

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Mecánica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Evaluación Pseudo-Transitoria del Block para Techos en la
República Mexicana**

presentada por
Ing. Jonathan Ernesto Cisneros Carreño

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Director de tesis
Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor

Codirectora de tesis
Dra. Gabriela del Socorro Álvarez García



Cuernavaca, Mor., 05/septiembre/2016

OFICIO No. DIM/259/2016

Asunto: Aceptación de documento de tesis

C. DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Ing. Jonathan Ernesto Cisneros Carreño, con número de control M14CE043, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "Evaluación pseudo-transitoria del block para techos en la República Mexicana" y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

DR. JESÚS PERFECTO XAMÁN VILLASEÑOR
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica
4672156

REVISOR 1

DR. YVONNE CHÁVEZ CHENA
Doctora en Ciencias en Ingeniería Mecánica
7492003

REVISOR 2

DR. EFRAÍN SIMÁ MOO
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica
6601954

REVISOR 3

DR. JESÚS ARCE LANDA
Doctor en Ingeniería
6170951

C.p. (Lic. Guadalupe Garrido Rivera).- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Estudiante
Expediente

Iniciales AAP/mrsr

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Mor. 6 de septiembre de 2016
OFICIO No. SAC/284/2016

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ING. JONATHAN ERNESTO CISNEROS CARREÑO
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Evaluación Pseudo-Transitoria del Block para Techos en la República Mexicana”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO”

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



SEP TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo:

A mi familia: A mis padres **Rebeca y a Rafael**, y a mis hermanos **Ash y Kevin** por todo el apoyo incondicional que me han brindado en mi desarrollo profesional y personal. Mama, me has enseñado que no importa el reto, nunca será demasiado grande para la persona que se lo propone. Rafa, sin importar cuál sea el motivo o razón siempre ha estado con nosotros, en las buenas y en las malas apoyando cada decisión que ha tomado mi familia. A mis hermanos por esos ratos de alegría y juegos que ayudan a desestresarse a cualquiera, y que este trabajo les sirva de motivación para lograr cualquier sueño que se propongan.

A mi novia **Sendy**, por tu apoyo y por todos los sueños que juntos hemos creado que me han servido de motivación para juntos llegar cada vez más alto, porque siempre has estado cuando te he necesitado, cuando todo el mundo se derrumba siempre has estado para ayudarme a levantar diciendo *“tu puedes, yo creo en ti”*, y yo siempre estaré para ti para seguirte apoyando y motivando, porque recuerda *“tú eres tu propio límite”*.

"Nunca dejes que nadie te diga que no puedes hacer algo. Ni siquiera yo, ¿vale? Si tienes un sueño, tienes que protegerlo. Las personas que no son capaces de hacer algo te dirán que tú tampoco puedes. Si quieres algo ve por ello y punto"

AGRADECIMIENTOS

A ***Mi Familia*** por su apoyo y lecciones de vida a lo largo de todos estos años, por enseñarme a buscar y alcanzar cualquier meta sin importar cual fuese.

A mi novia ***Sendy***, por estar siempre en los mejores y peores momentos, por siempre tener las palabras precisas cuando he necesitado una palabra de aliento.

Al ***Dr. Jesús P. Xáman Villaseñor*** por permitirme formar parte de su equipo, que más que equipo es una familia. Por todo el tiempo, paciencia y dedicación para mi formación académica y personal.

A la ***Dra. Gabriela del Socorro Álvarez G.*** por su valiosa ayuda en el desarrollo de este trabajo, pero sobre todo por ser una gran inspiración tanto para mí como para mis compañeros, una persona digna de admiración.

Al comité revisor: ***Dra. Yvonne Chávez C.*** por toda su atención y apoyo incondicional brindado en todo momento, al ***Dr. Efraín Simá M.*** y al ***Dr. Jesús Arce L.*** por su tiempo, comentarios y sugerencias a lo largo de todo el desarrollo del trabajo de tesis.

Al ***Dr. Irving O. Hernandez L.*** por todas sus enseñanzas y conocimientos compartidos, a la ***Dra. Ivett Zavala G.*** por su apoyo en el desarrollo del código, a la ***M.C. Yessenia Olazo G.*** y a toda la ***Familia del Laboratorio de Simulación Numérica*** que fueron clave importante para este trabajo de tesis.

