



**UNIVERSIDAD DE SONORA**  
**DIVISIÓN DE INGENIERÍA**  
**POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

**ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA  
RADIACION TERMICA EN SISTEMAS TERMICOS**

**TITULACIÓN POR ARTÍCULOS CIENTÍFICOS PUBLICADOS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**Doctor en Ciencias de la Ingeniería**

**PRESENTA:**

**M.C. JOSE MARIANO ARNOLDO NAVARRO URIBE**

**HERMOSILLO, SONORA**

**SEPTIEMBRE DE 2020**

# 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:

**José Mariano Arnoldo Navarro Uribe**

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

30/9/2020

Fecha



Dr. Jesús Fernando Hinojosa Palafox  
Presidente

30/9/2020

Fecha



Dr. Armando Piña Ortiz  
Secretario

30/9/2020

Fecha



Dr. Abraham Rogelio Martín García  
Sinodal

30/9/2020

Fecha



Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor  
Sinodal Externo

30/9/2020

Fecha



Dr. Manuel Pérez Tello  
Sinodal



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería

---

**Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química**

## AUTORIZACIÓN DEL EXAMEN DE GRADO

06 de Octubre de 2020.

Por medio de la presente se hace constar que el estudiante **JOSE MARIANO ARNOLDO NAVARRO URIBE**, 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. ABRAHAM ROGELIO MARTIN GARCÍA**

**COORDINADOR POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA:  
INGENIERÍA QUÍMICA**



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"

### Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química

20 de Mayo del 2020

**M.C. José Mariano Arnoldo Navarro Uribe**  
**Estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería**  
**Presente.-**

Por medio de la presente le comunico que en sesión extraordinaria de la Comisión Académica del Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química con fecha 19 de Mayo del 2020, se aprobó su solicitud de aplicación del Acuerdo de Colegio Académico 06-137/2015 para estudiantes del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química. Dicho acuerdo establece que para estudiantes que cuenten con al menos dos artículos publicados y/o aceptado dentro de los 8 semestres de duración del programa, podrán titularse mediante un esquema alternativo al tradicional, en donde el estudiante tendrá la opción de presentar los artículos como su documento escrito que deberá defenderse en la fase oral del examen de grado.

Lo anterior debido a que presentó ante la Comisión Académica del Posgrado evidencia de la publicación de los siguientes artículos en revistas indexadas con resultados relacionados con su Tesis Doctoral:

1. **J.M.A. Navarro, J.F. Hinojosa, I. Hernandez-Lopez**, Computational fluid dynamics and experimental study of turbulent natural convection with surface thermal radiation in a cubic enclosure, International Journal of Modern Physics C, vol. 31: 2050065, 2020, DOI:10.1142/S0129183120500655.

2. **J.M.A. Navarro, J. F. Hinojosa, A. Piña-Ortiz, J.P. Xamán**, The effect of surface thermal radiation on heat transfer in a ventilated cavity, Journal of Heat Transfer, 2020. DOI: 10.1115/1.4046530.

#### ATENTAMENTE

"El saber de mis hijos hará mi grandeza"

**Dr. Abraham Rogelio Martín-García**

**Coordinador de Posgrado en Ciencias de la Ingeniería: Ingeniería Química**

[armartin@iq.uson.mx](mailto:armartin@iq.uson.mx)



POSGRADO EN  
CIENCIAS DE  
LA INGENIERÍA:  
INGENIERÍA QUÍMICA

## RELATORÍA

A continuación, se presenta una descripción de los artículos publicados durante el estudio doctoral titulado “Estudio teórico-experimental del efecto de la radiación térmica en sistemas térmicos”, para llevar a cabo la obtención del grado de Doctor con la opción de publicación de artículos como alternativa para la fase escrita del examen de grado.

