0	321.8	0.0	319.8	0.6
0.05	320.9±0.20	328.5	2.4	325.9	1.5	326.7	1.8	322.1	0.4	321.6	0.2	319.7	0.4
0.1	318.8±0.18	328.0	2.9	325.8	2.2	326.3	2.3	323.1	1.4	321.4	0.8	319.1	0.1
0.25	316.8±0.24	326.8	3.2	325.3	2.7	325.3	2.7	321.6	1.5	321.2	1.4	318.6	0.6
0.5	313.8±0.18	322.3	2.7	321.2	2.4	320.5	2.1	317.1	1.1	317.4	1.1	315.3	0.5
0.75	310.7±0.17	316.3	1.8	315.8	1.6	315.0	1.4	312.2	0.5	312.6	0.6	310.7	0.0

Tabla 4.29 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo (perfil $y=1.0$, $z=0.5m$) y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	rke_t	dif %	$rngke_t$	dif %	ske_t	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	sstk ω	dif %
+15°													
0.01	330.2±0.13	327.1	0.9	327.3	0.9	327.5	0.8	324.6	1.7	327.5	0.8	326.0	1.3
0.02	329.0±0.12	325.6	1.0	325.5	1.1	325.5	1.1	323.0	1.8	326.3	0.8	324.9	1.3
0.03	327.6±0.12	324.8	0.9	324.3	1.0	324.3	1.0	322.1	1.7	325.7	0.6	324.1	1.1
0.04	326.9±0.12	324.1	0.8	323.5	1.1	323.4	1.1	321.5	1.6	325.1	0.5	323.4	1.1
0.05	326.1±0.11	323.6	0.8	322.8	1.0	322.7	1.0	321.1	1.5	324.7	0.4	322.9	1.0
0.1	323.6±0.12	321.4	0.7	320.5	1.0	320.4	1.0	319.4	1.3	322.6	0.3	320.8	0.9
0.25	320.4±0.11	317.1	1.0	316.8	1.1	316.7	1.2	315.3	1.6	318.2	0.7	317.2	1.0
0.39	317.6±0.09	315.3	0.7	314.8	0.9	314.7	0.9	313.4	1.3	316.3	0.4	315.3	0.7
0.5	315.7±0.09	314.3	0.4	313.7	0.6	313.6	0.7	312.7	0.9	315.1	0.2	314.2	0.5
0.75	312.0±0.10	312.3	0.1	311.9	0.0	311.6	0.1	310.9	0.3	312.6	0.2	312.2	0.0
+30°													
0.01	335.7±0.16	332.6	0.9	332.5	1.0	332.3	1.0	329.4	1.9	330.9	1.5	329.3	1.9
0.02	334.7±0.16	331.4	1.0	331.2	1.0	331.0	1.1	327.6	2.1	330.2	1.3	328.4	1.9
0.03	333.4±0.16	330.7	0.8	330.6	0.8	330.3	0.9	326.5	2.0	329.8	1.1	327.8	1.7
0.04	332.6±0.16	330.3	0.7	330.1	0.8	329.9	0.8	325.8	2.0	329.5	0.9	327.4	1.6
0.05	331.8±0.16	329.9	0.6	329.7	0.6	329.5	0.7	325.3	2.0	329.2	0.8	327.0	1.4
0.1	328.9±0.17	328.6	0.1	328.4	0.2	328.1	0.2	323.5	1.6	327.8	0.3	325.3	1.1
0.25	324.1±0.16	325.3	0.4	325.1	0.3	324.9	0.2	320.2	1.2	324.4	0.1	321.3	0.9
0.39	320.1±0.16	322.5	0.8	322.3	0.7	322.1	0.6	317.8	0.7	321.5	0.4	318.9	0.4
0.5	317.7±0.16	320.4	0.8	320.1	0.8	320.0	0.7	316.0	0.5	319.4	0.5	316.9	0.2
0.75	313.3±0.14	315.7	0.8	315.4	0.7	315.3	0.7	312.3	0.3	314.2	0.3	311.6	0.5
+45°													
0.01	340.6±0.35	341.4	0.2	340.6	0.0	340.6	0.0	334.8	1.7	338.1	0.7	335.6	1.5
0.02	339.7±0.35	340.9	0.4	340.3	0.2	340.2	0.1	333.9	1.7	337.5	0.6	335.1	1.4
0.03	338.7±0.34	340.6	0.6	340.2	0.5	339.8	0.3	333.4	1.6	337.1	0.4	334.6	1.2
0.04	338.0±0.34	340.3	0.7	340.1	0.6	339.5	0.5	333.0	1.5	336.8	0.3	334.1	1.1
0.05	337.2±0.33	340.0	0.8	339.6	0.7	339.2	0.6	332.6	1.4	336.6	0.2	333.7	1.0
0.1	334.6±0.33	338.7	1.2	337.9	1.0	337.8	1.0	331.1	1.1	335.2	0.2	331.5	0.9
0.25	329.2±0.31	334.7	1.7	334.1	1.5	333.8	1.4	327.2	0.6	330.7	0.5	326.1	0.9
0.39	325.0±0.28	331.0	1.8	330.1	1.6	330.1	1.6	324.0	0.3	326.4	0.4	321.1	1.2
0.5	322.1±0.26	328.1	1.9	327.3	1.6	327.2	1.6	321.7	0.1	323.2	0.3	317.3	1.5
0.75	316.3±0.21	322.3	1.9	321.7	1.7	321.6	1.7	315.9	0.1	316.1	0.0	312.5	1.2

Tabla 4.30 Comparación de temperaturas (K) en cavidad abierta con paredes pintadas de negro, inclinada hacia abajo (perfil $x=0.5\text{m}$, $z=0.5\text{m}$) y $Ra=6.8 \times 10^{11}$.

x (m)	Exp	rke_t	dif %	$rngke_t$	dif %	ske_t	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	$sstk\omega$	dif %
+15°													
0.97	321.3±0.37	319.4	0.6	318.5	0.9	318.7	0.8	314.5	2.1	319.7	0.5	317.3	1.3
0.98	321.2±0.43	318.3	0.9	318.4	0.9	318.9	0.7	314.1	2.2	319.2	0.6	316.6	1.4
0.984	320.2±0.27	317.5	0.8	318.3	0.6	318.8	0.4	313.9	2.0	318.7	0.5	316.2	1.3
0.988	319.9±0.37	316.7	1.0	317.9	0.6	318.4	0.5	313.7	2.0	318.0	0.6	315.7	1.3
0.992	319.4±0.46	315.8	1.2	317.2	0.7	317.6	0.6	313.5	1.9	317.2	0.7	315.2	1.3
0.996	316.5±0.13	314.9	0.5	315.9	0.2	316.1	0.1	313.2	1.0	316.2	0.1	314.7	0.6
+30°													
0.97	324.4±0.28	330.6	1.9	330.3	1.8	330.8	2.0	319.7	1.4	327.4	0.9	320.2	1.3
0.98	324.2±0.35	329.5	1.7	329.5	1.7	331.1	2.2	319.9	1.3	327.0	0.9	319.9	1.3
0.984	323.1±0.23	328.6	1.7	328.7	1.7	331.2	2.5	319.9	1.0	326.5	1.0	319.5	1.1
0.988	322.8±0.35	327.3	1.4	327.5	1.5	331.1	2.6	319.6	1.0	325.6	0.9	318.9	1.2
0.992	322.2±0.50	325.5	1.0	325.8	1.1	330.8	2.7	319.0	1.0	324.2	0.6	318.2	1.2
0.996	318.7±0.19	323.2	1.4	323.4	1.5	329.6	3.4	318.0	0.2	322.3	1.1	317.5	0.4
+45°													
0.97	329.2±0.34	340.9	3.6	340.1	3.3	340.1	3.3	328.9	0.1	333.0	1.2	315.1	4.3
0.98	329.0±0.37	340.8	3.6	339.3	3.1	339.5	3.2	327.9	0.3	332.1	1.0	315.9	4.0
0.984	327.7±0.30	340.7	4.0	338.5	3.3	338.7	3.3	327.4	0.1	331.3	1.1	316.3	3.5
0.988	327.4±0.35	340.4	4.0	337.1	3.0	337.4	3.1	326.7	0.2	330.2	0.8	316.6	3.3
0.992	326.9±0.44	339.7	3.9	335.0	2.5	335.3	2.6	325.7	0.4	328.5	0.5	316.9	3.1
0.996	323.3±0.28	337.8	4.5	331.9	2.7	332.1	2.7	324.2	0.3	326.3	0.9	317.1	1.9

En la Tabla 4.31 se muestra la comparación de los números de Nusselt para la cavidad abierta con paredes de aluminio pulido, donde el $Ra=1.7 \times 10^{11}$ tuvo una menor diferencia promedio el modelo $rk\epsilon_t$ con 18.8% y la máxima diferencia la tuvo el modelo $sstk\omega$ con 109.7%. En los $Ra=3.4 \times 10^{11}$ y 6.8×10^{11} este comportamiento se mantiene con valores de 17.2% y 129.3% para el primero, y 17.2% y 86.2% para el segundo. La diferencia promedio tiende a disminuir con el aumento del número de Rayleigh. La Tabla 4.32 presenta los resultados de los números de Nusselt en la cavidad con paredes pintadas de negro, en donde para el $Ra=1.7 \times 10^{11}$ la aproximación más cercana la tuvo el modelo $sk\omega$ con una diferencia de 23.7% y la más lejana la tuvo el modelo rsm con 42.2%. Para el $Ra=3.4 \times 10^{11}$ este comportamiento se mantuvo con valores de 19% y 38.2%, respectivamente. Finalmente, el $Ra=6.8 \times 10^{11}$ presentó una diferencia máxima con el modelo $sk\epsilon_t$ con un 34.7% y una mínima de 14.6% con el modelo $sk\omega$. De igual manera, la diferencia promedio disminuye con el aumento del número de Rayleigh.

4.3 Estudio numérico de la transferencia de calor en el receptor de cavidad para un sistema termosolar de torre central.

4.3.1 Efecto de la geometría.

En la Figura 4.15 se aprecian los casos de estudio. El caso (a) corresponde a un receptor de 2 m de largo y alto y 1 m de ancho, el (b) un receptor de 2 m de largo, 2.5 m de alto y 1 m de ancho, mientras que los casos (c) y (d) presentan las mismas dimensiones excepto que las paredes laterales tienen una segmentación formando un ángulo de 22.5° a la mitad de la distancia de anchura. Se llevó a cabo un estudio de independencia de malla con una temperatura de la pared caliente (T_h) de 1000 K ($Ra=5.17 \times 10^{11}$), una emisividad de las paredes de 0.9 y el modelo de turbulencia $rk\epsilon_t$. De acuerdo a la Tabla 4.33 los casos (a), (b), y (c) presentaron una independencia con un número de nodos totales de 45000 y el (d) 36000 nodos totales. Se puede apreciar que el caso (a) presenta un valor de flujo de calor de 166.2 kW/m², el (b) 185.6 kW/m², el (c) 169.3 kW/m² y el (d) 189.7 kW/m² con lo cual es apreciable que la geometría para un receptor de cavidad que presenta la menor pérdida de calor, es el caso (a) por lo que será la configuración analizada a continuación.

Tabla 4.31 Comparación de resultados del número de Nusselt en cavidad abierta
con paredes de aluminio pulido.

Inc.	Exp	$rk\epsilon_t$	dif %	$rngk\epsilon_t$	dif %	$sk\epsilon_t$	dif %	rsm	dif %	$sk\omega$	dif %	$sstk\omega$	dif %
Ra=1.7x10¹¹													
+45°	140	66	52.8	69	50.7	65	53.5	70	50.0	166	18.7	215	53.7
+30°	161	104	35.8	108	33.2	102	36.8	96	40.5	95	41.1	141	12.6
+15°	165	135	18.5	139	15.7	137	17.1	132	20.1	65	60.7	123	25.6
0°	175	184	5.1	187	6.9	187	6.9	178	1.7	145	17.1	146	16.6
-15°	186	174	6.6	163	12.4	200	7.3	278	49.4	679	265.0	804	331.7
-30°	189	167	11.9	145	23.6	189	0.4	227	20.0	398	109.8	428	125.7
-45°	196	198	0.7	156	20.3	233	18.6	327	66.6	509	159.3	592	201.8
Dif. Prom			18.8		23.3		20.1		35.5		96		109.7
Ra=3.4x10¹¹													
+45°	157	77	51.0	78	50.3	77	51.0	74	52.9	92	41.4	383	143.9
+30°	181	121	33.1	121	33.1	117	35.4	108	40.3	108	40.3	140	22.7
+15°	191	156	18.3	159	16.8	158	17.3	144	24.6	279	46.1	403	111.0
0°	203	198	2.5	199	2.0	201	1.0	186	8.4	156	23.2	156	23.2
-15°	211	200	5.5	190	10.1	233	10.3	269	27.5	660	212.6	797	277.4
-30°	221	201	9.4	179	19.1	237	7.2	260	17.5	485	118.9	537	142.6
-45°	226	228	0.9	186	17.7	271	19.9	339	50.1	545	141.5	643	184.5
Dif. Prom.			17.2		21.3		20.3		31.6		89.1		129.3
Ra=6.8x10¹¹													
+45°	170	82	52.0	85	50.0	80	53.1	84	50.5	91	46.4	164	3.3
+30°	198	136	31.5	139	29.6	134	32.4	121	38.6	116	41.2	239	20.6
+15°	214	178	16.7	181	15.3	179	16.2	159	25.5	338	57.7	542	153.4
0°	224	213	4.9	212	5.4	216	3.6	201	10.3	169	24.6	166	25.9
-15°	236	221	6.4	209	11.4	258	9.3	263	11.3	535	126.8	663	181.0
-30°	247	236	4.5	208	15.8	277	12.1	285	15.5	484	96.0	532	115.2
-45°	254	242	4.7	202	20.5	281	10.6	308	21.1	432	70.1	518	103.9
Dif. Prom.			17.2		21.1		19.6		24.7		66.1		86.2

Tabla 4.32 Comparación de resultados del número de Nusselt en cavidad abierta
con paredes pintadas de negro.

Inc.	Exp	rke _t	dif %	rngke _t	dif %	ske _t	dif %	rsm	dif %	skω	dif %	sstkω	dif %
Ra=1.7x10¹¹													
+45°	153	152	0.7	158	3.3	157	2.6	184	20.3	179	17.0	195	27.5
+30°	173	216	24.9	221	27.7	216	24.9	235	35.8	214	23.7	223	28.9
+15°	184	260	41.3	266	44.6	264	43.5	259	40.8	239	29.9	242	31.5
0°	196	261	33.2	261	33.2	267	36.2	261	33.2	237	20.9	242	23.5
-15°	197	296	50.3	284	44.2	298	51.3	308	56.3	258	31.0	262	33.0
-30°	204	311	52.5	288	41.2	313	53.4	324	58.8	261	27.9	261	27.9
-45°	206	309	50.0	270	31.1	306	48.5	309	50.0	238	15.5	239	16.0
Dif. Prom.			36.1		32.2		37.2		42.2		23.7		26.9
Ra=3.4x10¹¹													
+45°	159	155	2.5	160	0.6	160	0.6	192	20.8	185	16.4	203	27.7
+30°	186	224	20.4	229	23.1	227	22.0	244	31.2	221	18.8	232	24.7
+15°	203	275	35.5	282	38.9	283	39.4	275	35.5	251	23.6	252	24.1
0°	214	287	34.1	289	35.0	298	39.3	284	32.7	256	19.6	263	22.9
-15°	219	315	43.8	304	38.8	324	47.9	325	48.4	271	23.7	273	24.7
-30°	230	335	45.7	309	34.3	341	48.3	346	50.4	274	19.1	275	19.6
-45°	231	347	50.2	301	30.3	345	49.4	342	48.1	259	12.1	260	12.6
Dif. Prom.			33.2		28.7		35.3		38.2		19		22.3
Ra=6.8x10¹¹													
+45°	178	163	8.4	169	5.1	168	5.6	205	15.2	193	8.4	217	21.9
+30°	209	240	14.8	245	17.2	245	17.2	260	24.4	235	12.4	246	17.7
+15°	228	298	30.7	305	33.8	309	35.5	300	31.6	269	18.0	269	18.0
0°	223	323	44.8	324	45.3	337	51.1	319	43.0	285	27.8	293	31.4
-15°	255	348	36.5	333	30.6	359	40.8	353	38.4	293	14.9	295	15.7
-30°	260	372	43.1	337	29.6	379	45.8	376	44.6	295	13.5	296	13.8
-45°	266	392	47.4	338	27.1	391	47.0	384	44.4	285	7.1	285	7.1
Dif. Prom.			32.2		27		34.7		34.5		14.6		17.9

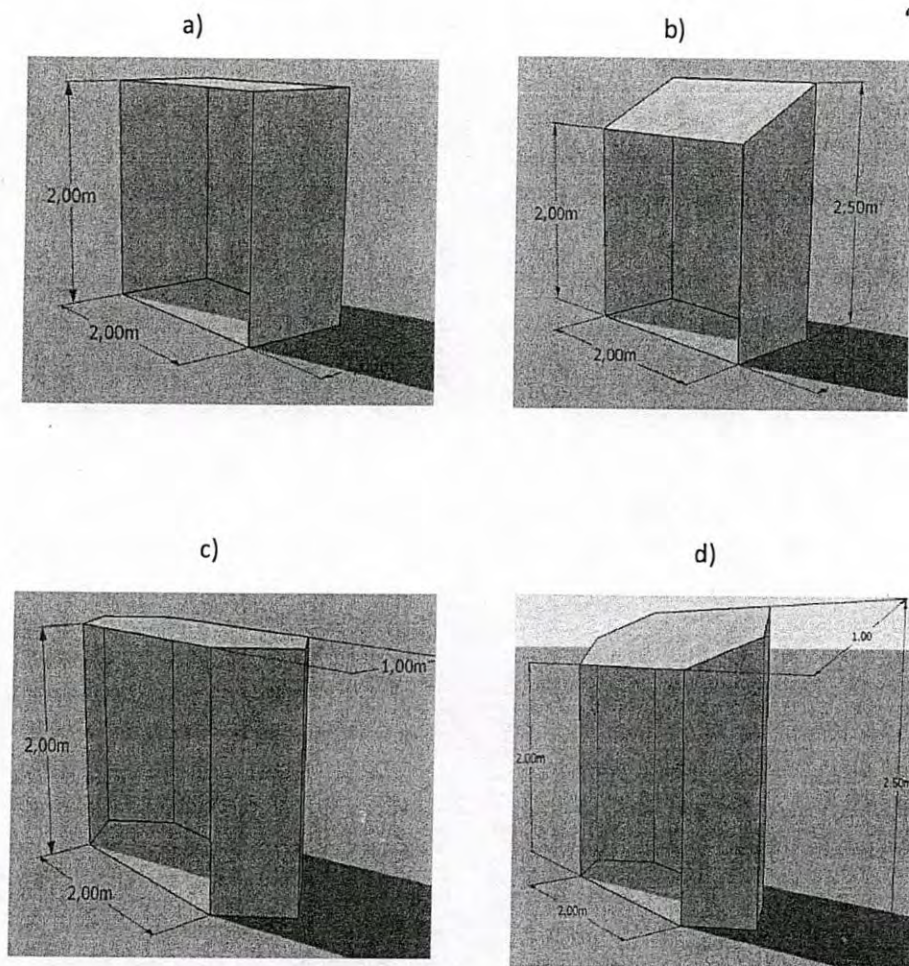


Figura 4.15 Diferentes geometrías de receptor de cavidad consideradas en el presente estudio.

Tabla 4.33 Independencia de malla para los receptores de cavidad.

Malla	Flujo de Calor (W/m ²)	Diferencia (%)
Caso a		
40x30x30	163,740	---
45x30x30	166,082	1.43
50x30x30	166,213	0.07
55x30x30	166,092	0.07
Caso b		
40x30x30	184,466	---
45x30x30	184,763	0.16
50x30x30	185,648	0.47
55x30x30	187,121	0.79
Caso c		
40x30x30	167,906	---
45x30x30	169,599	1.0
50x30x30	169,357	0.14
55x30x30	170,364	0.59
Caso d		
40x30x30	189,753	---
45x30x30	190,904	0.60
50x30x30	191,641	0.38
55x30x30	192,405	0.39

4.3.2 Efecto del ángulo de inclinación.

En la Figura 4.16 se presentan contornos de temperatura para una inclinación de $+15^\circ$, $Ra=2.21 \times 10^{11}$ ($T_h=600$ K) y una emisividad de 0.05. Se aprecia una capa límite térmica adyacente a la pared caliente ($x=0$ m), con un espesor menor a 0.025 m (hasta $y=1.5$ m). Al desplazarse el aire por la pared caliente adquiere energía, lo que eleva su temperatura hasta 560-580 K para chocar con la pared superior y salir con un valor de 320 a 340 K. En la parte superior del receptor, a partir de $y=1.6$ m, se tiene un área que abarca desde $x=0.1$ m hasta la abertura en donde el fluido tiene temperaturas entre 320 K y 380 K.