Al ***Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET)***, por darme la oportunidad de desarrollarme y formarme académicamente en esta institución

Al ***Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)*** y a la ***Dirección General de Educación Superior Tecnológica (DGEST)*** por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de maestría.

INDICE

CAPÍTULO I	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	7
1.3 CONCLUSION DE LA REVISION BIBLIOGRAFICA	16
1.4 OBJETIVO	17
1.5 ALCANCE	17
1.6 ESCRITURA DE LA TESIS.....	18
CAPÍTULO II.....	20
2.1 MODELO FÍSICO DEL BLOCK HUECO	21
2.1.1 Modelo Físico de un Block Hueco con Loza (B - L).....	24
2.1.2 Modelo Físico de un Block Hueco con Loza y Película Reflectiva (B - L - B / W).....	25
2.1.3 Modelo Físico de un Block Hueco con Aislamiento Térmico y Loza (B - A - L).....	26
2.1.4 Modelo Físico de un Block Hueco con Aislamiento Térmico, Loza y Película Reflectiva (B - A - L - B / W)	27
2.2 CONSIDERACIONES.....	28
2.3 MODELO MATEMÁTICO DEL BLOCK HUECO.....	29
CAPÍTULO III.....	32
3.1 MÉTODOS NUMÉRICOS	33
3.2 MÉTODO DE VOLUMEN FINITO.....	34
3.3 GENERACIÓN DE MALLA.....	34
3.4 ECUACIÓN GENERAL CONVECCIÓN-DIFUSIÓN.....	35
3.5 DISCRETIZACIÓN DE LA ECUACIÓN GENERALIZADA DE CONVECCIÓN-DIFUSIÓN	36
3.5.1 Esquemas de Aproximación Numérica.....	44
3.6 ALGORITMOS DE ACOUPLE: SIMPLE Y SIMPLEC.....	46
3.6.1 Malla Desplazada o Escalonada (Staggered Grid).....	47
3.6.2 Gradiente de Presión	48
3.6.3 Secuencia de operación del algoritmo SIMPLE y SIMPLEC.....	49
3.7 CONDICIONES DE FRONTERA.....	60
3.7.1 Condición de Dirichlet (Condición de Primera Clase).....	60

3.7.2	Condición de Neuman (Condición de Segunda Clase)	61
3.7.3	Condición de Robín (Condición de Tercera Clase)	62
3.7.4	Condiciones de Frontera para la ecuación de la Presión Corregida	63
3.8	MÉTODO DE SOLUCIÓN DE ECUACIONES ALGEBRAICAS	64
3.9	CRITERIO DE CONVERGENCIA	66
3.10	VERIFICACIÓN DEL CÓDIGO	67
3.10.1	Problema de Cavidad con Pared Deslizante	68
3.10.2	Convección Natural en una Cavidad Cuadrada Calentada Diferencialmente	72
3.10.3	Cavidad Calentada Diferencialmente con Solido Conductor Embebido	79
3.10.4	Cavidad Calentada Diferencialmente con Paredes Gruesas Conductoras	82
3.11	ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA	84
3.11.1	Block con Dos Huecos	84
3.11.2	Block con Tres Huecos	87
CAPITULO IV		91
4.1	PARAMETROS DE ESTUDIO	92
4.2	COMPORTAMIENTO TERMICO DEL BLOCK CON DOS HUECOS	95
4.2.1	Día Frío	95
4.2.1.1	Temperatura	95
4.2.1.2	Fluxes de Calor	100
4.2.2	Día Caliente	104
4.2.2.1	Temperatura	104
4.2.2.2	Fluxes de Calor	109
4.3	COMPORTAMIENTO TERMICO DEL BLOCK CON TRES HUECOS	113
4.3.1	Día Frío	113
4.3.1.1	Temperatura	113
4.3.1.2	Fluxes de Calor	118
4.3.2	Día Caliente	122
4.3.2.1	Temperatura	122
4.3.2.2	Fluxes de Calor	127
4.4	RESUMEN COMPARATIVO DE TODAS LAS CONFIGURACIONES	130