El objetivo general de este trabajo fue “Estudiar teórica y experimentalmente el efecto de la radiación térmica sobre la transferencia de calor en sistemas térmicos”, por lo tanto, los artículos publicados están en concordancia con este objetivo. En la primera etapa de la tesis, se trabajó en la parte experimental, la cual consistió en fabricar e instrumentar una cavidad de 1x1x1 m, con paredes internas de aluminio pulido de baja emisividad (0.03), para posteriormente pintarse de color negro con una pintura selectiva de alta emisividad (0.98). De esta primera etapa se obtuvieron los primeros resultados experimentales de perfiles de temperatura y coeficientes combinados de transferencia de calor para diferentes potencias térmicas, para distintas configuraciones de entrada y salida de aire. En la segunda etapa, se trabajó en realizar la geometría y mallado para poder realizar la simulación numérica del sistema. Se realizó una comparación entre los resultados arrojados por el experimento y los obtenidos de con la simulación numérica. Se concluyó que para el caso de la cavidad ventilada la configuración con paredes bajas en emisividad, se calientan considerablemente más que para la cavidad con paredes de alta emisividad. También se concluyó que el coeficiente de transferencia de calor por convección sufre un importante incremento cuando la emisividad cambia de 0.03 a 0.98, siendo de entre un 87 a 110 % para el caso de baja y alta potencia respectivamente. Los resultados de ambas etapas se publicaron en el artículo “*The effect of Surface thermal radiation on heat transfer in a ventilated cavity*” en la revista Journal of Heat Transfer (indizada en el JCR), en el cual aparezco como primer autor.

Como tercera etapa se realizó un estudio numérico y experimental en una cavidad completamente cerrada. Se obtuvieron resultados con baja y alta emisividad de las paredes. Se logró obtener una metodología numérica que capaz de reproducir el fenómeno en estudio (influencia de la radiación térmica en la transferencia de calor). De esta tercera etapa se

concluyó lo siguiente; las paredes de la cavidad con baja emisividad, se calientan considerablemente más que para la cavidad con paredes de alta emisividad, se encontró concordancia hacia los resultados experimentales con dos modelos de turbulencia para el caso de alta emisividad SST k- $\omega$  y para el caso de baja emisividad STD k- $\omega$ , así mismo se encontró que el coeficiente de transferencia de calor convectivo ( $h$ ), se incrementa de un 49.2 a 48.1 % para el caso de baja y alta potencia, cuando las emisividades de las paredes cambian de 0.03 a 0.98. Estos resultados se reportaron en el artículo “*Computational fluid dynamics and experimental study of turbulent natural convection with surface thermal radiation in a cubic enclosure*”, de la revista “International Journal of Modern Physics C” (indizada en el JCR), del cual soy primer autor.

En la cuarta etapa se trabajó en un tercero aun no publicado, en donde se realizó un estudio numérico y experimental en una cavidad abierta en una de las caras. También se obtuvieron resultados con baja y alta emisividad de las paredes. En total se escribieron 3 artículos, uno a finales del 4to semestre y otros dos durante el 5to, para la aceptación de estos dos artículos, se llevó un tiempo total de 2 a 3 semestres posteriores a la fecha de su culminación y uno más sigue en envío y/o revisión.

De manera general se puede concluir que, con los resultados obtenidos se cumplió con los objetivos planteados en este trabajo Doctoral. Como complemento a la relatoría se anexan las publicaciones mencionadas previamente.

AQ1  
AQ2<sup>1</sup>  
AQ3<sup>2</sup>  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
2<sup>3</sup>  
9  
10  
4<sup>4</sup>**J. M. A. Navarro**Departamento de Ingeniería  
Química y Metalurgia,  
Universidad de Sonora,  
Hermosillo, Sonora 83000, Mexico**J. F. Hinojosa**Departamento de Ingeniería  
Química y Metalurgia,  
Universidad de Sonora,  
Hermosillo, Sonora 83000, Mexico  
e-mail: fhinojosa@iq.uson.mx**A. Piña-Ortiz**Departamento de Ingeniería  
Química y Metalurgia,  
Universidad de Sonora,  
Hermosillo, Sonora 83000, Mexico**J. P. Xamán**Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico,  
CENIDET-DGEST-SEP,  
prol. Av. Palmira S/N. Col. Palmira,  
Cuernavaca, Morelos CP 62490, Mexico