Cuando se cambia la inclinación a $+30^\circ$ (Figura 4.17), la temperatura de salida del fluido alcanza los 420 K. En la parte superior del receptor, a partir de $y=1.4$ m, se tiene un área que abarca desde $x=0.1$ m hasta la abertura en donde el fluido alcanza temperaturas entre 320 K y 420 K. La capa límite adyacente a la pared caliente, mantiene un espesor de 0.025 m hasta una altura de 1.2 m.

En la Figura 4.18 se presentan isolíneas de magnitud de velocidad para una inclinación $+15^\circ$ y $Ra=2.21 \times 10^{11}$. En la gráfica 4.18a ($z=0.5$ m), el fluido próximo a la pared caliente presenta una velocidad 0.1 m/s, se acelera por efecto del calentamiento del fluido y alcanza un valor máximo de 0.7 m/s alrededor de la esquina formada por la pared vertical izquierda y la pared superior, para después disminuir su velocidad por efecto del rozamiento de las capas de fluido y salir con valores de 0.35 m/s. La Figura 4.18b muestra el mismo comportamiento y se aprecia salida del fluido de la cavidad con una velocidad de 0.1 hasta 0.3 m/s. En tanto que la Figura 4.18c muestra que el fluido sale con valores de velocidad entre 0.15 y 0.3 m/s.

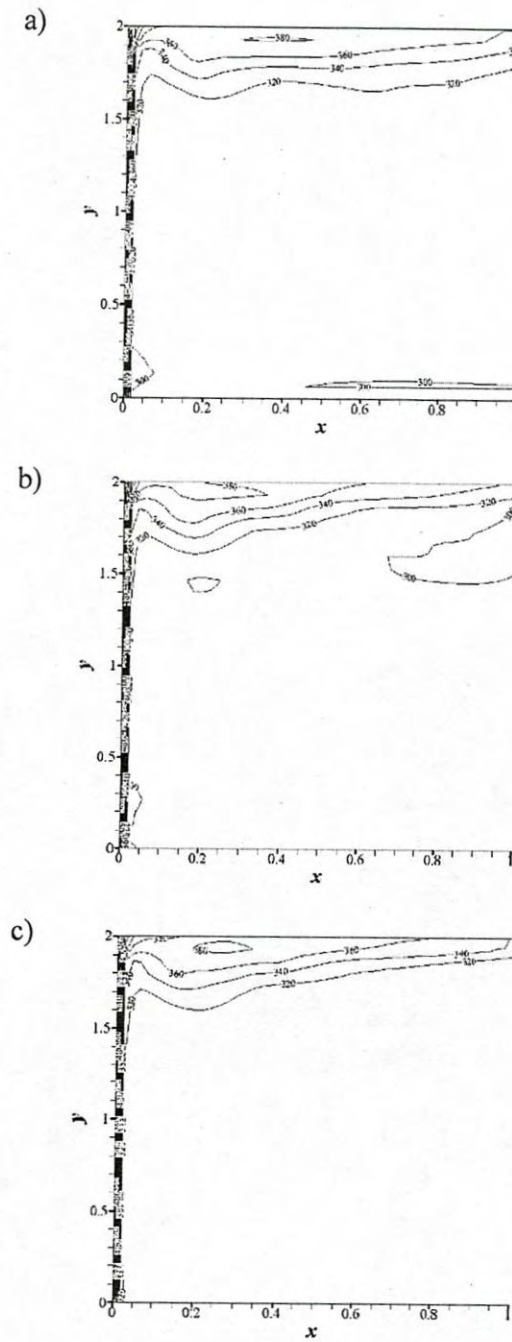


Figura 4.16 Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$, ($Ra=2.21 \times 10^{11}$ y emisividad de 0.05) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

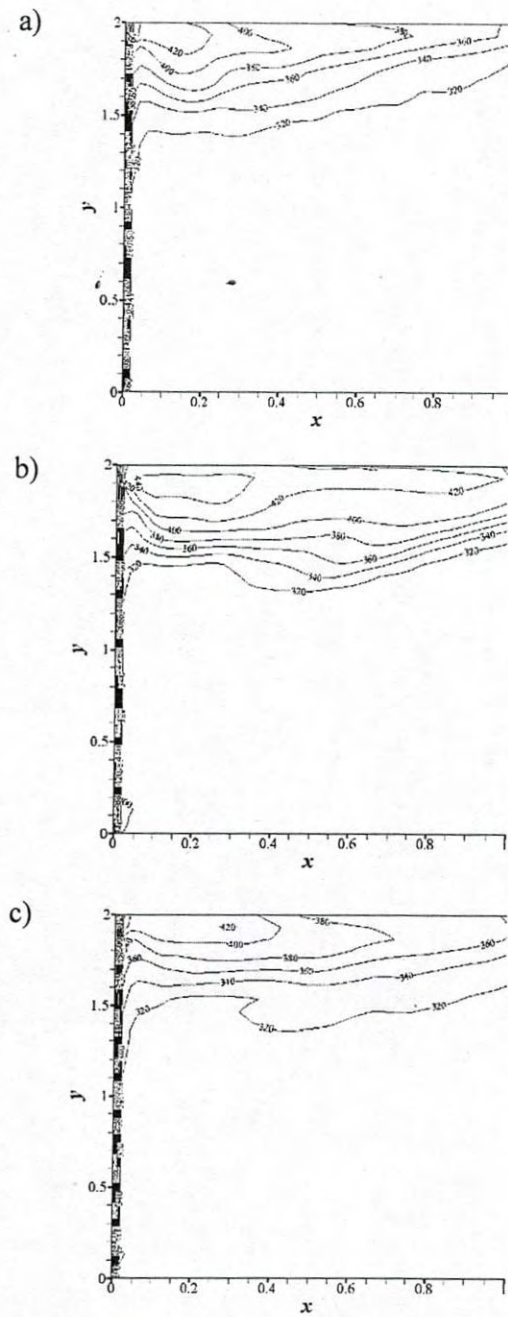
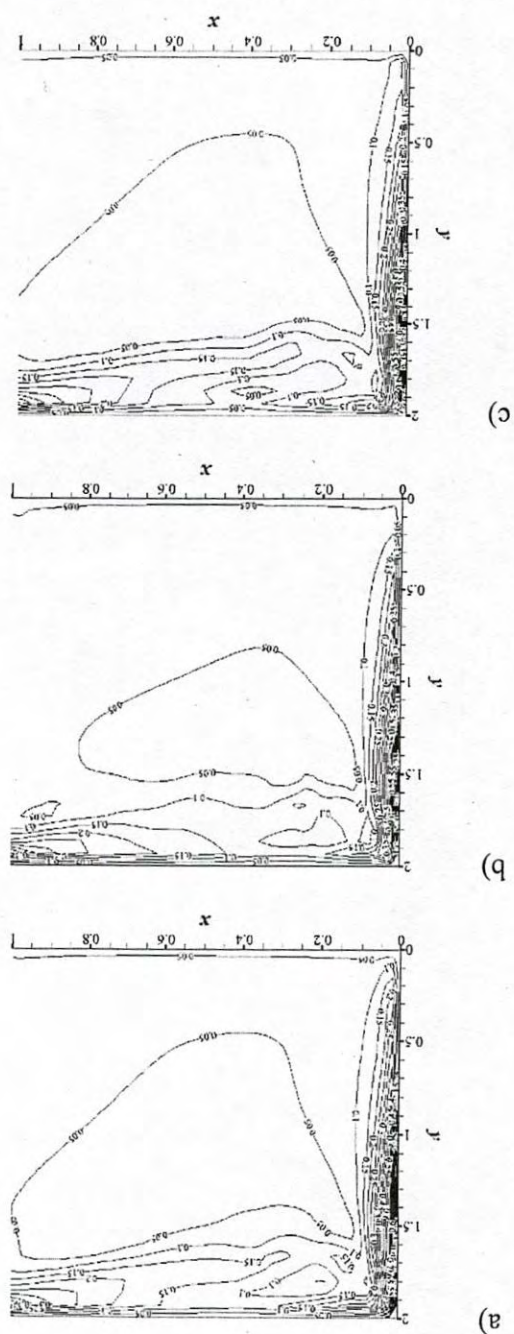


Figura 4.17 Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$, ($Ra=2.21 \times 10^{11}$ y emisividad de 0.05) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

Figura 4.18 Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$, ($Ra=2.21 \times 10^{11}$ y emisividad de 0.05) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.



Al cambiar la inclinación a $+30^\circ$ como se muestra en la Figura 4.19a se aprecian valores de velocidad entre 0.08 y 0.24 m/s. El fluido sale de la cavidad con valores máximos de 0.1 a 0.32 m/s. En la Figura 4.19b se aprecia que el fluido presenta un valor de 0.06 m/s al entrar en contacto con la pared caliente, adquiriendo velocidades máximas en la parte superior de 0.42 m/s. En la parte media de la cavidad se tiene una zona de baja velocidad con un valor de 0.04 m/s. La Figura 4.19c muestra un comportamiento cualitativo similar en tanto que la velocidad con que el fluido sale de la cavidad es de 0.1 a 0.4 m/s.

La Figura 4.20 muestra vectores de velocidad del fluido. Se aprecia que cuando el receptor está inclinado $+15^\circ$, en $z=0.5$ m el fluido entra al receptor y se desplaza hacia abajo a partir de $y=1.20$ m hasta $y=0$ m. Entra en contacto con la pared caliente, asciende y choca con la pared superior en donde se forman zonas de recirculación. Una porción de fluido al entrar en contacto con la recirculación cambia su sentido para salir por la abertura de la cavidad. En la Figura 4.20b se observa que el fluido entra, se desplaza hacia la pared caliente donde asciende hasta chocar con la pared superior. A una altura de $y=1.6$ m, se forma una recirculación, y una parte del fluido busca la salida y desaloja la cavidad a partir de una altura de $y=1.8$ m. En la Figura 4.20c este comportamiento se mantiene, en la zona de la abertura se aprecia como la corriente de fluido tiene una dirección que apunta hacia la pared inferior para después corregirse conforme se acerca a la pared caliente.

La Figura 4.21a muestra que para una inclinación de $+30^\circ$, el fluido entra con un desplazamiento hacia abajo para después empezar a ascender al acercarse a la pared caliente. Posteriormente asciende hasta chocar con la pared superior; se aprecia la presencia de un vórtice y un movimiento errático del fluido para después salir por la parte superior de la abertura a una altura de $y=1.6$ m. En la Figura 4.21b el fluido entra de forma perpendicular a la abertura y empieza su cambio de curso hacia la pared caliente en forma diagonal. Al chocar con la pared superior el fluido se comporta de forma turbulenta, formándose un vórtice en $y=0.75$ m. El fluido comienza a salir de la cavidad a partir de los 1.55 m de altura de la misma. En tanto que la Figura 4.21c muestra el comportamiento descrito previamente, pero con la presencia de dos vórtices.

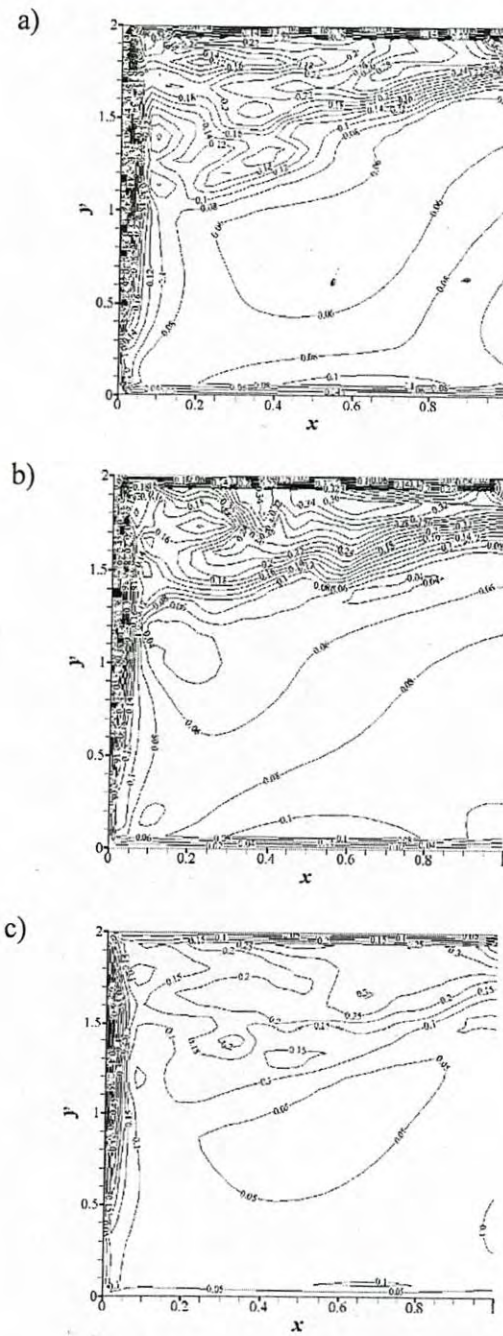
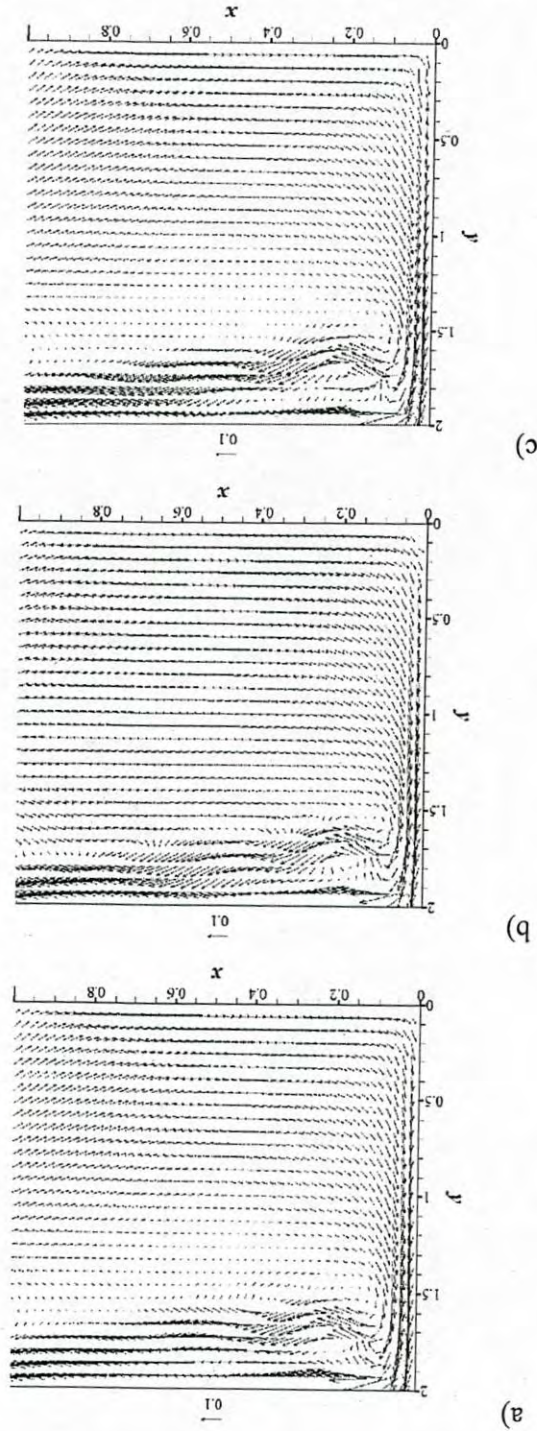


Figura 4.19 Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=2.21 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

Figura 4.20 Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m. $Ra=2.21 \times 10^{11}$, $Ra=3.73 \times 10^{12}$.



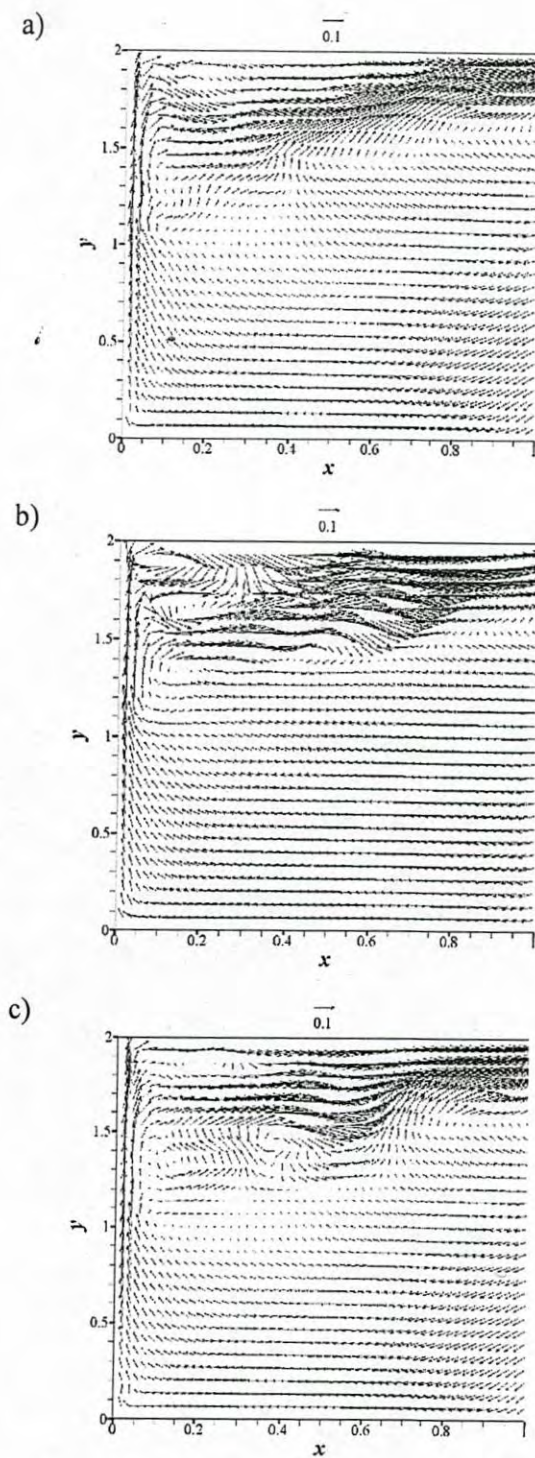


Figura 4.21 Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=2.21 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

La Figura 4.22 muestra el campo de temperatura del fluido en el receptor al aumentar el número de Rayleigh a 3.69×10^{11} ($T_h=800$ K) con una inclinación de $+15^\circ$. En el plano $z=0.5$ m se observa que el fluido tiene una temperatura de 350 K en la mayor parte del receptor. Se aprecia la capa límite térmica adyacente a la pared caliente con un espesor de alrededor de 2.5 cm. En la parte superior del receptor ($y=1.7$ m) el fluido tiene una temperatura de 400 a 450 K. En la Figura 4.22b y 4.22c se aprecia el mismo comportamiento donde el fluido sale de la cavidad con valores de 350 a 400 K.

En la Figura 4.23 se presenta el campo de temperatura cuando el receptor tiene un ángulo de inclinación de $+30^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$). Se puede apreciar que la capa límite térmica adyacente a la pared caliente tiene un grosor aproximado a los 2.5 cm y que el fluido sale de la cavidad con temperaturas entre 300 y 350 K. También se observan temperaturas entre 400 a 550 K alrededor de la esquina superior izquierda del receptor. La forma de las isothermas se debe al movimiento oblicuo que realiza el fluido caliente al desplazarse hacia la parte superior de la abertura para salir del receptor.

Los contornos de magnitud de velocidad de la Figura 4.24 ($Ra=3.69 \times 10^{11}$ e inclinación de $+15^\circ$), presentan un comportamiento simétrico. El fluido tiene una velocidad de 0.05 m/s al acercarse a la pared caliente, donde se acelera hasta alcanzar valores de 0.8 m/s en la parte superior de la cavidad. Una gran porción del fluido en el receptor tiene un valor de velocidad de 0.1 m/s. El fluido sale de la cavidad con una rapidez entre 0.1 y 0.4 m/s.

Al aumentar la inclinación a $+30^\circ$, la Figura 4.25 muestra que el fluido sale de la cavidad con valores de velocidad de 0.15 a 0.65 m/s y la mayor parte del aire en el receptor tiene valores de velocidad de 0.1 m/s. En tanto que el fluido entra al receptor con velocidades de 0.05 a 0.1 m/s.