4.4.1 Block de Dos Huecos.....	131
4.4.2 Block de Tres Huecos	132
CAPITULO V.....	136
5.1 CONCLUSIONES.....	137
5.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	138
Referencias.....	140

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Equivalencias de la Ecuación General.....	36
Tabla 3.2. Función A (IPe).....	46
Tabla 3.3. Resultados para un Ra = 103	77
Tabla 3.4. Resultados para un Ra = 104	78
Tabla 3.5. Resultados para un Ra = 105	78
Tabla 3.6. Resultados para un Ra = 106	78
Tabla 3.7. Comparación del Nussel Promedio en la Pared Caliente de la Cavidad Calentada Diferencialmente con un Sólido Embebido Conductor.....	81
Tabla 3.8. Comparación de la Razón de Transferencia de Calor Para Distintos Rayleigh de la Cavidad Calentada Diferencialmente con Paredes Gruesas Conductoras.....	83
Tabla 3.9. Análisis de Independencia de Malla para el Block de Dos Huecos.....	87
Tabla 3.10. Análisis de Independencia de Malla para el Block de Tres Huecos.....	89
Tabla 4.1. Propiedades Físicas de los Materiales	92
Tabla 4.2. Propiedades de Películas Reflectivas.....	92
Tabla 4.3. Condiciones Climáticas en Hermosillo, Sonora (2014).....	93
Tabla 4.4. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas Promedio al Interior del Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Frío	96
Tabla 4.5. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas Promedio al Interior del Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Frío	98
Tabla 4.6. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor al Interior de un Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Frío.....	101
Tabla 4.7. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor Promedio al Interior de un Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Frío	102
Tabla 4.8. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas al Interior de un Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Caliente	105
Tabla 4.9. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas al Interior de un Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Caliente.....	106
Tabla 4.10. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor Promedio al Interior de un Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Caliente.....	110

Tabla 4.11. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor Promedio al Interior de un Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Caliente.....	112
Tabla 4.12. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas Promedio al Interior de un Block de Tres Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Frío	115
Tabla 4.13. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas Promedio al Interior de un Block de Tres Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Frío	116
Tabla 4.14. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor Promedio al Interior de un Block de Tres Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Frío	120
Tabla 4.15. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor Promedio al Interior de un Block de tres Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Frío	121
Tabla 4.16. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas Promedio al Interior de un Block de Tres Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Caliente.....	123
Tabla 4.17. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas Promedio al Interior de un Block de Tres Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Caliente.....	125
Tabla 4.18. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor al Interior de un Block de Tres Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Caliente.....	128
Tabla 4.19. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor Promedio al Interior de un Block de Tres Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Caliente.....	129
Tabla 4.20. Flux de Calor Promedio para las Configuraciones de un Block de Dos Huecos.....	134
Tabla 4.21. Flux de Calor Promedio para las Configuraciones de un Block de Tres Huecos.....	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Distribución de la Radiación Solar.....	4
Figura 2.1. Climas de la República Mexicana, INEGI (2010).....	22
Figura 2.2. Modelo Físico de una Casa con Techo de Block Hueco	24
Figura 2.3 Dimensiones del Block para el Estudio.....	24
Figura 2.4. Block Hueco con Loza	25
Figura 2.5. Block Hueco con Loza y Película Reflectiva.....	26
Figura 2.6. Block Hueco con Aislamiento Térmico y Loza	27
Figura 2.7. Block Hueco con Aislamiento, Loza y Película Reflectiva	28
Figura 3.1. Distribución Volumen Finito.....	35
Figura 3.2. Volumen de Control para un Nodo	37
Figura 3.3. Representación de la Malla Desplazada	48
Figura 3.4. Malla Principal en 1D.....	48
Figura 3.5. Malla Principal (●), Malla Desplazada en Dirección x (□) y Malla Desplazada en Dirección y (Δ)	51
Figura 3.6. Algoritmo SIMPLEC.....	59
Figura 3.7. Volumen de Control 1D para la Velocidad Normal a la Frontera.....	64
Figura 3.8. a) Problema de Cavity Cuadrada con Pared Deslizante, b) Convección Natural en una Cavity Cuadrada Calentada Diferencialmente, c) Cavity Calentada Diferencialmente con Sólido Conductor Embebido y d) Cavity Calentada Diferencialmente con Fluido Embebido.	67
Figura 3.9. Modelo Físico del Problema de Cavity con Pared Deslizante.....	68
Figura 3.10. Componentes de Velocidad para un $Re=100$ y 61×61 nodos.....	70
Figura 3.11. Componentes de Velocidad para un $Re=400$ y 121×121 nodos.....	70
Figura 3.12. Componentes de Velocidad para un $Re=1000$ y 129×129 nodos.....	71
Figura 3.13. Modelo Físico de la Cavity Calentada Diferencialmente	73
Figura 3.14. Mapa de Isotermas para un $Ra=10^3$	75
Figura 3.15. Mapa de Isotermas para un $Ra=10^3$	75
Figura 3.16. Mapa de Isotermas para un $Ra=10^4$	75
Figura 3.17. Mapa de Isotermas para un $Ra=10^4$	75
Figura 3.18. Mapa de Isotermas para un $Ra=10^5$	76
Figura 3.19. Mapa de Isotermas para un $Ra=10^5$	76
Figura 3.20. Mapa de Isotermas para un $Ra=10^6$	76