AQ4

12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22

# The Effect of Surface Thermal Radiation on Heat Transfer in a Ventilated Cavity

*In this work, experimental and numerical results were obtained to analyze the effect of surface thermal radiation on heat transfer by mixed convection in a ventilated cavity. Experimental temperature profiles were obtained at six different depths and heights consisting of 14 thermocouples each. Five turbulence models were evaluated against experimental data. The radiative heat transfer model was solved with the discrete ordinate method. The effect of thermal radiation on experimental heat transfer coefficients is significant; it increases between 87% ( $Re = 30,372$  and  $Ra = 3.04 \times 10^{11}$ ) and 110% ( $Re = 6021$  and  $Ra = 2.27 \times 10^{11}$ ), when the emissivity of the walls increases from 0.03 to 0.98. [DOI: 10.1115/1.4046530]*

*Keywords: ventilated cavity, thermal radiation, turbulence models*

## 25 1 Introduction

26 The global energy consumption has increased from 4661 Mtoe  
27 in 1973 to 9384 Mtoe in 2015 [1]. A great part of such increase  
28 comes from the necessity to maintain comfortable living spaces.  
29 Due to the need of air conditioning systems, there is an elevated  
30 energetic requirement in regions where there is an arid-deserted  
31 weather. In order to reduce the energetic consumption, this fact  
32 has raised a great deal of interest to enhance the thermal design in  
33 buildings and homes.

34 The influence of thermal radiation in heat transfer and air circula-  
35 tion inside offices and rooms is an aspect that has not been thor-  
36 oughly studied yet. Therefore, it is commonly not considered in  
37 calculations for the adequate capacity of air-conditioning equip-  
38 ment and ventilation positions. However, even though the air flow  
39 behavior in interior spaces can be predicted by complex mathe-  
40 matical models, the experimental results are required to validate  
41 the mathematical models employed to describe the thermal  
42 process.

43 In the scientific literature, there are many researches related to  
44 air flow and heat transfer on ventilated cavities, which can be  
45 categorized as follows: (a) numerical studies focused to the heat  
46 transfer by mixed convection, (b) experimental studies of heat  
47 transfer by mixed convection, and (c) studies of heat transfer by  
48 mixed convection coupled with thermal radiation.

49 **1.1 Numerical Studies of Heat Transfer in Cavities With**  
50 **Mixed Convection.** Singh and Sharif [2] analyzed a bidimen-  
51 sional cavity with walls heated at different temperatures. The air  
52 inlet and outlet positions were varied to identify the most effective  
53 way to remove the heat inside of the cavity. They found that the  
54 most effective position is when the air entrance is near the cold  
55 wall. Raji et al. [3] studied a bi-dimensional ventilated cavity. The  
56 numerical results showed that the flow structure is influenced by

the interaction of the forced and natural convection. Saha et al. [4] 57  
examined a bidimensional rectangular cavity. One vertical wall 58  
received a constant heat flux, getting results for a Richardson 59  
number from 0 to 10 and Reynolds number was kept fixed at 100. 60  
The results showed that the Nusselt and the nondimensional tem- 61  
perature of the heated wall depend only on the inlet and outlet 62  
positions. 63

Xamán et al. [5] made the study in a bidimensional ventilated 64  
cavity with a turbulent flow regime. Authors determined that exit 65  
air configuration at the top of the left wall has the better position 66  
of the air exit for the Reynolds number between  $5 \times 10^3$  and 67  
 $1 \times 10^4$ . Moraga and Lopez [6] presented a numerical analysis in 68  
a three-dimensional (3D) cavity with cool air inlet. They made air 69  
calculations, varying the Reynolds and the Richardson numbers. 70  
Lariani et al. [7] reported the experimental results of temperatures 71  
and velocity in a big heated room at 20 °C and cooled by ventila- 72  
tion at 16 °C. The measurements were used conjugated with the 73  
corresponding numerical predictions, using the RNG  $k-\epsilon$  model. 74  
The results showed that the temperature distribution is 3D and 75  
that there is an elevated gradient from the floor. 76