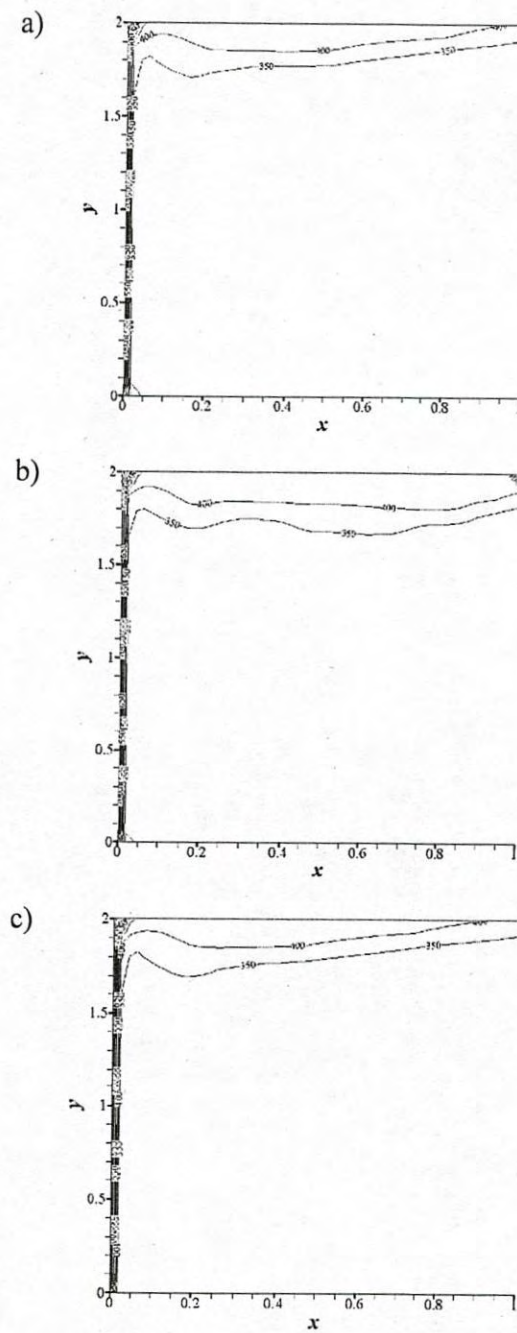


Figura 4.22 Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=3.69 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

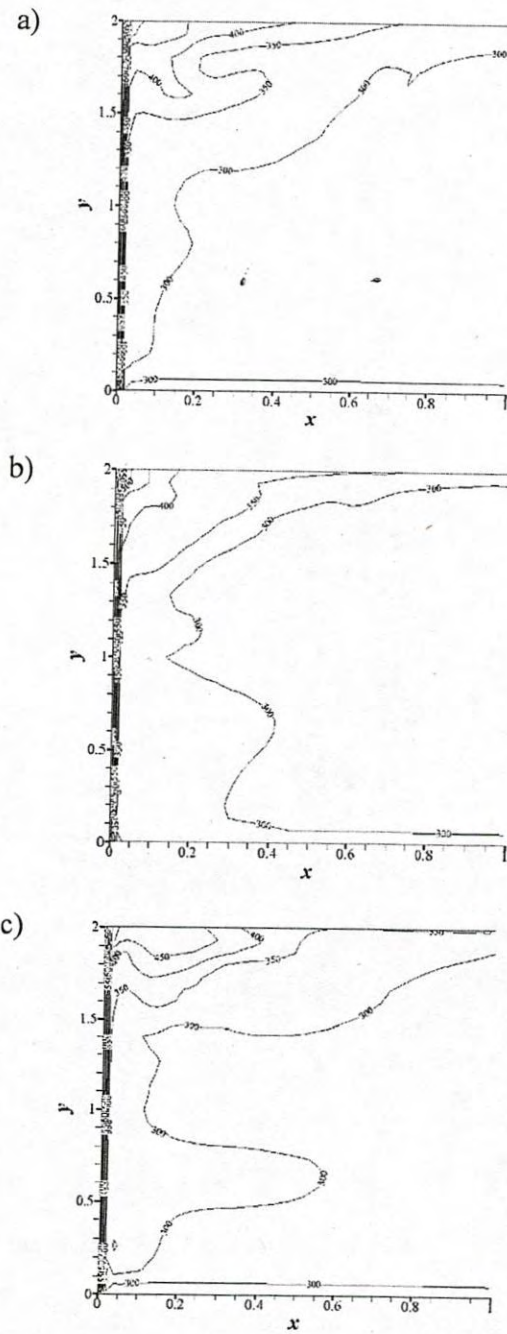


Figura 4.23 Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=3.69 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

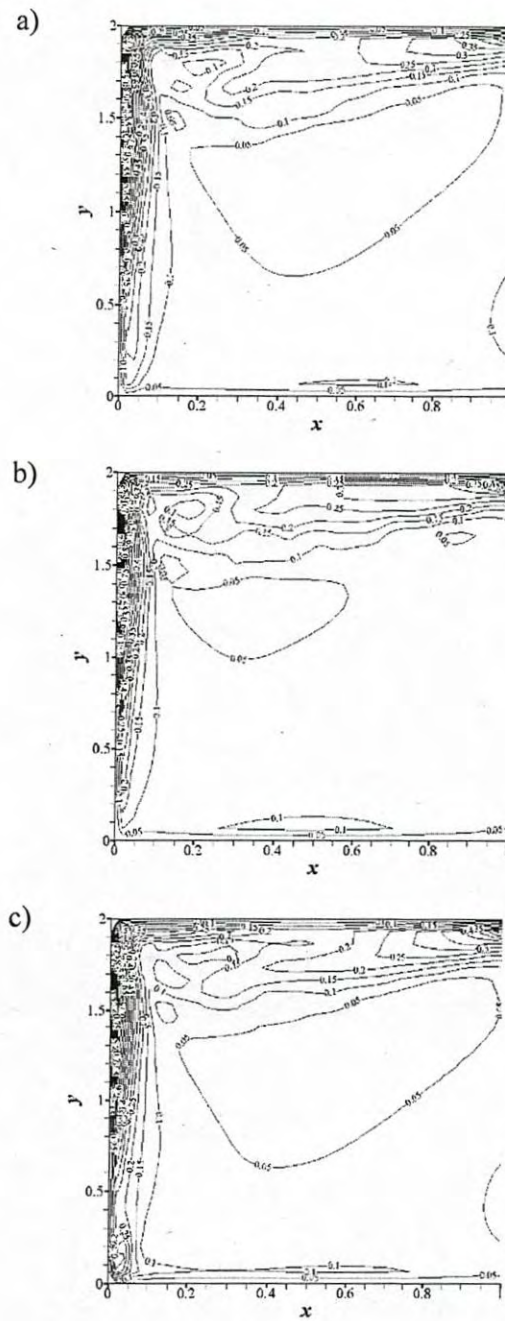


Figura 4.24 Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=3.69 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

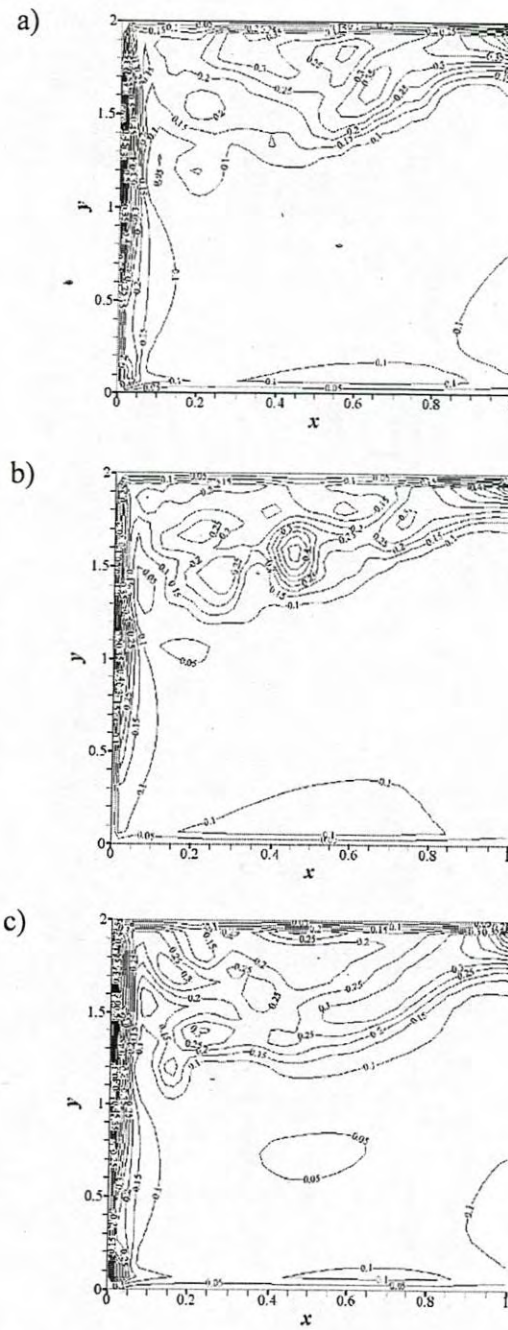


Figura 4.25 Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=3.69 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

Los vectores de velocidad para el receptor inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=3.69 \times 10^{11}$ (Figura 4.26), muestran que el fluido entra con un ligero cambio de curso a partir de $y=1.3$ m y al llegar a la pared caliente choca y asciende por la misma hasta topar con la pared superior y salir por la abertura. Se aprecia un movimiento errático del fluido, ya que existen zonas en donde cambia su dirección y se forman zonas de recirculación. El vector de magnitud de referencia indica que en la parte superior de la cavidad, el fluido se mueve con una rapidez mayor a 0.1 m/s. El fluido empieza a salir de la cavidad a partir de $y=1.8$ m.

Al cambiar la inclinación del receptor a $+30^\circ$, la Figura 4.27 muestra que el fluido entra sesgado, en dirección hacia la pared adiabática inferior. El fluido comienza a salir a partir de $y=1.5$ m con una rapidez mayor a 0.1 m/s. En la cercanía de la pared caliente se aprecia un vórtice. La Figura 4.27b muestra que en el plano $z=1$ m, el fluido tiene un movimiento errático en la zona media de la pared superior, ya que el fluido al no poder salir cambia su dirección ocasionando la formación de vórtices.

Para un número de Rayleigh igual a 5.17×10^{11} ($T_h=1000$ K), la Figura 4.28 indica que para una inclinación de $+15^\circ$, la mayor parte del fluido en el receptor tiene un valor de temperatura de 350 K. Se observa que el espesor de la capa límite térmica es menor a los 2.5 cm. En la parte inferior se aprecia una zona desde la abertura hasta la pared caliente con valor de 300 K. El fluido sale del receptor con temperatura entre 350 y 400 K.

Para una inclinación de $+30^\circ$ ($Ra=5.17 \times 10^{11}$), la Figura 4.29 muestra que la mayor parte del receptor se encuentra a una temperatura de 350 K. En la cercanía de la pared superior se tiene un valor máximo de 650 K, mientras que el fluido sale de la cavidad con una temperatura entre 350 y 500 K. En los tres planos mostrados se aprecia que el espesor de la capa límite térmica es menor a 2.5 cm.

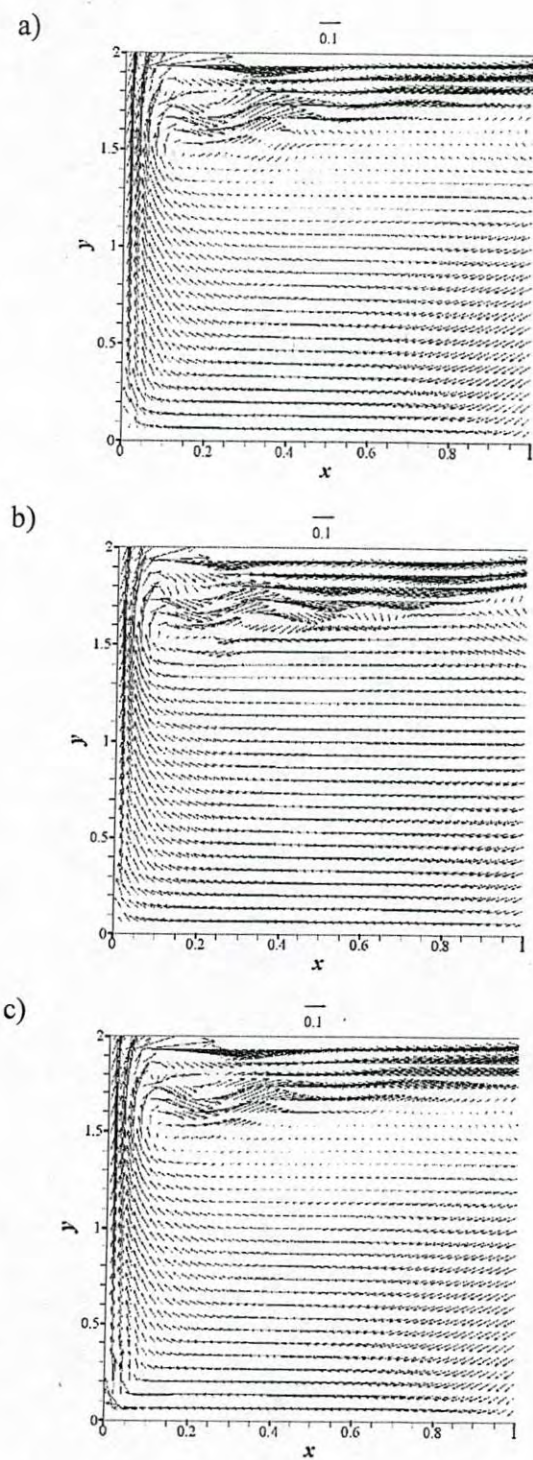


Figura 4.26 Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=3.69 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

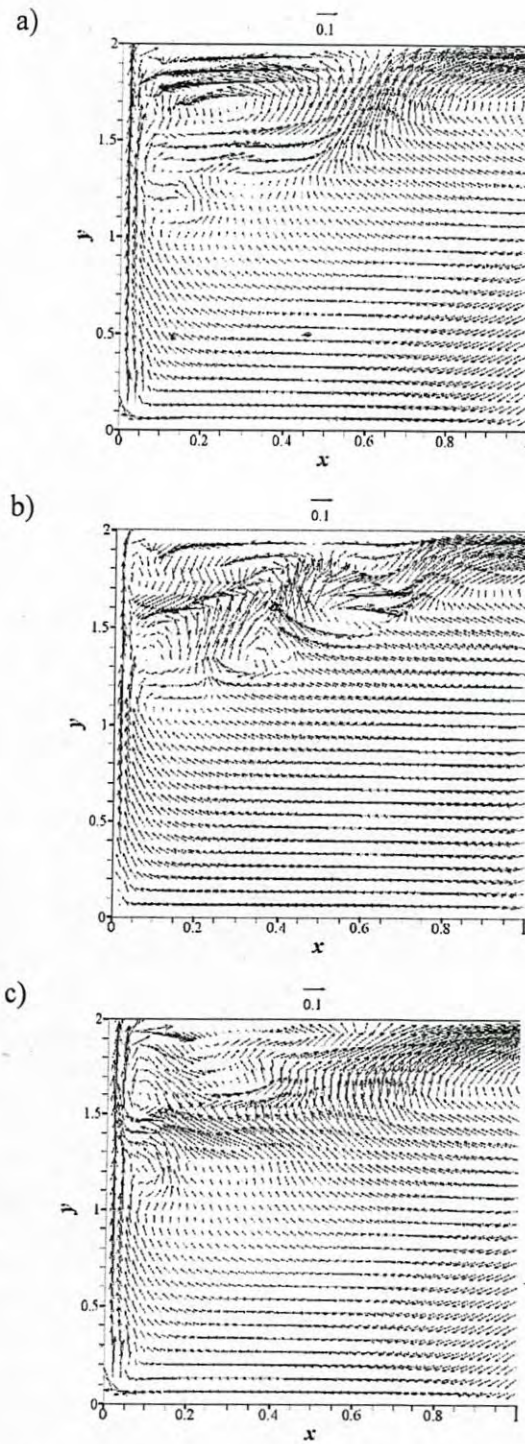


Figura 4.27 Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=3.69 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

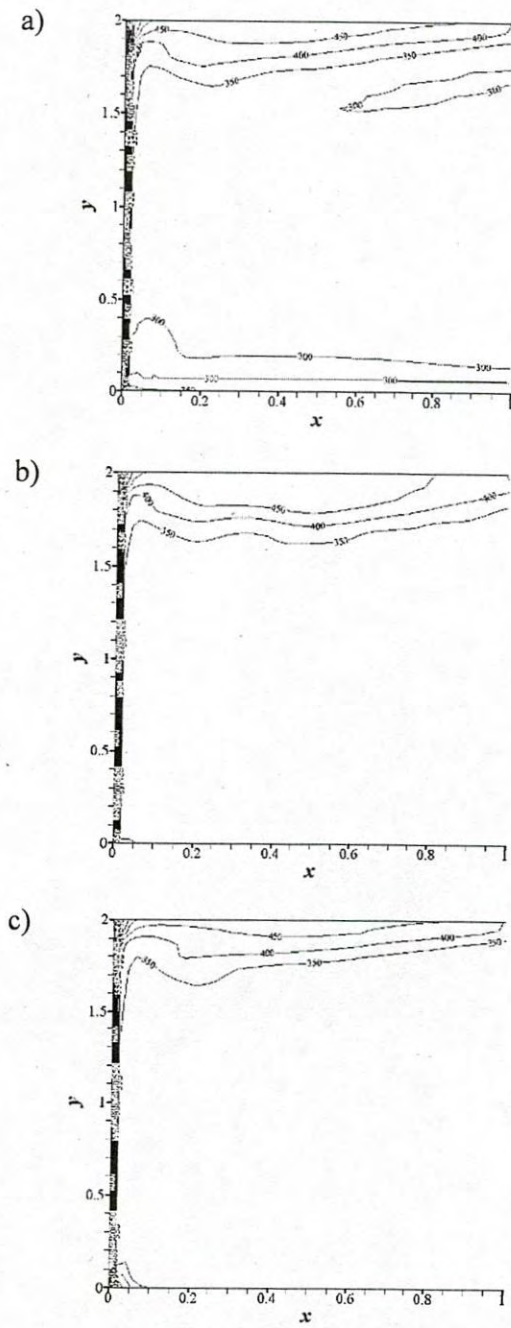


Figura 4.28 Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

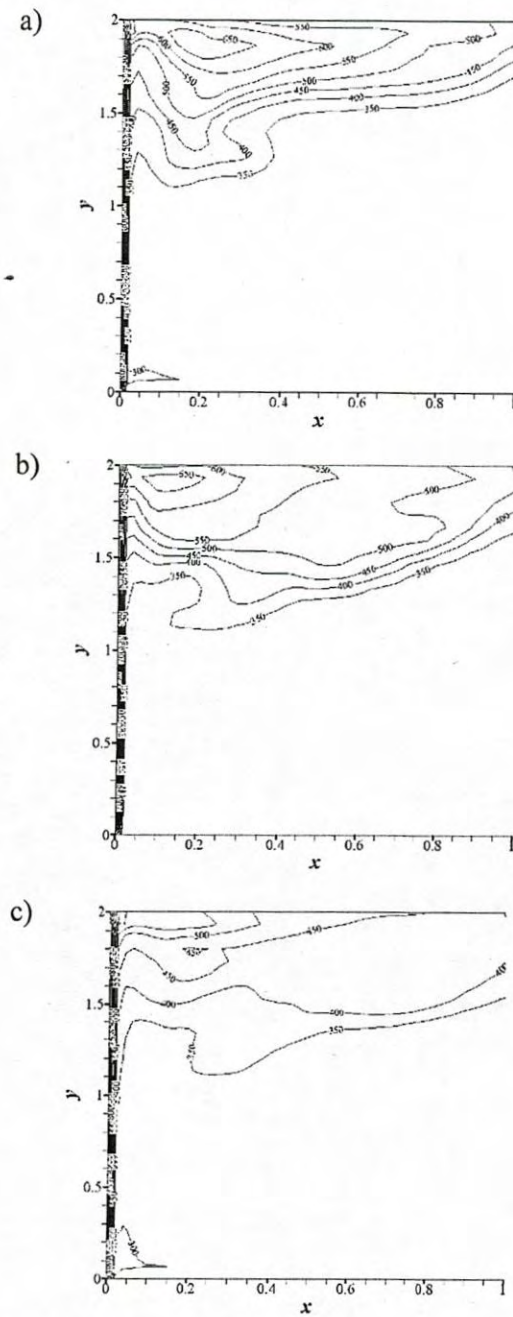


Figura 4.29 Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

Los contornos de magnitud de velocidad de la Figura 4.30 (inclinación de $+15^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$), indican que en el interior del receptor la mayor parte del fluido se mueve con una rapidez de 0.1 m/s. La rapidez del fluido que sale de la cavidad se encuentra entre 0.2 y 0.5 m/s. Se aprecian pequeñas zonas de estancamiento en la parte superior izquierda. La Figura 4.30b muestra una zona con valor de 0.05 m/s en la parte media central del plano. En la Figura 4.30c se pueden observar velocidades de salida del fluido de la cavidad de 0.5 a 0.1 m/s.