Figura 3.21. Mapa de Isotermas para un $Ra=10^6$	76
Figura 3.22. Cavity Calentada Diferencialmente con un Sólido Embebido Conductor	79
Figura 3.23. Mapa de isotermas de la Cavity Calentada Diferencialmente con un Sólido Embebido Conductor; (a) House et al. (1990), (b) Presente Estudio.....	80
Figura 3.24. Efecto de la razón de conductividad térmica sobre el Nusselt para $Ra=1 \times 10^5$; (a) House et al. (1990), (b) Presente Estudio	81
Figura 3.25. Cavity Calentada Diferencialmente con Paredes Gruesas Conductoras.....	82
Figura 3.26. Líneas de Corriente de la Cavity Calentada Diferencialmente con Paredes Gruesas Conductoras; (a) Zhao et al. (2007), (b) Presente Estudio	83
Figura 3.27. Representación de la Variación de Malla (Número de Nodos).....	85
Figura 3.28. Efecto del número de nodos en el block de dos huecos.	86
Figura 3.29. Efecto del número de nodos en el block de tres huecos.	88
Figura 3.30. Diagrama General de Solución.....	90
Figura 4.1. Nomenclatura de Configuraciones	94
Figura 4.2. Comportamiento de las Temperaturas Promedio al Interior del Block para un día Frío	95
Figura 4.3. Comportamiento de las Temperaturas Promedio al Exterior del Block para un día Frío	99
Figura 4.4. Comportamiento del Flujo de Calor Promedio al Interior del Block para un día Frío	100
Figura 4.5. Comportamiento de las Temperaturas Promedio al Interior del Block para un día Cálido	104
Figura 4.6. Comportamiento de las Temperaturas Promedio al Exterior del Block para un día Cálido	108
Figura 4.7. Comportamiento del Flux de Calor Promedio en la Superficie Interior del Block para un día Cálido.....	109
Figura 4.8. Comportamiento de las Temperaturas Promedio al Interior del Block para un día Frío	114
Figura 4.9. Comportamiento de las Temperaturas Promedio al Exterior del Block para un día Frío	117
Figura 4.10. Comportamiento del Flujo de Calor al Interior del Block para un día Frío	119
Figura 4.11. Comportamiento de las Temperaturas Promedio al Exterior del Block para un día Cálido	126

NOMENCLATURA

Símbolos

Latinos

a_P, a_E, a_W, a_N, a_S

b

c_P

G

HX

HY

Nu

NX

NY

P

Pe

Re

q_{rad}

q_{conv}

q_{cond}

T

T_{amb}

T_{int}

u

v

x

y

Definición

Coeficiente de la Ecuación Discretizada

Término Fuente

Calor Específico (J/kg K)

Irradiación Solar (W/m²)

Ancho de la Cavidad, (cm)

Altura de la Cavidad, (cm)