Rahman et al. [8] analyzed several configurations of air inlet 77  
and outlet, varying the governing parameters. It was found that 78  
with the increase of Reynolds and Richardson numbers, the con- 79  
vective heat transfer predominates over the conduction, and the 80  
heat transfer speed depends on the position of the entrance. Costa 81  
et al. [9] studied a bidimensional cavity to discuss the influence of 82  
the proportional scale of the room, the air inlet, the wall tempera- 83  
ture, the relation heating/ventilation, and the maximum speed of 84  
the return flow. 85

86 **1.2 Studies With Experimental Results of Heat Transfer**  
87 **in Cavities With Mixed Convection.** Haslavsky et al. [10] made 88  
experiments of the interactive phenomenon in natural ventilation 89  
with induced buoyancy in a real-scale cavity with inlets at the top 90  
and bottom of the side walls. The experiments showed that the 91  
displacement and mixed model interacted through the new com- 92  
bined ventilation model. Tanny et al. [11] studied experimentally 93  
the effect of the ventilation mode in the quality of air flow through

AQ5

Contributed by the Heat Transfer Division of ASME for publication in the JOURNAL OF HEAT TRANSFER. Manuscript received February 22, 2019; final manuscript received February 17, 2020; published online xx xx, xxxx. Assoc. Editor: Suresh K. Aggarwal.



International Journal of Modern Physics C  
(2020) 2050065 (26 pages)  
© World Scientific Publishing Company  
DOI: 10.1142/S0129183120500655



## Computational fluid dynamics and experimental study of turbulent natural convection with surface thermal radiation in a cubic enclosure

J. M. A. Navarro, J. F. Hinojosa\* and I. Hernández-López

*Department of Chemical Engineering and  
Metallurgy, Universidad de Sonora  
Blvd. Encinas y Rosales S/N. Col. Centro.  
Hermosillo, Sonora, CP. 83000, México  
\*fhinojosa@iq.uson.mx*

Received 15 October 2019

Accepted 20 January 2020

Published

This paper reports a computational fluid dynamics and experimental study to analyze the effect of surface thermal radiation on the turbulent natural convection in a closed cubic cavity. Experimental and numerical results are compared for low and high wall emissivities. Experimental temperature profiles were obtained at six different depths and heights consisting of 14 thermocouples each. Several turbulence models were evaluated against experimental data. It was found that renormalized  $k-\epsilon_t$  and standard  $k-\omega$  turbulence models present the best agreement with the experimental data for emissivities of walls of 0.98 and 0.03, respectively. Thus, the numerical results of temperature fields and flow patterns were obtained with these models. From the results, it was found that the effect of thermal radiation on experimental heat transfer coefficients is significantly increased between 48.7% ( $Ra = 4.06 \times 10^{11}$ ) and 50.16% ( $Ra = 1.85 \times 10^{11}$ ), when the emissivity of the walls increases from 0.03 to 0.98. Therefore, the radiative exchange should not be neglected in heat transfer calculations in cubic enclosures, even if the temperature difference between heated wall and cold wall is relatively small (between 15 and 30 K).

*Keywords:* Cavity; thermal radiation; natural convection; turbulence models.

PACS Nos.: 44.25.+f, 44.40.+a.

### 1. Introduction

Turbulent heat transfer in closed cavities has been widely studied because it has many engineering applications such as rooms and offices, cooling devices for electronic instruments, solar energy collectors, etc.<sup>1</sup> However, the influence of thermal radiation in heat transfer and air circulation inside closed cavities is an aspect that has not been thoroughly studied yet. Therefore, it is commonly neglected in

\*Corresponding author.