Cuando la inclinación se cambia a $+30^\circ$ ($Ra=5.17 \times 10^{11}$) se aprecia en la Figura 4.31, un valor máximo de velocidad de 0.4 m/s en la zona de la pared superior. A su vez, la Figura 4.31b muestra varias zonas en donde el fluido se mueve más lentamente, con una rapidez de 0.05 m/s. La Figura 4.31c muestra un comportamiento similar donde el fluido sale con valores máximos de velocidad de 0.5 m/s.

Los 3 planos con vectores de velocidad de la Figura 4.32 (inclinación de $+15^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$), muestran que el fluido entra desde una altura de $y=0$ m hasta $y=1.3$ m con una ligera inclinación hacia abajo. Al llegar a la pared caliente este cambia su dirección hacia arriba y sale de la cavidad a partir de $y=1.6$ m. Se aprecia un movimiento errático, ascendente y descendente, conforme el aire avanza a lo largo de la pared superior en dirección a la salida.

Los vectores de velocidad de la Figura 4.33 ($Ra=5.17 \times 10^{11}$), indican que cuando la inclinación es de $+30^\circ$ el fluido entra perpendicular a la abertura para el plano $z=1$ m. En los planos correspondientes a los incisos (a) y (c), el fluido entra con una ligera dirección hacia abajo (desde $y=0$ m hasta $y=1.5$ m), para después empezar a cambiar su trayectoria describiendo una línea diagonal que cruza la cavidad. En la zona cercana a la pared caliente se aprecia un movimiento errático del fluido. El fluido sale de la cavidad a partir de $y=1.8$ m con una magnitud mayor a la indicada por el vector de referencia.

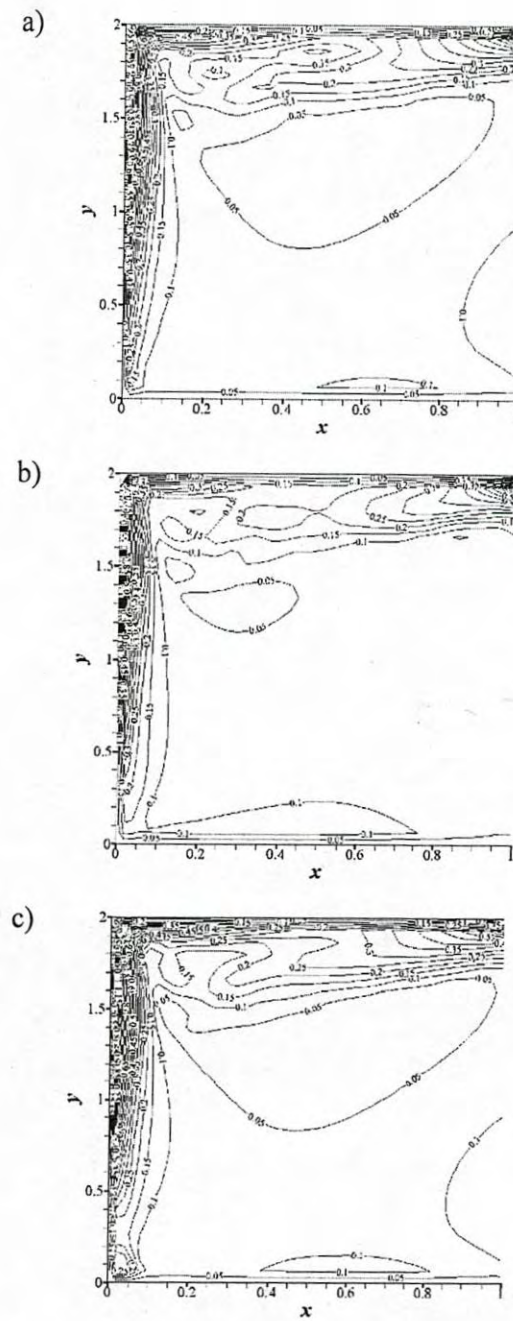


Figura 4.30 Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

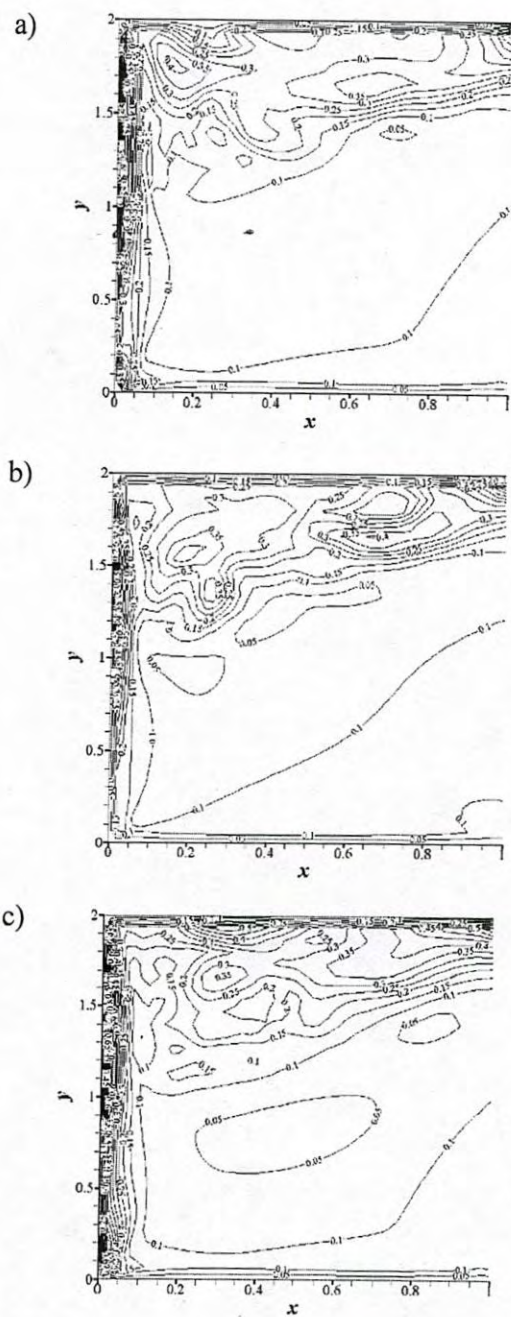


Figura 4.31 Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

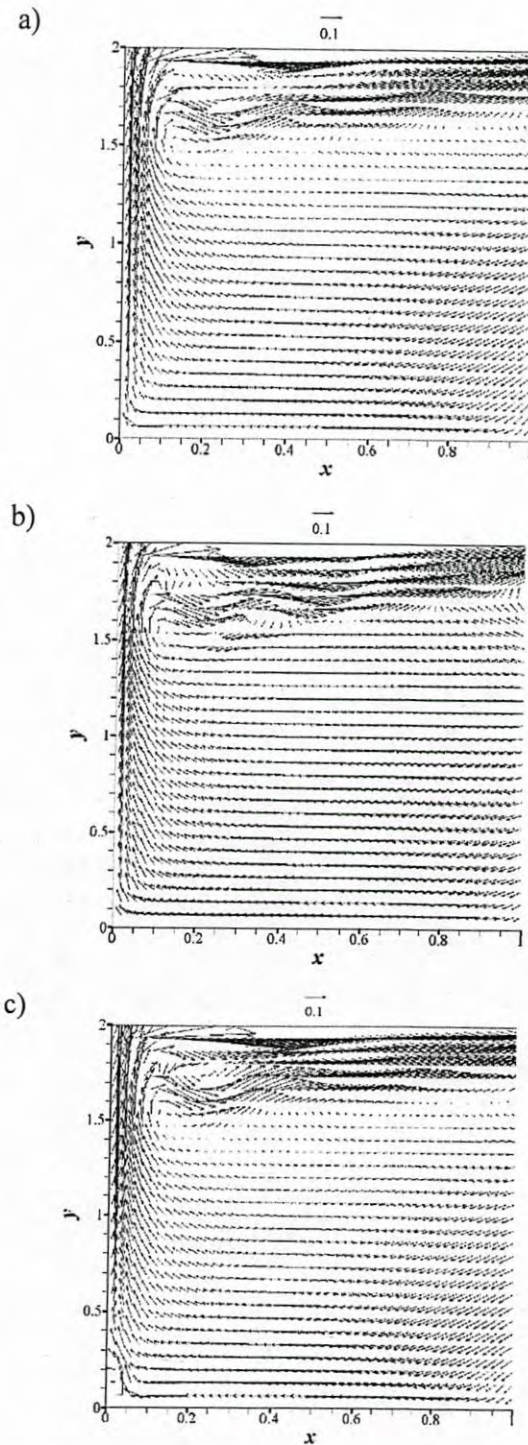


Figura 4.32 Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad inclinado a $+15^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

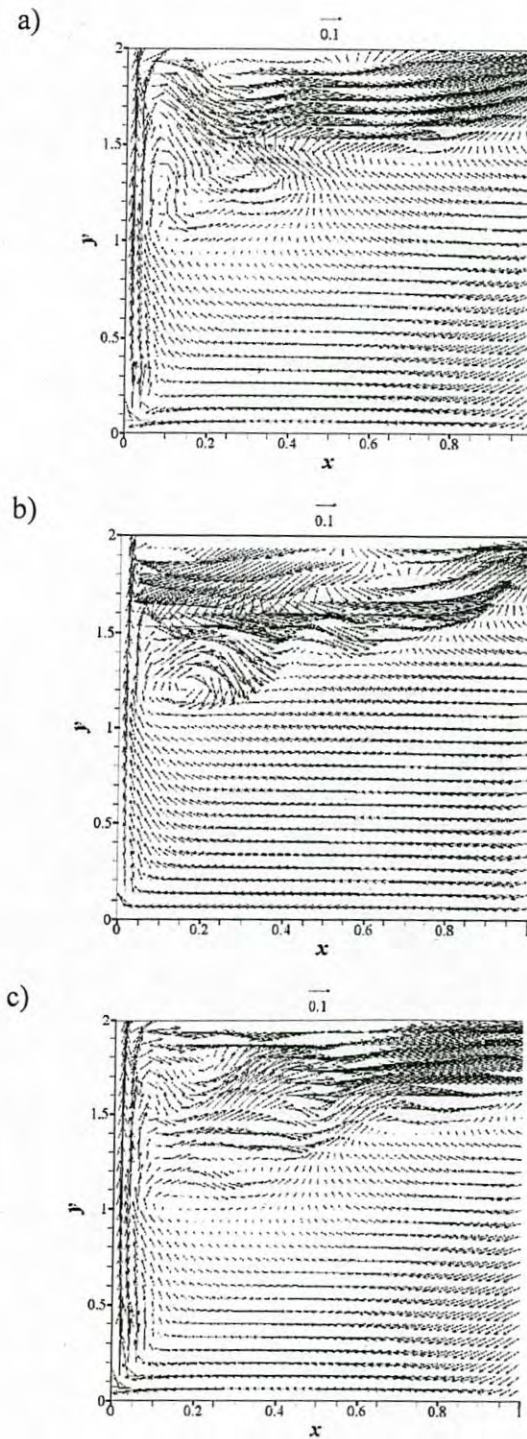


Figura 4.33 Vectores de velocidad (m/s) en receptor inclinado a $+30^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$, en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

4.3.3 Efecto de la radiación térmica.

Las isothermas en el receptor de cavidad con paredes negras ($\varepsilon=0.9$) con $+15^\circ$, se presentan en la Figura 4.34 para un número de Rayleigh de 2.21×10^{11} . Las Figuras 4.34a y 4.34c muestran un comportamiento simétrico. En tanto que la temperatura máxima es de 480 K en todo el plano y al transcurrir por la pared superior el máximo es de 520 K, mientras que el fluido sale con valores de 320 a 340 K. El inciso b muestra ese comportamiento solo que en la parte inferior en la zona de la abertura hay una zona con fluido a una temperatura de 300 K. En los tres planos se aprecia una capa límite térmica adyacente a la pared caliente con un espesor menor a 2.5 cm. Una diferencia significativa con respecto a la emisividad de 0.05, es el calentamiento del fluido que se aprecia en la cercanía de la pared adiabática inferior.

La inclinación de $+30^\circ$ ($Ra=2.21 \times 10^{11}$) que se muestra en la Figura 4.35, indica que en los incisos a y c el fluido sale de la cavidad con valores de temperatura entre 320 K a 360 K. En la parte superior se aprecian isothermas que van desde 320 hasta 480 K, mientras que en la parte inferior se encuentra una isoterma de 300 K que va desde la abertura hasta un valor de $x=0.6$ m. El grosor de la capa límite térmica es menor a los 2.5 cm.

Los contornos de magnitud de velocidad de la Figura 4.36 ($Ra=2.21 \times 10^{11}$ y $+15^\circ$), muestran que los planos $z=0.5$ m y $z=1.5$ m, tienen una simetría. En la zona cercana a la abertura el fluido tiene velocidad de 0.05 hasta 0.1 m/s y el valor máximo con que el fluido sale de la cavidad alcanza los 0.7 m/s. El inciso (b) muestra que en la parte superior de la cavidad el fluido sale con una velocidad de entre 0.4 a 0.6 m/s y se aprecia una zona de recirculación en el área cercana a la pared superior. Cuando se cambia la inclinación a $+30^\circ$ (Figura 4.37), el plano $z=0.5$ m presenta un valor máximo a la salida de 0.5 m/s mientras que en la zona cercana a la pared superior se aprecia una zona de movimiento lento de fluido con valor de 0.1 m/s. Para el plano $z=1$ m se aprecia que la velocidad de salida del fluido de la cavidad presenta un máximo de 0.3 m/s.

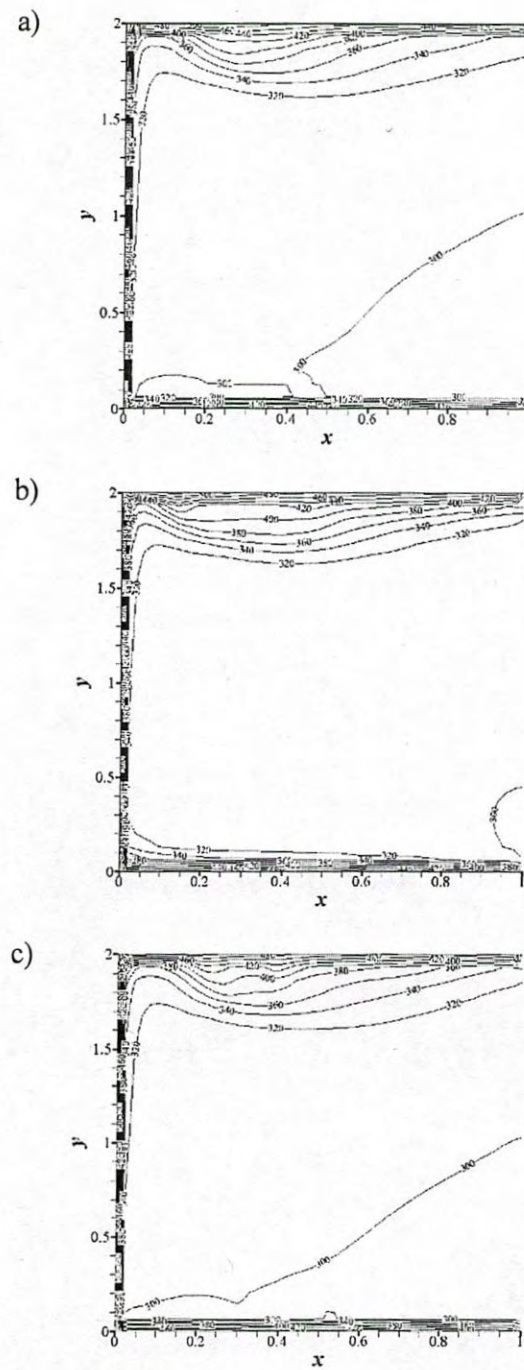


Figura 4.34 Contornos de temperatura (K) en receptor con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+15^\circ$ ($Ra=2.21 \times 10^{11}$), en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

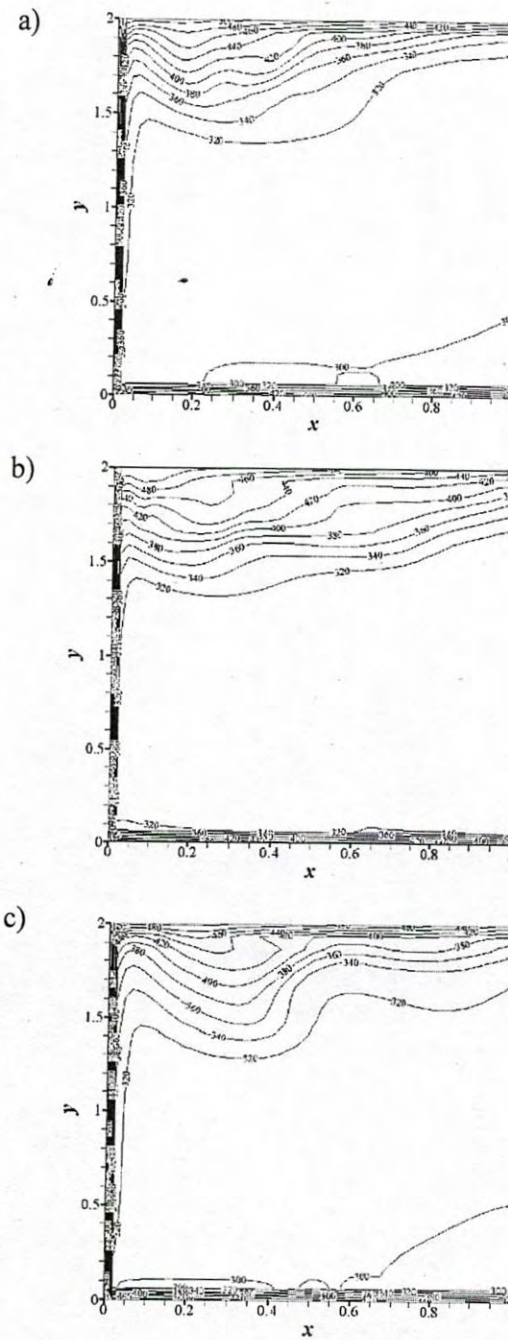


Figura 4.35 Contornos de temperatura (K) en receptor con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+30^\circ$ ($Ra=2.21 \times 10^{11}$), en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

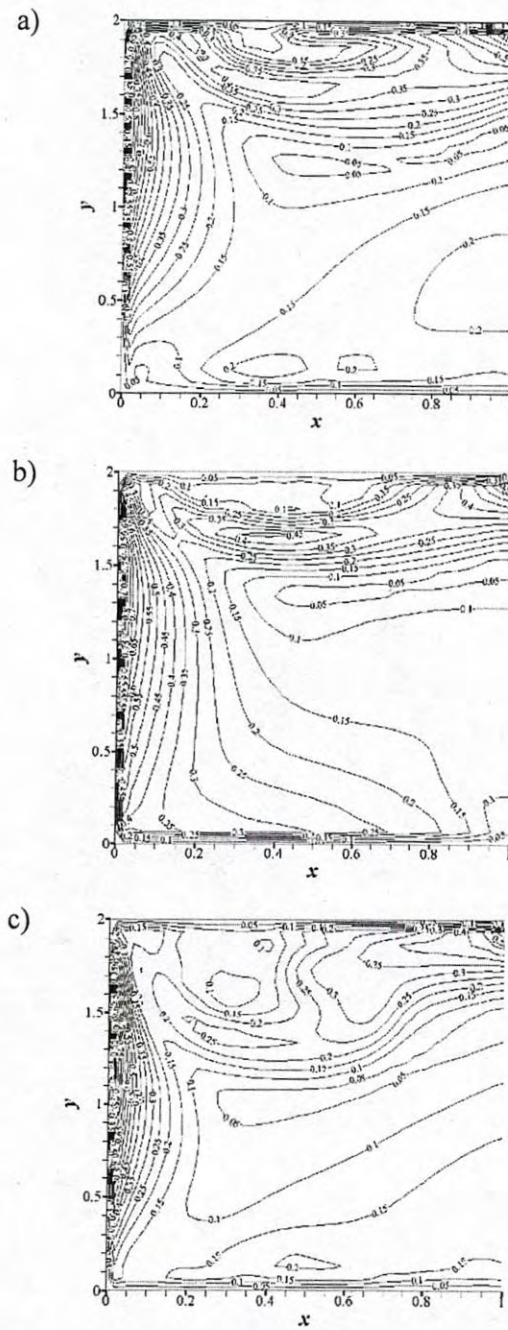


Figura 4.36 Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinada a $+15^\circ$ ($Ra=2.21 \times 10^{11}$), en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