Número de Nusselt

Número de Nodos en Dirección X

Número de Nodos en Dirección Y

Presión del Fluido, N/m²

Número de Peclet

Número de Reynolds

Flujo de Calor por Radiación

Flujo de Calor por Convección

Flujo de Calor por Conducción

Temperatura, °C ó K

Temperatura Ambiente, °C ó K

Temperatura Interior, °C ó K

Velocidad en Dirección Horizontal, m/s

Velocidad en Dirección Vertical, m/s

Coordenada en Dirección Horizontal

Coordenada en Dirección Vertical

Símbolos

Griegos

α

$\delta x_e, \delta x_w$

$\delta x_n, \delta x_s$

ε

ΔT

Δx

Δy

Φ

Γ

ρ

λ

Definición

Absortancia Solar

Distancia entre nodos computacionales en dirección horizontal

Distancia entre nodos computacionales en dirección vertical

Emisividad

Gradiente de Temperaturas, °C ó K

Espesor del Volumen de Control en Dirección Horizontal

Espesor del Volumen de Control en Dirección Vertical

Variable Dependiente General (u, v, P, T)

Coefficiente Térmico Difusivo

Densidad del Aire, kg/m³

Conductividad Térmica del Aire, W/m K

RESUMEN

En este trabajo se realizó el análisis de la transferencia de calor acoplada en un block con dos y tres hueco utilizado para techos bajo condiciones de Hermosillo, Sonora con distintas configuraciones utilizando aislamiento térmico y películas reflectivas. En el estudio se consideró convección dentro de las cavidades de los huecos y conducción en las partes sólidas del block.

El objetivo de este trabajo fue estudiar y analizar el efecto térmico del block para techos en la República Mexicana. Para el análisis se consideraron las paredes verticales adiabáticas, mientras que en la pared norte (superior) se consideró transferencia de calor por convección y radiación al estar expuesta a condiciones ambientales, mientras que en la pared sur (inferior) se consideran pérdidas convectivas a temperatura constante.

Las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y de energía se resuelven numéricamente en dos dimensiones mediante la formulación generalizada del método de volumen finito (FVM), mientras que para el acople de las ecuaciones de masa y momentum se utilizó el algoritmo SIMPLEC. Las dimensiones del block son de 40x15cm, mientras que las cavidades son de 16x10cm y 10x10cm para el caso de dos y tres huecos, respectivamente. Para verificar el código numérico desarrollado se compararon los resultados obtenidos con resultados numéricos reportados en la literatura.

En general, se concluye que el código desarrollado produce resultados confiables y satisfactorios. Se obtuvieron reducciones del flujo de calor y temperatura superficial interior durante los días cálidos, lo cual demuestra la ventaja del uso de complementos como recubrimientos reflectivos y aislamiento térmico en el techo, sin embargo para los días fríos el uso de estos recubrimientos no es tan conveniente.

ABSTRACT

In this work the analysis of coupled heat transfer in a block with two and three hollow block used for roofing under weather conditions of Hermosillo, Sonora with different configurations using thermal insulation and reflective films was performed. In the study was considered convection within the cavities of the hollow block and conduction for the solid parts of the block.

The purpose of this work was to study and analyze the thermal effect of block for roofing in the Mexican Republic. For the analysis adiabatic vertical walls were considered, while in the north wall (higher) heat transfer by convection and radiation when exposed to environmental conditions, while in the south wall (bottom) are considered convective losses.

The equations of conservation for mass, momentum and energy are solved numerically in two dimensions by the generalized formulation of the Finite Volume Method (FVM), whereas for the coupling of mass and momentum equations of the SIMPLEC algorithm was used. The dimensions of the block are 40x15cm, while the cavities and 10x10cm 16x10cm are for the case of two and three holes, respectively. To check the developed numerical code, the results were compared with numerical results reported in the literature.

Overall, we conclude that the code developed produces reliable and satisfactory results. Reductions of heat flow and inner surface temperature were obtained during the warm days, which demonstrates the advantage of using supplements such as reflective coatings and thermal insulation in the roofing, however for cold days the use of these coatings is not as convenient.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

Este Capítulo presenta la trascendencia que tiene el tema tanto en aspectos económicos como ecológicos, además de la revisión bibliográfica realizada respecto al presente proyecto de investigación.

La parte final del Capítulo contiene los objetivos por los cuáles se pretende realizar este trabajo, así como el alcance esperado al concluir el mismo.