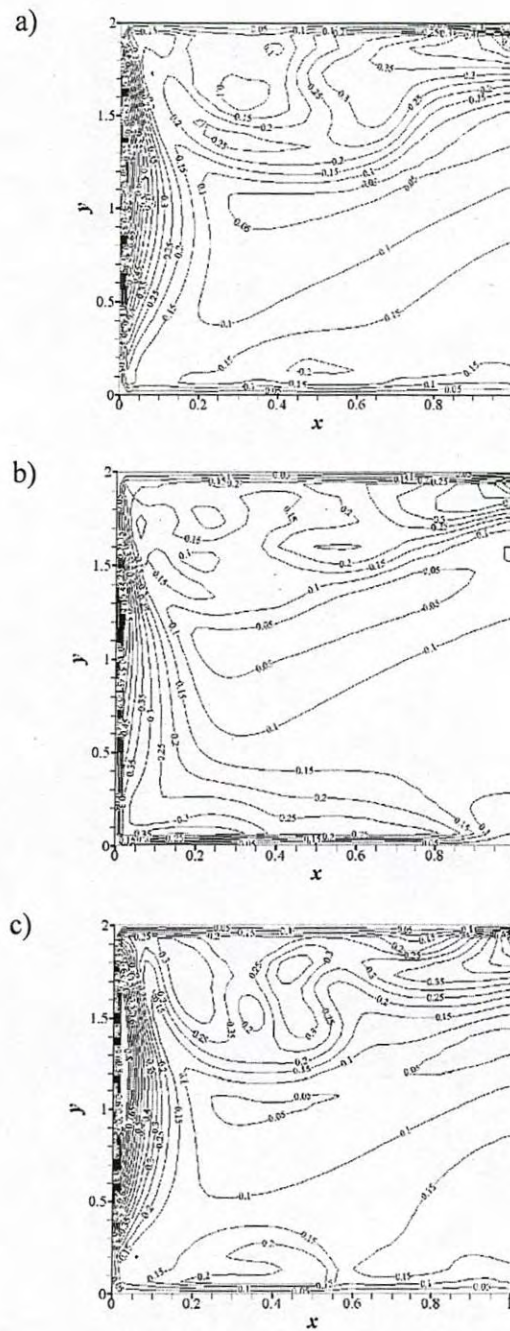


Figura 4.37 Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+30^\circ$ ($Ra=2.21 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

Los vectores de velocidad para una inclinación de $+15^\circ$ ($Ra=2.21 \times 10^{11}$), se presentan en la Figura 4.38 donde los tres planos muestran que el fluido entra desde el fondo hasta la parte media de la abertura y al chocar con la pared caliente asciende por la misma hasta toparse con la pared superior y buscar la abertura de la cavidad. Se aprecia que el fluido sale de la cavidad a partir de $y=1.6$ m. Por otro lado, cuando la inclinación se cambia a $+30^\circ$, como se muestra en los tres incisos de la Figura 4.39, se forma una zona de recirculación ($z=1$ m) en la cercanía de la esquina superior izquierda. El mientras que el fluido caliente sale de la cavidad, siguiendo un movimiento primero descendente (hasta $x=0.4$ m) y después ascendente.

El campo de temperatura para $Ra=3.69 \times 10^{11}$, cuando el receptor tiene una inclinación de $+15^\circ$, e muestra en la Figura 4.40. Al comparar las gráficas 4.40^a y 4.40^c, se observa un comportamiento simétrico, con una capa limite térmica adyacente a la pared caliente que tiene un espesor menor a 2.5 cm. En la pared superior la temperatura alcanza valores entre 400 hasta 650 K. A una altura de $y=0.5$ m se aprecia una isoterma de 300 K que abarca una zona desde la abertura hasta $x=0.2$ m. En el plano $z=1$ m correspondiente a la Figura 4.40b se aprecia la misma isoterma de 300 K en la abertura excepto que alcanza hasta una profundidad de 0.8 m en el eje horizontal. En la pared inferior se presenta una distribución de temperatura desde 350 hasta 600 K.

Las isotermas cuando la inclinación se cambia a $+30^\circ$ se muestra en la Figura 4.41. Los planos $z=0.5$ m y $z=1.5$ m presentan simetría. En la pared superior se aprecian siete isotermas que van desde 350 hasta 700 K, así como una isoterma de 300 K que va desde la abertura hasta $x=0.5$ m. En la pared inferior la temperatura va desde 300 hasta 600 K. Para el plano $z=1$ m un área considerable se encuentra a 350 K. La capa limite térmica adyacente a la pared caliente tiene un grosor inferior a los 2.5 cm.

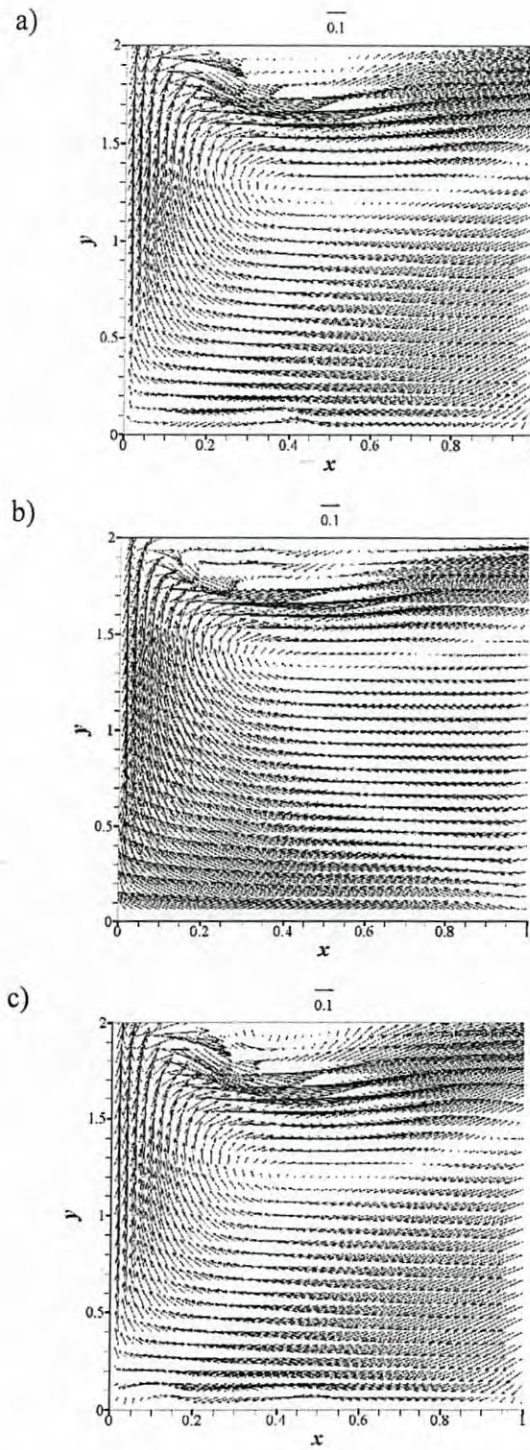


Figura 4.38 Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+15^\circ$ ($Ra=2.21 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

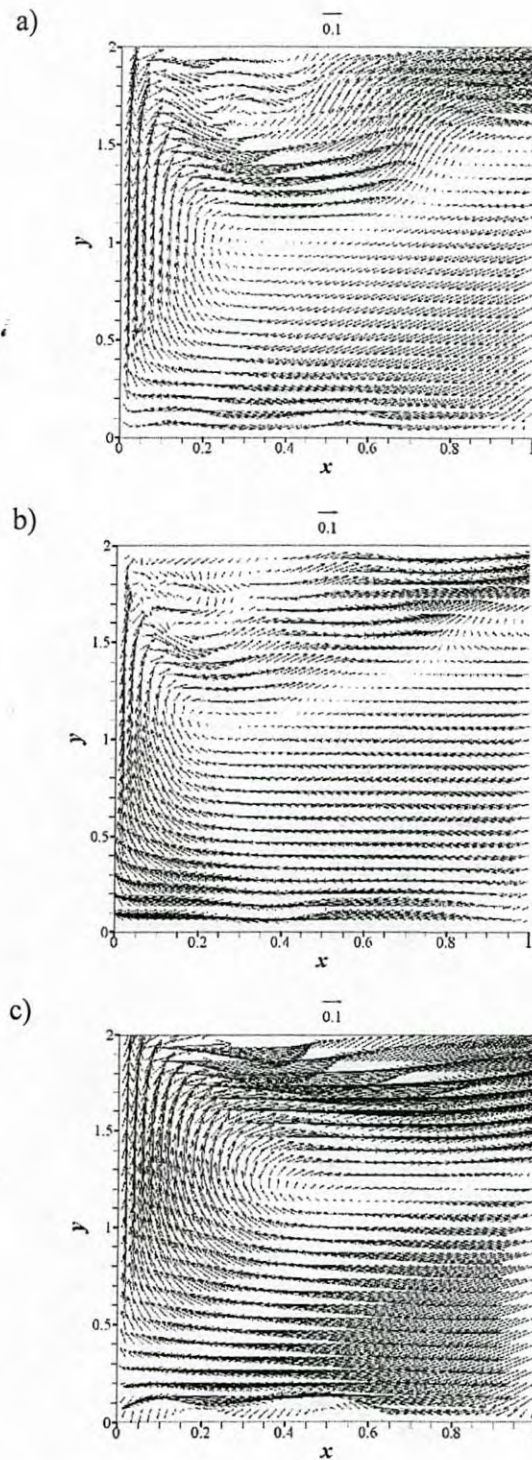


Figura 4.39 Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+30^\circ$ ($Ra=2.21 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

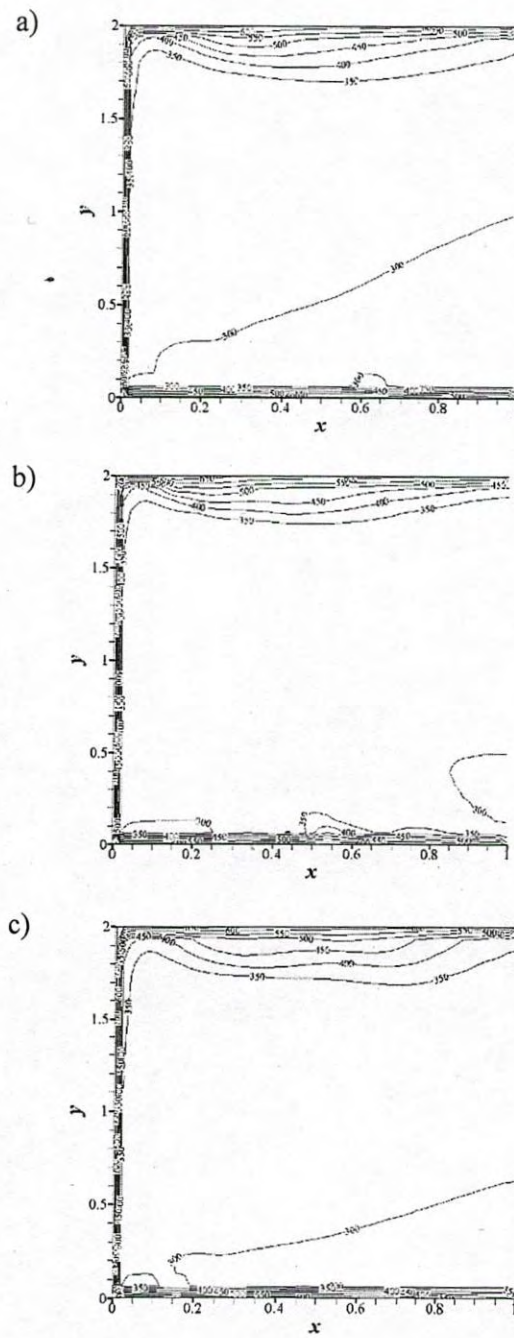


Figura 4.40 Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+15^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

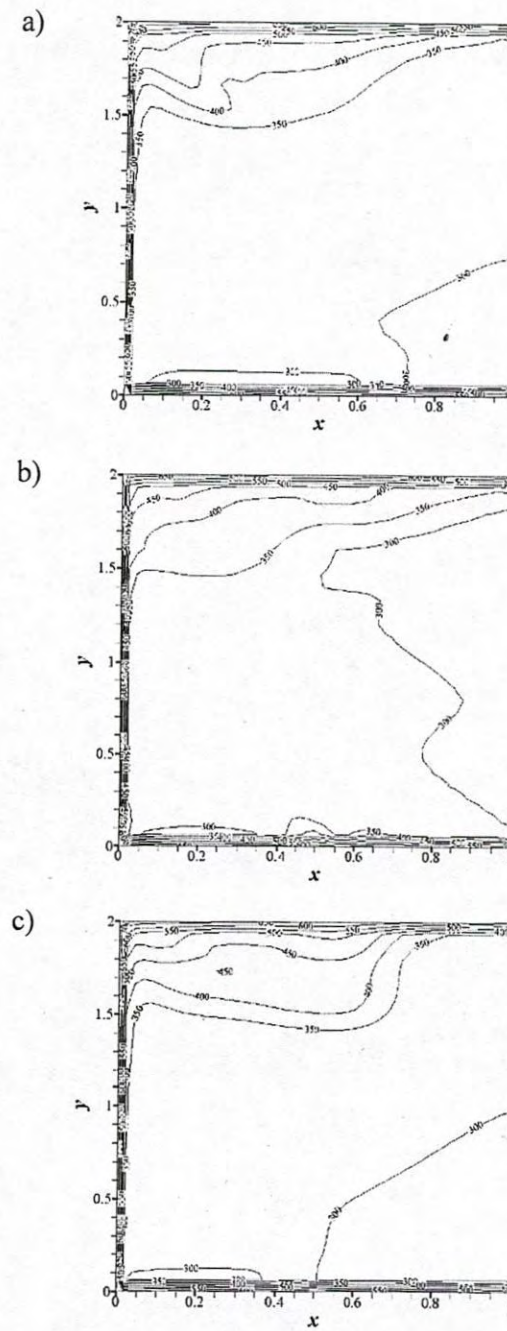


Figura 4.41 Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado $+30^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

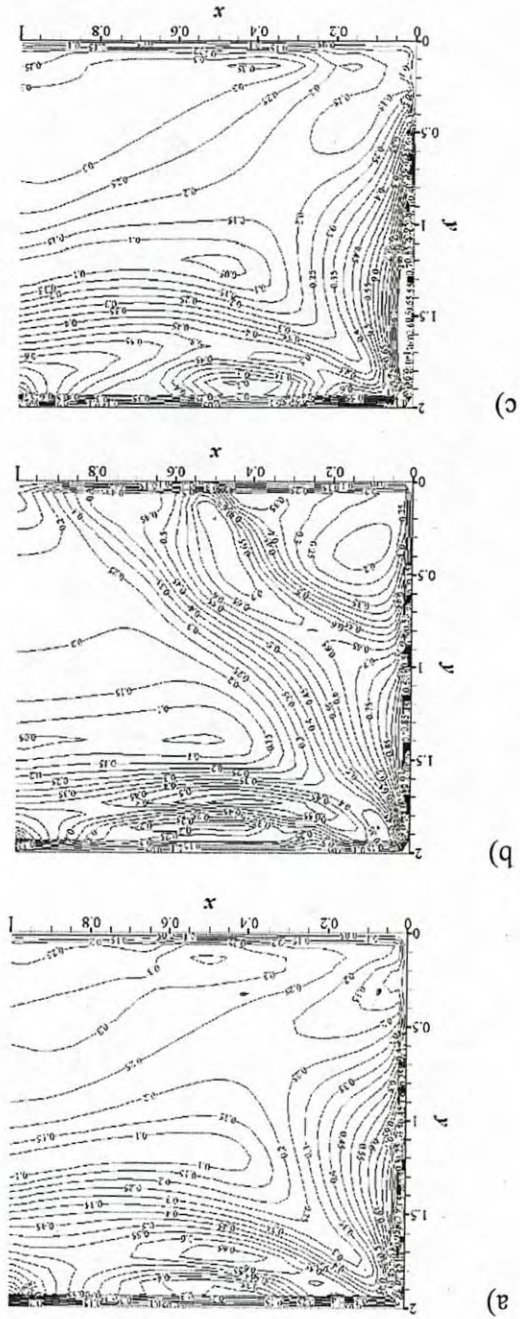
Las isolíneas de magnitud de velocidad para $Ra=3.69 \times 10^{11}$ y $+15^\circ$, se muestran en la Figura 4.42. En la pared superior la velocidad del fluido alcanza valores entre 0.05 y 0.4 m/s, mientras que en la abertura del receptor se presentan isolíneas con valores de 0.1 hasta 0.45 m/s. En la Figura 4.42b, se aprecia una zona de recirculación en la cercanía de la esquina inferior de la pared caliente (con valor de velocidad de 0.2 m/s) y valores de velocidad entre 0.4 y 0.55 m/s en la esquina de la pared superior. La Figura 4.42c, muestra que el plano $z=1.5$ m es simétrico con el plano $z=0.5$ m, donde se aprecian valores de 0.4 a 0.6 m/s de velocidad del fluido a la salida de la cavidad.

Para una inclinación a $+30^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$), la Figura 4.43 muestra que en el plano $z=0.5$ m el fluido tiene velocidades de 0.25 a 0.75 m/s en la salida de la cavidad. La Figura 4.43b, muestra dos isolíneas de 0.1 y 0.15 m/s en la parte media de la abertura hasta llegar a $x=0.2$ m. La Figura 4.43c muestra zonas de recirculación en la parte superior de la cavidad con valores de 0.2 a 0.55 m/s, así como una zona de recirculación en la pared inferior con valor de 0.3 m/s, el grosor de la capa límite hidrodinámica alcanza los 20 cm.

Los vectores de velocidad para una inclinación de $+15^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$), se presentan en la Figura 4.44. Se aprecia que el fluido entra en la cavidad a partir de una altura de 1.3 m de la abertura, para avanzar hasta chocar con la pared caliente donde cambia su curso hacia la pared superior para salir, haciendo primero un movimiento descendente y luego ascendente, a una altura de 1.4 m de la abertura. En los planos de los incisos (a) y (c) el fluido entra con una ligera dirección hacia abajo para luego volverse perpendicular a la pared caliente, mientras que el inciso (b) entra totalmente perpendicular desde el inicio.

En la inclinación de $+30^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$) los vectores de velocidad (Figura 4.45), presentan una zona de recirculación en la esquina inferior izquierda, ocasionada por el calentamiento que recibe el fluido entrante por la pared adiabática inferior. También se aprecia una amplia zona de recirculación alrededor de la esquina superior izquierda, formada por la interacción entre el fluido caliente que busca la salida y el fluido frío que ingresa a la cavidad.

Figura 4.42 Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado $+15^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$), en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.



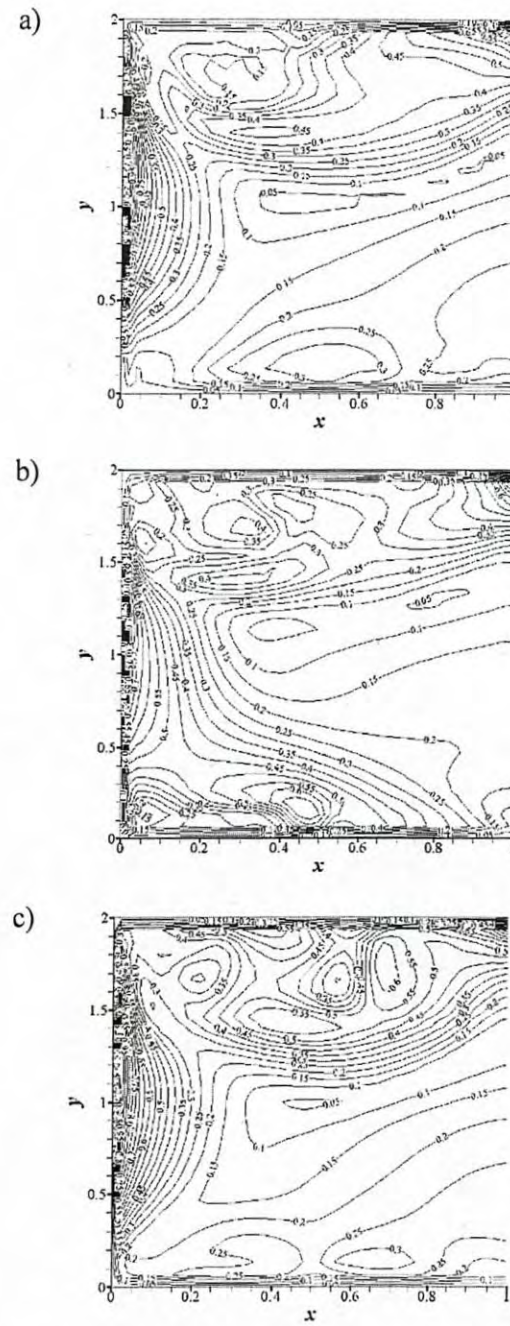


Figura 4.43 Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\varepsilon=0.9$), inclinado $+30^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

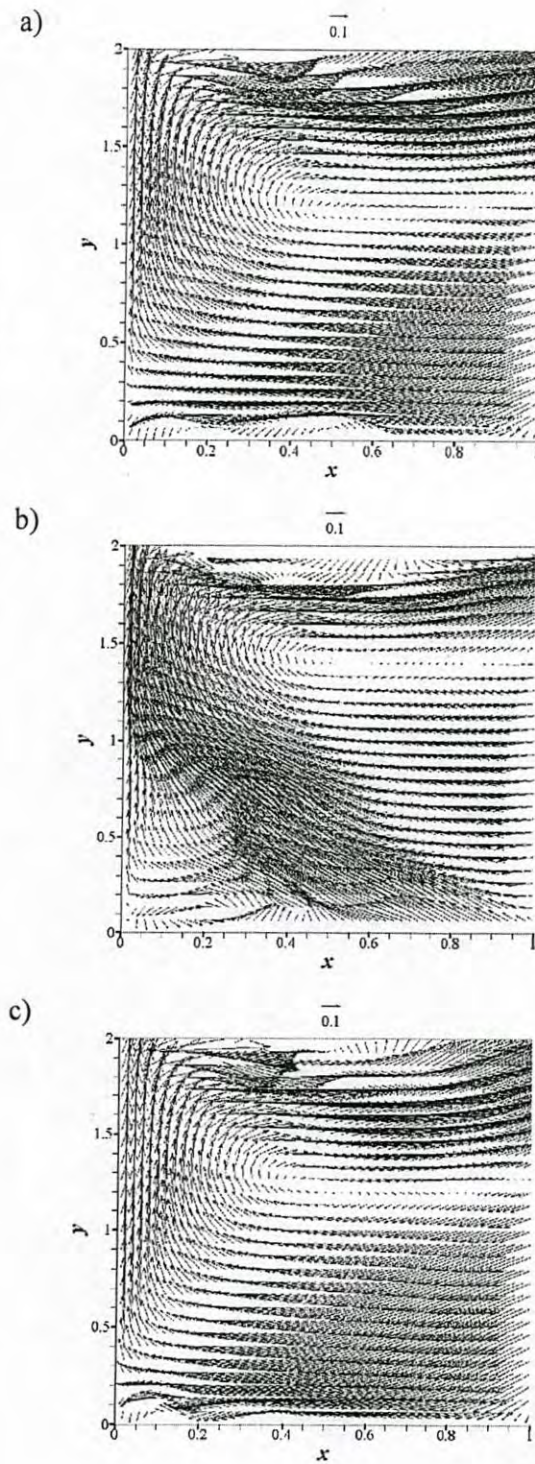


Figura 4.44 Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+15^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

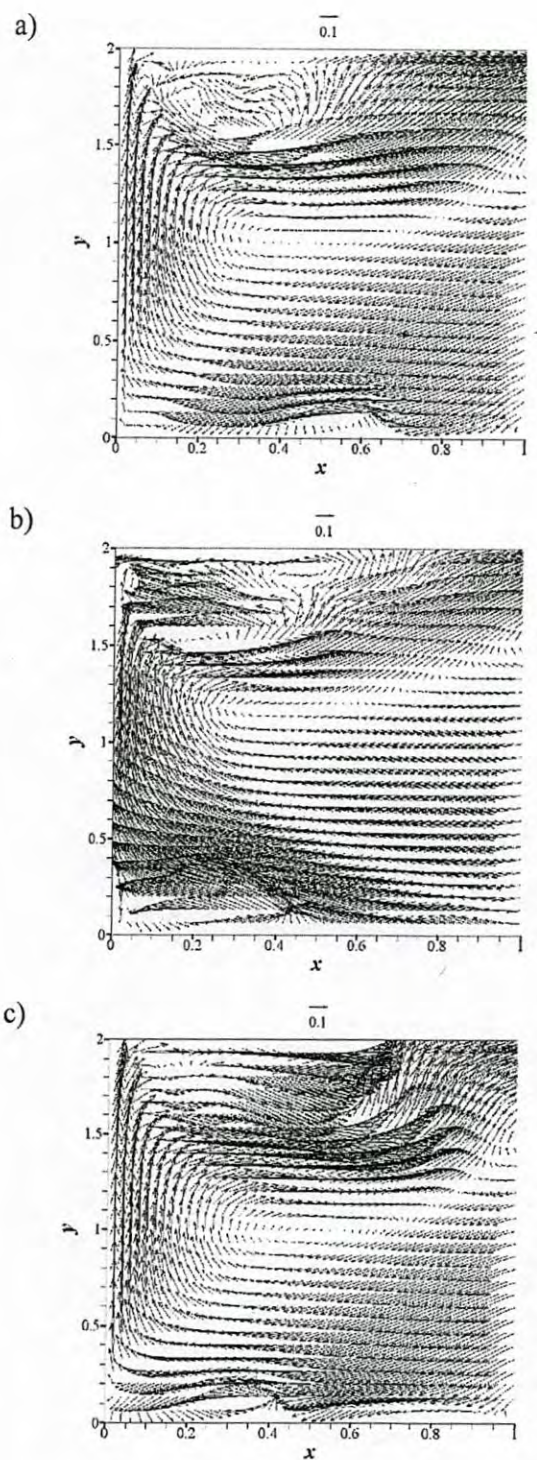


Figura 4.45 Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+30^\circ$ ($Ra=3.69 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

Para $Ra=5.17 \times 10^{11}$, la Figura 4.46 muestra contornos de temperatura para el receptor con una inclinación de $+15^\circ$. Se aprecia una capa límite térmica encima de la pared adiabática inferior, de alrededor de 4 cm de espesor. En la zona cercana a la pared superior la temperatura del fluido caliente que sale de la cavidad, forma una estratificación a partir de $y=1.7$ m con temperaturas desde 350 K hasta 700 K. En los tres planos el grosor de la capa límite térmica adyacente a la pared caliente es menor a 2.5 cm.

La Figura 4.47 muestra el receptor con una inclinación de $+30^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$. La temperatura en la parte superior de la cavidad toma valores entre 550 y 800 K, en la región que inicia en $y=1.5$ m y termina en la pared adiabática superior. Se puede observar que la capa límite térmica en la pared caliente tiene un espesor menor a 2.5 cm y que la capa límite térmica en la pared adiabática inferior tiene alrededor de 5 cm de espesor.

Los contornos de magnitud de velocidad para una inclinación de $+15^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$ (Figura 4.48), muestran que en el plano $z=0.5$ m el grosor de la capa límite hidrodinámica en la pared caliente llega a los 20 cm. La magnitud de velocidad en la pared superior va desde 0.3 hasta 0.9 m/s. En el plano $z=1$ m se aprecian zonas de recirculación que van desde 0.1 hasta 0.7 m/s y una isolínea de 0.1 m/s en la parte media de la abertura. La Figura 4.48c muestra que el plano $z=1.5$ m tiene un comportamiento simétrico con el inciso (a) donde el valor máximo de velocidad a la salida de la cavidad es de 1.05 m/s.

La Figura 4.49b, muestra que en la inclinación a $+30^\circ$, en la parte media del plano en la zona cercana a la abertura el fluido tiene una velocidad de 0.1 m/s mientras que en la parte superior el fluido sale con una velocidad máxima de 0.7 m/s. Las Figuras 4.49a y 4.49c, muestran un comportamiento simétrico donde se aprecian varias zonas de recirculación con valores que van desde 0.1 hasta 0.65 m/s. Para esta inclinación el grosor de la capa límite hidrodinámica alcanza los 20 cm.

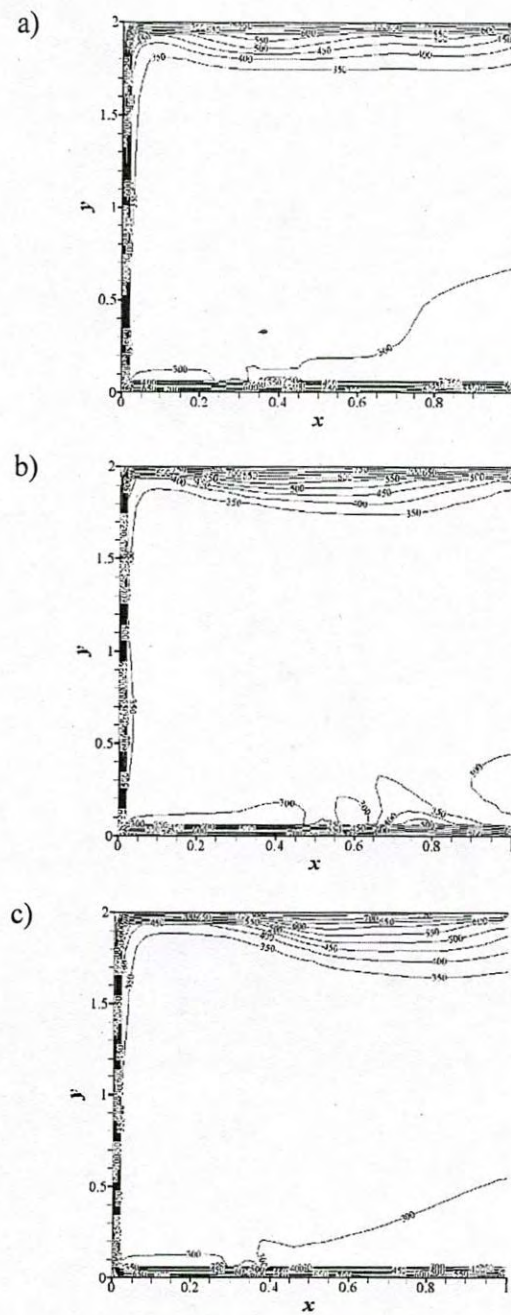


Figura 4.46 Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+15^\circ$ ($Ra=5.17 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

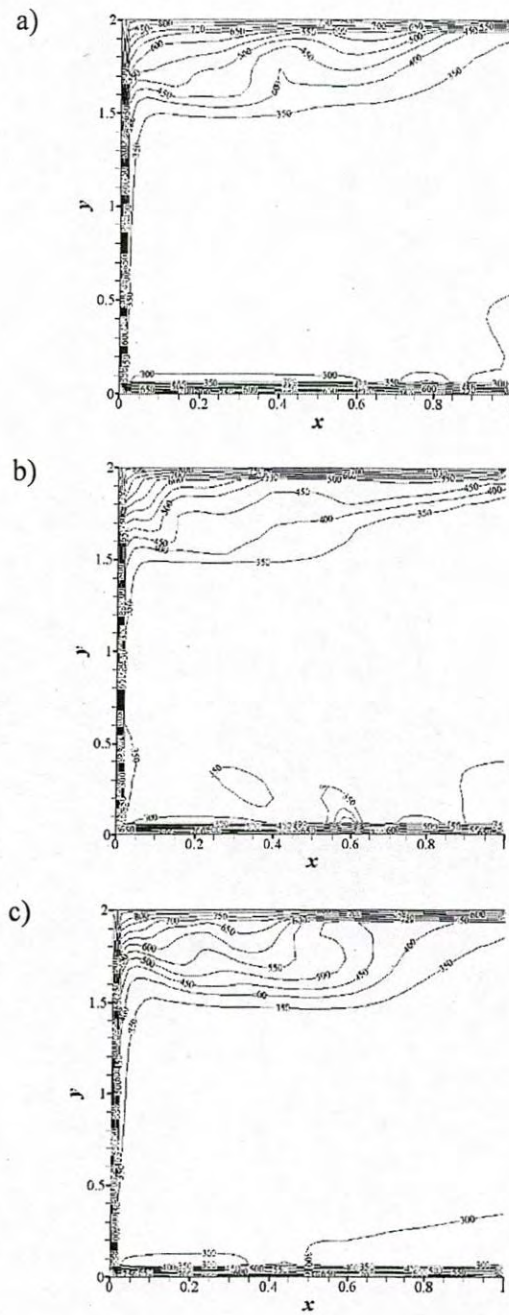


Figura 4.47 Contornos de temperatura (K) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+30^\circ$ ($Ra=5.17 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

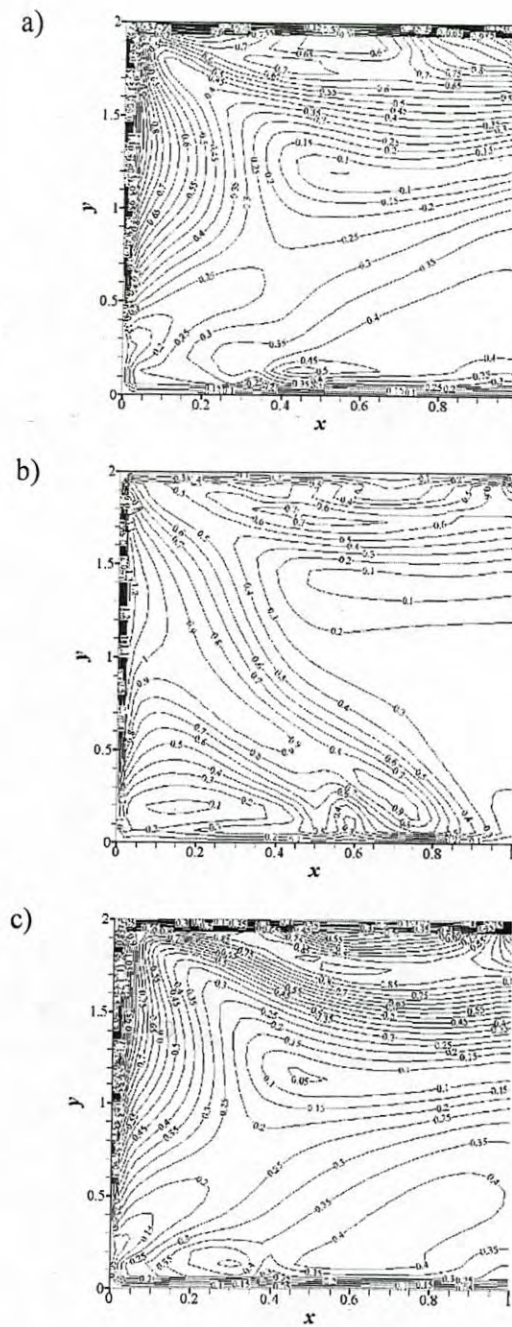


Figura 4.48 Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+15^\circ$ ($Ra=5.17 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5\text{m}$, b) $z=1\text{ m}$, c) $z=1.5\text{m}$.

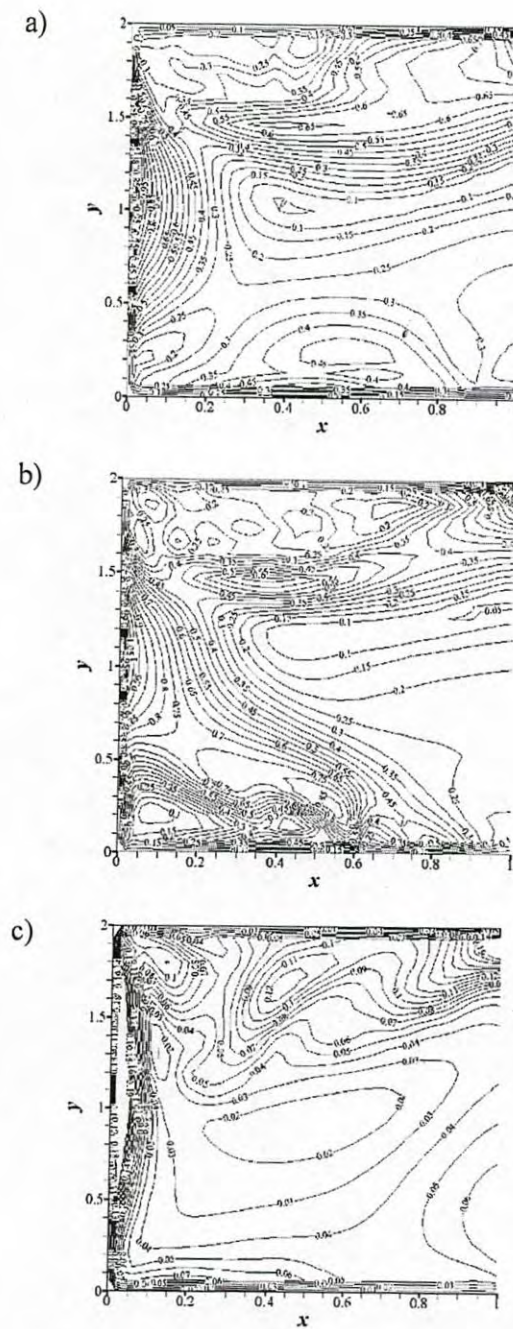


Figura 4.49 Contornos de magnitud de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+30^\circ$ ($Ra=5.17 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5\text{m}$, b) $z=1\text{m}$, c) $z=1.5\text{m}$.

Los vectores de velocidad para una inclinación de $+15^\circ$ se muestran en la Figura 4.50. El fluido entra desde una altura de $y=1.4$ m de la abertura y avanza hacia la pared caliente donde choca y asciende, hasta chocar con la pared superior donde cambia su trayectoria para salir de la cavidad a partir de una altura de 1.6 m de la abertura. Para los incisos (a) y (c) el fluido entra con una ligera dirección hacia abajo, en tanto que en el inciso (b) entra perpendicular a la pared caliente.

Para la inclinación de $+30^\circ$ (Figura 4.51), el plano central ($z=1$ m) muestra una zona de movimiento errático en la parte baja de la pared caliente. El fluido que entra por la abertura presenta un cambio del curso al chocar con la zona de recirculación, para después ascender hacia la pared superior, chocar con esta y desplazarse hacia la abertura para abandonar el receptor.

En la Tabla 4.34 se presenta los resultados del coeficiente de transferencia de calor para el receptor de cavidad. Para una emisividad en las paredes de 0.05, el valor mínimo corresponde al caso $+30^\circ$ y $Ra=2.21 \times 10^{11}$ con $18.4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ y el máximo para el caso $+15^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$ con $36.1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Cuando las paredes del receptor tienen una emisividad de 0.9, los coeficientes de transferencia de calor se incrementan sustancialmente. Para el caso $+30^\circ$ y $Ra=2.21 \times 10^{11}$, el coeficiente de transferencia de calor es igual a $78.8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, mientras que para $+30^\circ$ y $Ra=2.21 \times 10^{11}$ es de $238.8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, lo que representa aumentos de 428% y 661%, respectivamente. La Tabla 4.35 presenta los resultados del número de Nusselt, donde el mínimo para $\epsilon=0.05$ lo presentó el caso $+30^\circ$ y $Ra=2.21 \times 10^{11}$ con un valor de 634 y el máximo lo presentó el caso $+15^\circ$ y $Ra=5.17 \times 10^{11}$ con 1172. Al aumentar la emisividad a 0.9 el aumento porcentual fue del 413% para el valor mínimo y 626% para el valor máximo presentándose valores de 2620 y 7339, respectivamente.

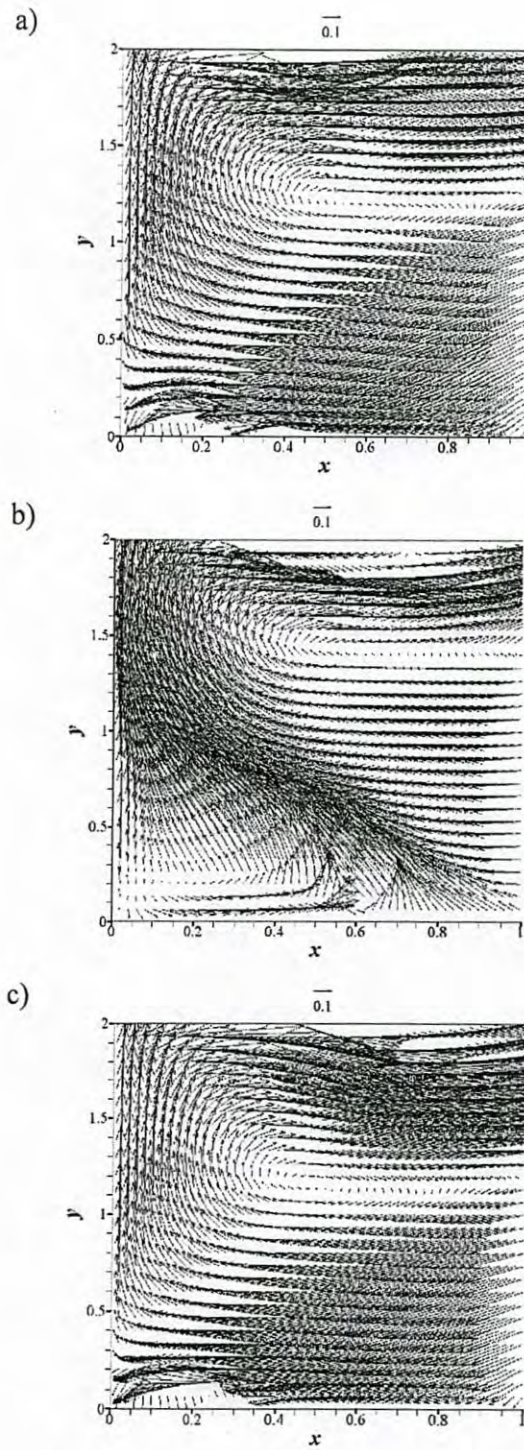


Figura 4.50 Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+15^\circ$ ($Ra=5.17 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

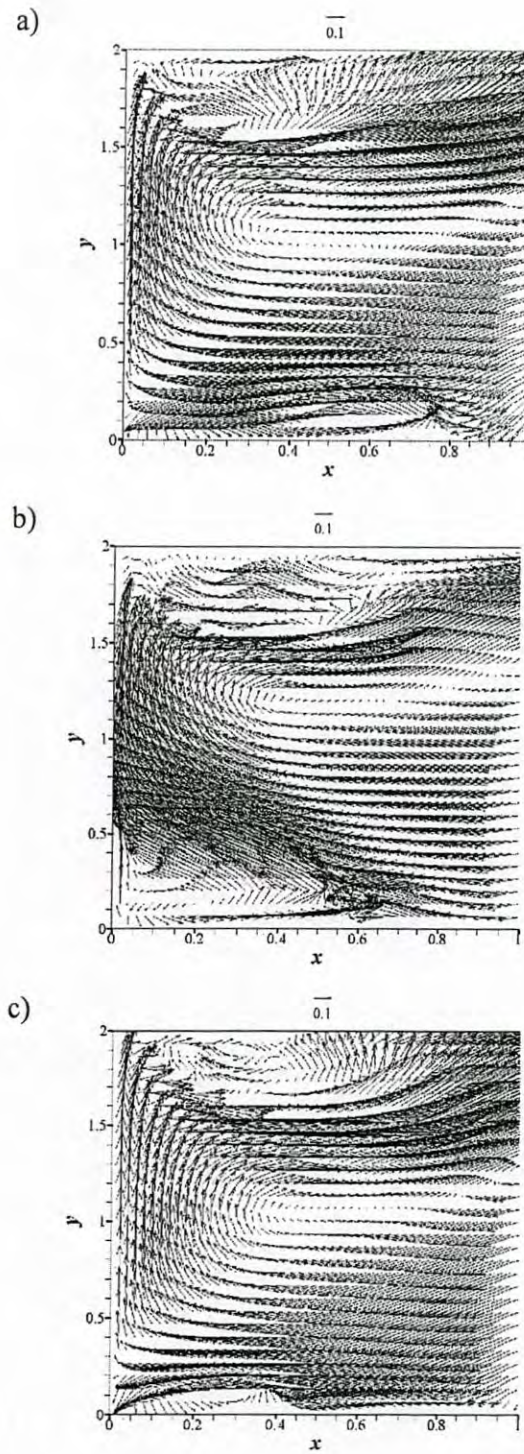


Figura 4.51 Vectores de velocidad (m/s) en receptor de cavidad con paredes negras ($\epsilon=0.9$), inclinado a $+30^\circ$ ($Ra=5.17 \times 10^{11}$) en planos: a) $z=0.5$ m, b) $z=1$ m, c) $z=1.5$ m.

Tabla 4.34 Coeficiente de transferencia de calor ($\text{W/m}^2 \text{K}$) en receptor de cavidad.

Inclinación	$Ra=2.21 \times 10^{11}$	$Ra=3.69 \times 10^{11}$	$Ra=5.17 \times 10^{11}$
$\varepsilon=0.05$			
+15°	20.7	27.8	36.1
+30°	18.4	24.7	33.4
$\varepsilon=0.9$			
+15°	82.7	144.9	238.8
+30°	78.8	141.5	233.5

Tabla 4.35 Número de Nusselt en receptor de cavidad.

Inclinación	$Ra=2.21 \times 10^{11}$	$Ra=3.69 \times 10^{11}$	$Ra=5.17 \times 10^{11}$
$\varepsilon=0.05$			
+15°	727	935	1172
+30°	634	812	1041
$\varepsilon=0.9$			
+15°	2835	4739	7339
+30°	2620	4351	6683

En la Tabla 4.36 se presenta el porcentaje de contribución del intercambio radiativo al flujo de calor total (pérdidas de calor). El valor mínimo fue de 20% y corresponde al caso con $Ra=2.21 \times 10^{11}$, $+15^\circ$ y $\varepsilon=0.05$. El máximo fue de 91% cuando $\varepsilon=0.9$, $Ra=5.17 \times 10^{11}$ y $+30^\circ$.

4.4 Análisis de la transferencia de calor en un receptor-calorímetro para el campo experimental de torre central de la Universidad de Sonora.

En la Figura 4.52 se tiene una vista isométrica del prototipo de receptor-calorímetro, propuesto para evaluar la potencia térmica de un conjunto de heliostatos. Consiste en un recinto cerrado de forma paralelepípedo con una altura y profundidad de 1.25 m, donde se tienen 4 tuberías de entrada por el centro y 4 tuberías de salida de fluido refrigerante por los extremos de un diámetro de 1.5 pulgadas. Con el fin de aumentar el área donde será incidida la radiación concentrada y mediante la técnica de calorimetría de agua fría será medida la cantidad de energía proporcionada por un heliostato o, un conjunto de ellos. Con el fin de aumentar la transferencia de calor se le incorporó un arreglo de aletas. El número total de aletas es de 1064 de 3/8 de pulgada de diámetro y separadas 34 mm.

El aumento del área al considerar las aletas es de 283% pasando de 1.56 a 4.42 m². En la Tabla 4.37 se tiene el resultado del análisis de independencia de malla el cual fue llevado a cabo con una velocidad de entrada del fluido de 1 m/s en cada tubería y una diferencia de temperatura de 80 K donde el flujo total fue de 440.1 kW/m² para un tamaño de malla de 8x30x30 dando un total de 7200 nodos computacionales.

La Tabla 4.38 muestra los resultados de transferencia de calor donde la variación de velocidad de entrada del fluido desde 0.15 hasta 1 m/s da un flujo de calor total retirado de 77.2 y 443.4 kW/m², respectivamente. Del cual las aletas retiran un 89% y el resto para el área de la pared.

Tabla 4.36 Porcentaje (%) de contribución del intercambio radiativo en el receptor de cavidad.

Inclinación	$Ra=2.21 \times 10^{11}$	$Ra=3.69 \times 10^{11}$	$Ra=5.17 \times 10^{11}$
$\varepsilon=0.05$			
+15°	20	31	42
+30°	23	35	46
$\varepsilon=0.9$			
+15°	75	85	90
+30°	78	86	91

Tabla 4.37 Independencia de malla para receptor-calorímetro.

Malla	$q \text{ (kW/m}^2\text{)}$	% dif.
8x30x30	440.1	---
10x30x30	442.6	0.56
12x30x30	442.5	0.02

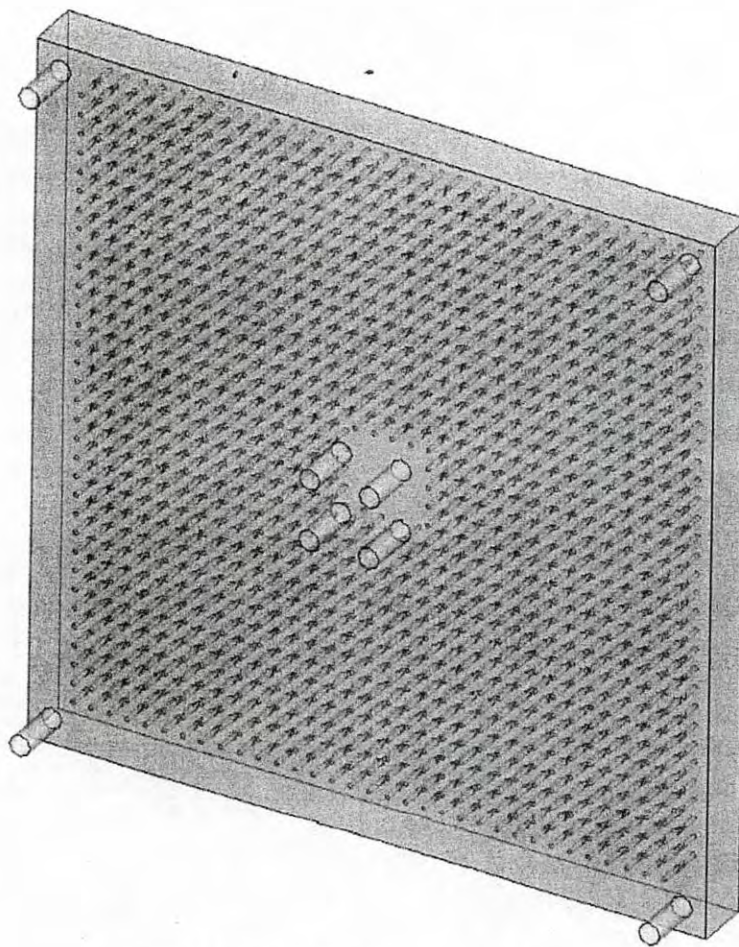


Figura 4.52 Prototipo de receptor-calorímetro.

En la Figura 4.53 los contornos de temperatura muestran una buena distribución de la misma como lo indica el inciso (a) donde en las inmediaciones de las tuberías de entrada se presentan temperaturas de 293 K y el resto del prototipo tiene una temperatura de 315 K como máxima. En los incisos (b) y (c), los planos en los puntos medios de altura y profundidad muestran una distribución de temperatura donde el mínimo está en las zonas inmediatas a las tuberías de entrada y sube hasta tener valores de 312 K.

Por último, en la Figura 4.54 se presenta la capacidad de evaluación de heliostatos usando el concepto de receptor-calorímetro, considerando una potencia proporcionada de 32.4 kW, se tiene que con una velocidad de flujo de 0.15 m/s se podrían evaluar 2 heliostatos y subiendo el flujo hasta 1 m/s esta capacidad aumenta a 14 heliostatos. La línea punteada corresponde al ajuste de datos con un modelo exponencial donde la R^2 da un valor de 0.9805. Por lo que, bajo las condiciones señaladas, el concepto de receptor-calorímetro se presenta como una opción funcional para la caracterización térmica de heliostatos.

Tabla 4.38 Resultados de transferencia de calor en receptor-calorímetro.

Velocidad (m/s)	Flujo de calor total (kW)
0.15	120.6
0.30	194.1
0.65	300.3
1.00	692.8

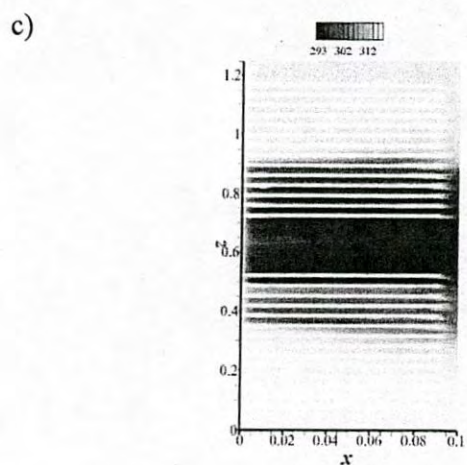
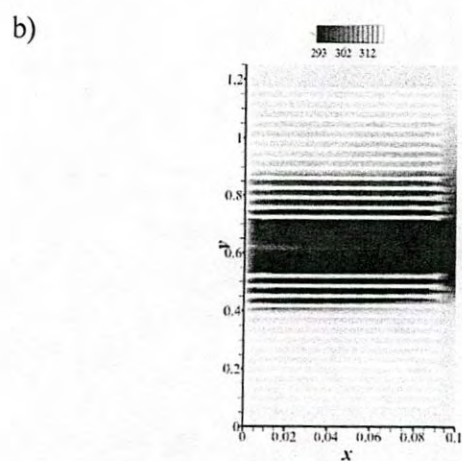
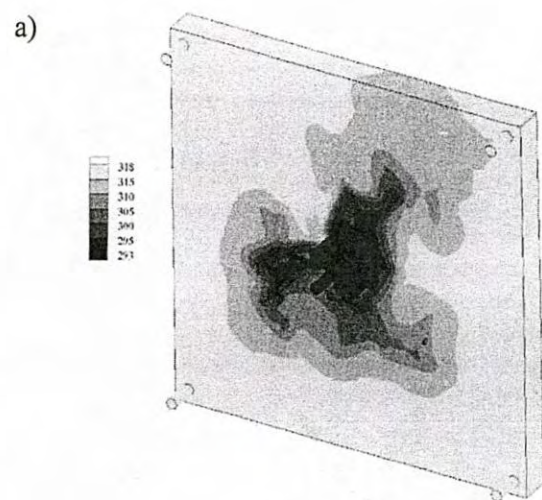


Figura 4.53 Contornos de temperatura (K) en receptor-calorímetro con $v=1\text{ m/s}$, a) Prototipo completo, b) Plano en $z=0.625\text{ m}$, c) Plano en $y=0.625\text{ m}$.

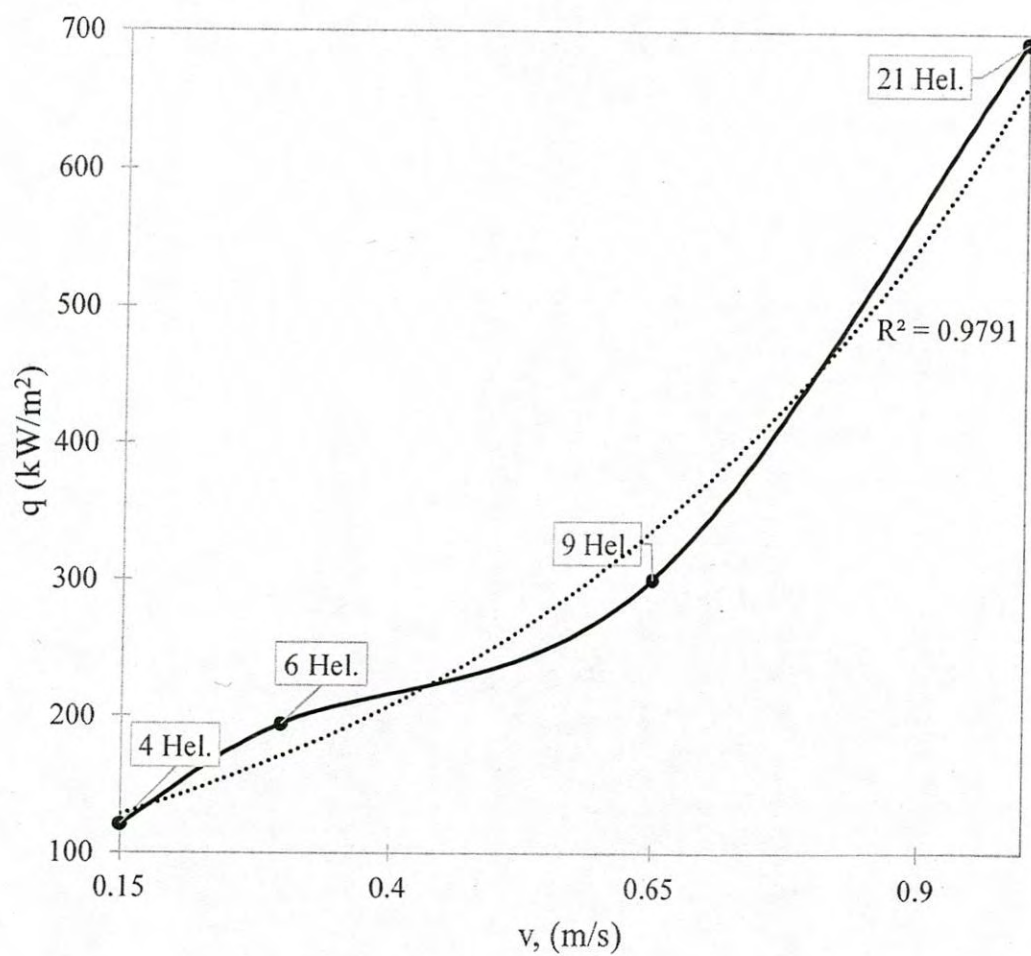


Figura 4.54 Capacidad de remoción de calor en función de heliostatos del receptor-calorímetro.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis se llevó a cabo un estudio teórico-experimental de la transferencia de calor en un receptor de cavidad para un sistema termosolar de torre central. Para la parte teórica se utilizó el software de dinámica de fluidos computación Fluent 6.3 donde se probaron seis modelos de turbulencia ($sk\epsilon_t$, $rk\epsilon_t$, $rngk\epsilon_t$, rsm , $sk\omega$ y $sstk\omega$) y el modelo radiativo de coordenada discreta. En la parte experimental se construyeron dos cavidades cubicas de 1 m de arista donde se varió la propiedad radiativa de emisividad: un caso con paredes de aluminio pulido y el otro con paredes pintadas de negro. Se varió el flujo de calor en potencias de 75 W, 150 y 300 W. Además, se varió el ángulo de inclinación en valores de +45, +30, +15, 0, -15, -30 y -45°. En todos los casos la cavidad se mantuvo abierta al ambiente mientras que el resto de las paredes se aisló térmicamente. Para el receptor el receptor de cavidad, se analizaron diferentes configuraciones, se consideraron 3 valores de temperatura en la pared caliente (600, 800 y 1000 K) y dos inclinaciones (+15 y +30°). Por último, para el receptor-calorímetro la diferencia de temperatura fue de 25 K entre la pared que recibe el flujo de calor y el fluido refrigerante.

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

1. Los valores de temperatura del aire de la cavidad son más elevados cuando la emisividad es igual a 0.05, debido a que cuando el intercambio radiativo está presente se reduce la energía que se transfiere por convección natural.
2. La radiación cambia el patrón de temperatura (principalmente cerca de las paredes adiabáticas) ya que el intercambio radiativo modifica la distribución de temperatura de la paredes adiabáticas provocando que las isotérmicas ya no sean perpendiculares como ocurre cuando solo existe convección natural.
3. Al analizar el patrón de flujo se aprecia que el movimiento del fluido dentro de la cavidad abierta es en tres dimensiones.

4. La menor diferencia porcentual promedio para los perfiles de temperatura fue con el modelo de turbulencia $rk\epsilon_t$ y la mayor diferencia fue con el modelo $sk\omega$.
5. Cuando la cavidad está viendo hacia abajo el número de Nusselt promedio disminuye con el ángulo de inclinación, mientras que ocurre lo opuesto cuando la cavidad está viendo hacia arriba
6. El espesor de la capa límite térmica para los casos numéricos y experimentales es de aproximadamente 0.03 m.
7. La comparación del número de Nusselt para la cavidad con $\epsilon=0.05$ dio como resultado que el modelo con menor diferencia promedio fue $rk\epsilon_t$, mientras que la mayor diferencia la tuvo el modelo $sstk\omega$.
8. Cuando se considera el intercambio radiativo ($\epsilon=0.9$) el modelo con menor diferencia promedio la tuvo $sstk\omega$ para los $Ra=1.7 \times 10^{11}$ y $Ra=6.8 \times 10^{11}$ y el modelo $sk\omega$ para el $Ra=3.4 \times 10^{11}$, mientras que la mayor diferencia la tuvo el modelo rsm para los dos primeros Ra , mientras que para con el $Ra=6.8 \times 10^{11}$ fue el modelo $sk\omega$.
9. Cuando se suprime el intercambio radiativo en el receptor ($\epsilon=0.05$) la participación de este mecanismo va desde un 20 hasta 46 % con respecto al flujo de calor total, en tanto que en el caso de paredes negras esta contribución sube hasta un 91%.
10. El cambio en la inclinación del receptor (de $+15^\circ$ a $+30^\circ$) modifica los patrones de temperatura, magnitud de velocidad y vectores de velocidad.
11. El cambio en la inclinación y emisividad de las paredes modifican la transferencia de calor en el receptor disminuyendo los valores de coeficiente de transferencia de calor y número de Nusselt cuando se pasa de $+15^\circ$ a $+30^\circ$
12. De acuerdo a los resultados teóricos, el dispositivo para la medición del flujo de calor concentrado es funcional, en las condiciones estudiadas.

5.2 Recomendaciones.

Para ampliar los resultados obtenidos en estudios posteriores se recomienda:

- Cambiar de una fuente de energía eléctrica directa a energía solar para el análisis experimental del receptor.

- Cambiar el material de construcción del receptor por uno que soporte un mayor flujo de calor.
- Efectuar el estudio con una mayor instrumentación para obtener información experimental de los campos de velocidad del fluido en la cavidad.

BIBLIOGRAFÍA

1. Balaji C, Venkateshan S. P, Correlations for Free Convection and Surface Radiation in a Square Cavity, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 15-3 (1994) 249-251.
2. Balaji C, Venkateshan S. P, Interaction of Surface Radiation With Free Convection in a Square Cavity, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 14-3, (1993) 260-267.
3. Balance Nacional de Energía 2012, <http://sie.energia.gob.mx>
4. Behar O, Khellaf A, Mohammed K, A Review of Studies on Central Receiver Solar Thermal Power Plants, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23 (2013) 12-39.
5. Boehm R. F, A Review of Convective Loss Data From Solar Central Receivers, *Journal of Solar Energy Engineering*, 105 (1987) 29-33.
6. Chan Y. L, Tien C. L, A Numerical Study of Two-Dimensional Laminar Natural Convection in Shallow Open Cavities, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 28-3 (1985) 603-612.
7. Chan Y. L, Tien C. L, Laminar Natural Convection in Shallow Open Cavities, *Journal of Heat Transfer*, 108 (1986) 305-309.
8. Chakroun W, Elsayed M. M, Al-Fahed S. F, Experimental Measurements of Heat Transfer Coefficient in a Partially/ Fully Opened Tilted Cavity, *Journal of Solar Energy Engineering*, 119 (1997) 298-303.
9. Choudhury D, Introduction to the Renormalization Group Method and Turbulence Modeling, Technical Memorandum, Fluent Inc., (1993). TM-107.
10. Clausing A. M, An Analysis of Convective Losses From Cavity Solar Central Receivers, *Solar Energy*, 27-4 (1981) 295-300.
11. Dehghan A. A, Behnia M, Combined Natural Convection-Conduction and Radiation Heat Transfer in a Discretely Heated Open Cavity, *Journal of Heat Transfer*, 118 (1996) 56-64.
12. Elsayed M. M, Chakroun W, Effect of Aperture Geometry on Heat Transfer in Tilted Partially Open Cavities, *Journal of Heat Transfer*, 121 (1999) 819-827.

13. Fang J. B, Tu N, Wei J. J, Numerical Investigation of Start-up Performance of a Solar Cavity Receiver, *Renewable Energy*, 53 (2013) 35-42.
14. Fang J. B, Wei J. J, Dong X. W, Wang Y. S, Thermal Performance Simulation of a Solar Cavity Receiver Under Windy Conditions, *Solar Energy* 85 (2011) 126-138.
15. Hess C. F, Henze R. H, Experimental Investigation of Natural Convection Losses From Open Cavities, *Journal of Heat Transfer*, 106 (1984) 333-338.
16. Hinojosa J. F, Cabanillas R. E, Alvarez G, Estrada C. E, Nusselt Number for the Natural Convection and Surface Thermal Radiation in a Square Tilted Open Cavity, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32 (2005) 1184-1192.
17. Hinojosa J. F, Cervantes de Gortari J, Numerical Simulation of Steady-State and Transient Natural Convection in an Isothermal Open Cubic Cavity, *Heat Mass Transfer*, 46 (2010) 595-606.
18. Gibson M. M, Launder B. E, Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer, *Journal of Fluid Mechanics*, 86(1978) 491-511.
19. Humphrey J. A. C, To W. M, Numerical Simulation of Buoyant, Turbulent Flow II. Free and Mixed Convection in a Heated Cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 29-4 (1986) 593-610.
20. Ince N.Z, Launder B.E, On the Computation of Buoyancy Driven Turbulent Flows in Rectangular Enclosures, *International Journal of Heat Fluid Flow* 10 (1989) 110-117.
21. Juarez J. O, Hinojosa J. F, Xaman J. P, Perez-Tello M, Numerical Study of Natural Convection in an Open Cavity Considering Temperature-Dependent Fluid Properties, *International Journal of Thermal Sciences*, 50 (2011) 2184-2197.
22. Kim J. K, Yoon H. K, Kang Y. H, Experimental Study on Heat Loss From Cavity Receiver for Solar Power Tower, *Solar Energy and Human Settlement, Proceedings of ISES World Congress 2007*, 1 (2009) 1719-1723.
23. Khalsa S. S, Ho C. K, Radiation Boundary Conditions for Computational Fluid Dynamics Models of High-Temperature Cavity Receivers, *Journal of Solar Engineering*, 133 (2011) 1-6.
24. Launder B.E, Reece G.J, Rodi W, Progress in the Development of a Reynolds Stress Turbulence Closure, *Journal of Fluid Mechanics* 68 (1975) 537-566.

25. LeQuere P, Humphrey J. A. C, Sherman F. S, Numerical Calculation of Thermally Driven Two-Dimensional Unsteady Laminar Flow in Cavities of Rectangular Cross Section, *Numerical Heat Transfer*, 4 (1981) 249-283.
26. Lee T. L, Lin T. F, Transient Three-Dimensional Convection of air in a Differentially Heated Rotating Cubic Cavity, *International Journal of Heat and Mass transfer*, 39-6 (1996) 1243-1255.
27. Leibfried U, Ortjohann J, Convective Heat Loss From Upward and Downward Facing Cavity Solar Receivers: Measurements and Calculations, *Journal of Solar Energy Engineering*, 117 (1995) 298-303.
28. Lin C. X, Xin M. D, Turbulent Mixed Convection-Radiation Interactions in a Cavity, *Journal of Thermal Sciences*, 1-3, 1992, 1-7.
29. McMordie R. K, Convection Heat Loss From a Cavity Receiver, *Journal of Solar Energy Engineering, Technical Briefs*, 106 (1984) 98-100.
30. Mondragón Robles Jorge, Estudio Numérico de la Transferencia de Calor en el Receptor de un Sistema Termosolar de Torre Central, Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad de Sonora, 2011.
31. Montes M. J, Rovira A, Martinez-Val J. M, Ramos A, Proposal of a Fluid Flow Layout to Improve the Heat Transfer in the Active Absorber Surface of Solar Central Cavity Receivers, *Applied Thermal Engineering*, 35 (2012) 220-232.
32. Montiel González M, Hinojosa J. F, Villafán Vidales H. I, Bautista Orozco A, Estrada C. A, Theoretical and Experimental Study of Natural Convection With Surface Thermal Radiation in a Side Open Cavity, *Applied Thermal Engineering*, 2014 1-11.
33. Menter F.R, Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, *AIAA J.* 32-8 (1994) 1598-1605.
34. Muftuoglu A, Bilgen E, Heat Transfer in Inclined Rectangular Receivers for Concentrated Solar Radiation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35 (2008) 551-556.
35. Nouanegue H, Murfuoglu A, Bilgen E, Conjugate Heat Transfer by Natural Convection, Conduction and Radiation in Open Cavities, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51 (2008) 6054-6062.

36. Penot F, Numerical Calculation of Two-Dimensional Natural Convection in Isothermal Open Cavities, Numerical Heat Transfer Part A, Applications, 5 (1982) 421-437.
37. Polat O, Bilgen E, Conjugate Heat Transfer in Inclined Open Shallow Cavities, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46 (2003) 1563-1573.
38. Prakash M, Kedare S. B, Nayk J. K, Numerical Study of Natural Convection Loss From Open Cavities, International Journal of Thermal Sciences, 51 (2012) 23-30.
39. Raithby G. D, Chui E. H, A Finite-Volume Method for Predicting Heat Transfer in Enclosures With Participating Media, Journal of Heat Transfer, 112 (1990) 415-423.
40. Resumen para Responsables de Políticas 2013, Bases Físicas, Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC), www.climatechange2013.org.
41. Romero-Alvarez Manuel, Zarza Eduardo, Concentrating Solar Thermal Power Energy Conversion (19). LLC: Taylor & Francis Group; 2007.
42. Sezai I, Mohamad A. A, Three Dimensional Simulation of Natural Convection in Cavities With Side Opening, International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 8-7 (1998) 800-813.
43. Shih T.H, Liou W.W, Shabbir A, Yang Z, Zhu J, A new $k-\varepsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows-Model Development and Validation, Computational Fluids 24-3 (1995) 227-238.
44. Showole R. A, Tarasuk J. D, Experimental and Numerical Studies of Natural Convection With Flow Separation in Upward-Facing Inclined Open Cavities, Journal of Heat Transfer, 115 (1993) 592-605.
45. Skok H, Ramadhyani s, Schoenhals R. J, Natural Convection in a Side-Facing Open Cavity, International Journal of Heat and Fluid Flow, 12-1, (1991) 36-45.
46. Sobin A, Wagner W, Easton C. R, Central Collector Solar Energy Receivers, Solar Energy 18 (1975) 21-30.
47. Sönke H, Feierabend L, Klein S.A, Reindl D. T, An Alternative Method for Calculation of Semi-Gray Radiation Heat Transfer in Solar Central Cavity Receivers, Solar Energy 86 (2012), 1899-1909.

48. Tu N, Wei J, Fang J, Numerical Study on Thermal Performance of a Solar Cavity Receiver With Different Depths, *Applied Thermal Engineering*, 72 (2014) 20-28.
49. Upton T. D, Watt D. W, Experimental Study of Transient Natural Convection in an Inclined Rectangular Enclosure, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 40-11 (1997) 2679-2690.
50. Van Leer B, Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme, *Journal of Computational Physics*, 32 (1979) 101-136.
51. Wang Y, Dong X, Wei J, Jin H, Numerical Simulation of the Heat Flux Distribution in a Solar Cavity Receiver, *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 4-4 (2010) 571-576.
52. Wang Z, Yang M, Li L, Zhang Y, Oscillation and Chaos in Combined Heat Transfer by Natural Convection, Conduction, and Surface Radiation in an Open Cavity, *Journal of Heat Transfer*, 134 (2012) 94501-1-6.
53. Wilcox D.C, *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries Inc., La Canada, California, 1998.
54. World Energy Outlook, Executive Summary; 2013, www.worldenergyoutlook.org/.
55. Yu Q, Wang Z, Xu E, Zhang H, Lu Z, Wei X, Modeling and Simulation of 1 MWe Solar Tower Plant's Solar Flux Distribution on the Central Cavity Receiver, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 29 (2012) 123-136.
56. Yu Q, Wang Z, Xu E, Li X, Guo M, Modeling and Dynamic Simulation of the Collector and Receiver System of 1MWe Dahan Solar Thermal Power Plant, *Renewable Energy*, 23 (2012) 18-29.
57. Zoschak R. J, Wu S. F, Gorman D. N, Design and Testing of a Cavity Type, Steam Generating, Central Receiver for a Solar Thermal Power Plant, *Transactions of the ASME*, 102 (1980) 486-494.



Test of turbulence models for natural convection in an open cubic tilted cavity[☆]

A. Piña-Ortiz, J.F. Hinojosa^{*}, V.M. Maytorena

Department of Chemical Engineering and Metallurgy, University of Sonora, Hermosillo 83000 Sonora, Mexico



ARTICLE INFO

Available online 15 August 2014

Keywords

Turbulence models
Natural convection
Open cubic cavity

ABSTRACT

A comparison was made between six turbulence models and experimental temperature profiles for the turbulent natural convection in a tilted open cubic cavity. The experimental setup consists of a cubic cavity of 1 m by side with one vertical wall receiving a constant and uniform heat flux, whereas the remaining walls are thermally insulated. The thermal fluid is air and the aperture is facing the heated wall. The temperature profiles were obtained at different heights and depths and each one consists of 10 positions inside the cavity. A commercial computational fluid dynamic software was used for the simulation and different turbulence models of $k-\epsilon$ and $k-\omega$ families were evaluated against experimental data. The lowest absolute average percentage difference for the experimental and numerical temperature profiles was for the $rk-\epsilon$ model and the highest was for the $sk-\omega$ model.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The heat transfer study in open cavities has been widely investigated due its relevance in some thermal engineering applications such as solar thermal receivers [15] and electronic cooling devices [13]. In several thermal systems formed by an open cavity, a turbulent flow exists because the characteristics of the system: size, thermal gradient or inclination angle; therefore the accuracy of the turbulence models has to be established.

On the other hand, the open cavities used as thermal receivers in solar concentration systems (such as Dish Stirling or solar tower) operate with different inclination angles to allow the income of the concentrated solar light. In literature there are several reported studies pertaining to the heat transfer in open cavities [1–44], some of those that take into consideration the effect of the open cavity inclination are briefly described next.

1.1. Numerical studies

Hinojosa et al. [30] reported numeric results of Nusselt numbers for a tilted open square cavity, considering laminar natural convection and surface thermal radiation applying the Boussinesq approach. The results were obtained for a Rayleigh range from 10^4 to 10^7 and for an inclination angle range of the cavity from 0° to 180° . Hinojosa et al. [33] realized a numerical work of the heat transfer by laminar natural convection in a tilted open cubic cavity considering laminar flow and

considering the Boussinesq approximation using the finite volume method and the SIMPLEC algorithm. The results were obtained for steady state, Rayleigh number ranging from 10^4 to 10^7 and inclination angles ranging from 0° to 180° . It was observed that for high Rayleigh numbers the Nusselt number changes substantially with the inclination angle of the cavity.

Prakash et al. [44] investigated the natural convection from open cavities of three different shapes (cubical, spherical and hemispherical) having equal heat transfer area using commercial CFD software Fluent. The study was performed using wall temperatures of 100°C , 200°C and 300°C . The effect of the opening ratios and the inclination was studied. The convective loss is found to increase with an increase of opening ratio. The increase in natural convection loss for different inclinations is found to vary between 30% and 80% when the opening ratio is increased.

1.2. Experimental studies

Hess and Henze [3] reported experimental results for natural convection in fully/partially open cavities. Laser Doppler velocimetry was used to obtain velocity profiles for Rayleigh numbers between 3×10^{10} and 2×10^{11} . The characteristics of two-dimensional and three-dimensional flows were observed with dye flow visualization, including boundary layer transition to turbulence, flow patterns in the cavity, and flow outside of the cavity. The local Nusselt number is correlated with local Rayleigh number. Chakraborty et al. [21] carried out an experimental investigation to determine the heat transfer coefficient from a rectangular tilted cavity to the ambient due to the buoyancy driven flow in the cavity. The cavity is partially or fully open from one side. All the walls of the cavity are adiabatic except the wall facing the cavity opening which is heated at a constant heat flux. The results presented in terms

[☆] Communicated by W.J. Minkowicz.

^{*} Corresponding author at: Universidad de Sonora Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Col. Centro, CP 83000 Hermosillo, Sonora, México.

E-mail address: hinojosa@uqsou.com.mx (J.F. Hinojosa).



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Energy Procedia 57 (2014) 467–476

Energy

Procedia

2013 ISES Solar World Congress

Numerical Study of Heat Transfer Losses by Mixed Convection and Surface Thermal Radiation in an Open Cavity Receiver for a Solar Tower System

Armando Piña Ortiz^a, Jesús F. Hinojosa Palafox^{a*}, Claudio A. Estrada Gasca^b

^aDepartamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad de Sonora,

Bvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Hermosillo, 83000, Sonora, México. Tel. +52 (662) 2592106

^bInstituto de Energías Renovables, UNAM, AP 34, Temixco, 62580, Morelos, México. Tel. +52 (55) 56229744

Abstract

The thermo solar central tower power plants are complex systems that consist of a heliostats field which provide a high solar concentrated flux to a thermal receiver located in the top of a tower. With this type of technology, a fluid moving in the thermal receiver can be heated up to 800 to 1200 K, so a conventional thermodynamic cycle can be operated to generate electricity. In the city of Hermosillo, in the northern state of Sonora, Mexico, the National Autonomous University of Mexico in agreement with the University of Sonora is developing this type of technology for a plant of 2 MW, with an array of 80 heliostats (36 m² each one) and a tower of 32 m height. Therefore, an appropriated thermal receiver has to be designed. Considering above, in this work the numerical results of heat transfer losses by mixed convection and surface thermal radiation in an open cavity receiver considering variable fluid properties are presented. Numerical calculations were performed in a cavity of 1 m width, 2 m height and 2 m depth, considering (a) only natural convection and (b) mixed convection, both with surface thermal radiation. The temperature difference between the hot wall and the bulk fluid (ΔT) was 600 K. The k- ϵ , standard turbulence model was solved for the turbulent convection and for the surface thermal radiation the discrete ordinate method was applied. The simulations were conducted in steady state and the fluid properties were considered as a function of temperature. The software of computational fluid dynamics FLUENT 6.3 was used. The velocity, temperature fields and heat transfer coefficients were obtained. The total heat transfer losses increases 37.5% when the mixed convection is considered.

© 2014 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>).

Selection and/or peer-review under responsibility of ISES.

Keywords: numerical, heat transfer, open cavity

* Corresponding author. Tel.: +52(662)2592106

E-mail address: hinojosa@iq.uson.mx

Experimental and numerical study of turbulent natural convection in an open cubic cavity

V. M. Maytorena · A. Piña-Ortiz · J. F. Hinojosa

Received: 4 December 2013 / Accepted: 31 December 2014
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Abstract Study of natural convection in an open cubic cavity with side length of 1 m is presented. The experimental setup was built with the air as the heat transfer fluid. The vertical wall opposite to the aperture is subjected to uniform heat flux condition with the four different heat flux values in the range 55–333 W/m², whereas the remaining walls were kept thermally insulated. The temperature at discrete locations inside the cavity was obtained which followed evaluation of heat transfer coefficient and Rayleigh number. The thermal and flow analysis in 3-D was based on the standard $k-\epsilon$ turbulence model and implemented using CFD software Fluent 6.3. The spatial distribution for temperature, velocity and turbulent viscosity are determined and analyzed in the perspective of experimental observations. The experimentally determined ranges of Rayleigh number, Nusselt number and heat transfer coefficient are 1.66×10^{11} – 7.1×10^{11} , 185.94–243.31 and 4.88–6.83 W/m² K, respectively. The observed maximum difference between the experimental and numerical values for heat transfer coefficient and Nusselt number are 10.8 and 14 % respectively.

List of symbols

A	Area of heated wall
C _p	Specific heat at constant pressure (J/kg K)
g	Gravitational acceleration (m/s ²)
G _k	Generation of turbulent kinetic energy due to the buoyancy force (J/kg)
h	Heat transfer coefficient (W/m ² K)
I	Electric current (A)

k	Turbulent kinetic energy (J/kg)
L	Cavity wall length (m)
Nu	Local convective Nusselt number nondimensional
$\overline{Nu}$	Total average Nusselt number nondimensional
P _k	Generation of turbulent kinetic energy (J/kg)
q''	Heat flux (W/m ²)
Ra	Rayleigh number = $g\beta q'' L^4 / (\alpha \nu)$, nondimensional
$\overline{T}_h$	Average temperature of the hot wall (K)
T _∞	Ambient temperature (K)
V	Voltage (V)
X, Y, Z	Coordinate system (m)

Greek symbols

α	Thermal diffusivity (m ² /s)
β	Thermal expansion coefficient (1/K)
ϵ_k	Turbulent kinetic energy dissipation (J/kg)
λ	Thermal conductivity (W/m K)
μ_t	Turbulent viscosity (kg/m s)
ν	Kinematic viscosity (m ² /s)
ρ	Density (kg/m ³)
σ_t	Turbulent Prandtl number nondimensional

1 Introduction

The study of heat transfer in open cavities is a topic of great interest due its applications in several fields of thermal engineering like thermosolar receiver systems, cooling of electronic devices, energy saving in household refrigerators, etc. In all such cases, buoyancy driven convection heat transfer plays a significant role among the other heat transfer mechanisms. In case of large open cavity such as the receiver in solar tower systems, turbulent flow condition exists. However, the amount of incoming energy that goes to the ambient instead to the thermal fluid of the

V. M. Maytorena · A. Piña-Ortiz · J. F. Hinojosa (✉)
Department of Chemical Engineering and Metallurgy, University
of Sonora, 83000 Hermosillo, Sonora, Mexico
e-mail: fhinojosa@iq.uson.mx