1.1 INTRODUCCIÓN

Desde el descubrimiento del fuego, el hombre ha marcado la diferencia con respecto a los demás seres vivos, significando la clave en el descubrimiento de la energía y en el desarrollo de la humanidad a como hasta ahora la conocemos.

Junto con la evolución del hombre se fueron buscando otras formas de energía, así en el siglo XI aproximadamente, en Inglaterra se descubrió que el carbón podía arder, y comenzó a explotarse para utilizarse en máquinas de vapor, esto a pesar que ya se utilizaba en Roma y China pero solamente como fuente de calor. Así fue como el carbón se comenzó a utilizar como combustible y que tiempo más tarde se convertiría en uno de los principales protagonistas de la Revolución Industrial, sin embargo ante la demanda de combustible durante la misma, se desencadenó una búsqueda de nuevos combustibles, así como un aceite bueno y barato para las lámparas, descubriéndose así el petróleo.

Todo el desarrollo industrial en los últimos 170 años ha ayudado al desarrollo de la sociedad, sin embargo, también ha significado contradictorio en cuanto a la contaminación del medio ambiente, es por esta razón que cuando el ser humano hace conciencia del daño incalculable que ha provocado la necesidad por su comodidad intenta disminuir el impacto negativo recurriendo a nuevos tipos de energías “Energías Alternas”. Aunque las energías alternas ya se utilizaban incluso desde los romanos como molinos de viento, molinos de agua, navegación a vela, etc., el progreso de las mismas se vio detenida con las máquinas de vapor.

Fue así que a mediados de los '70 se comenzó a enfatizar el concepto de Energía Renovable o Sustentable, como una alternativa a las fuentes energéticas utilizadas, y más aún con la predicción del agotamiento de los recursos petrolíferos.

Gracias al continuo desarrollo de las Energías Renovables y el actual avance tecnológico, el uso de las Energías Renovables no solo es una alternativa, sino que es un proyecto viable, que brinda un presente productivo, y que apunta a un mejor futuro, con fuentes inagotables de recursos.

La energía sustentable, o también conocida como energía renovable, se enfoca en disminuir el impacto negativo que tenemos los seres humanos sobre la naturaleza al obtener energía de fuentes contaminantes y agotables. Este tipo de energía, en contraste a la no renovable, se obtiene de fuentes naturales inagotables como el aire, el agua y el sol, entre otras.

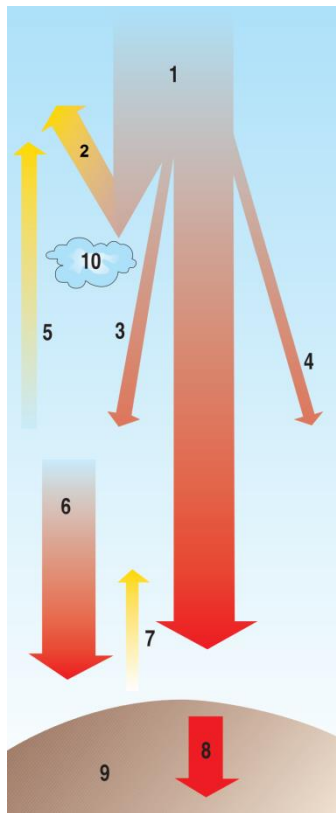
Las energías sustentables existen en diferentes tipos, y se dividen en dos grandes categorías: limpia o no contaminante y contaminante.

- Energías sustentables limpias o no contaminantes
 - Energía Solar
 - Energía Eólica
 - Energía Hidráulica
 - Energía Mareomotriz
 - Energía Geotérmica
 - Energía Nuclear

- Energías sustentables contaminantes
 - Biomasa
 - Desechos Urbanos

Particularmente la energía solar es la energía producida por el sol y que es convertida en energía útil por el ser humano, ya sea para calentar o enfriar (energía térmica) o para producir electricidad (energía fototérmica), como sus principales aplicaciones. La energía producida por el sol es 4mil veces más que la que consumimos, por lo que su potencial es prácticamente ilimitado.

El sol constituye una fuente de energía permanente. Esta energía del astro solar llega a la tierra en forma de radiación. Sin embargo, del total de la energía (Figura 1.1) que llega a la tierra procedente del sol, solo un 51% aproximadamente incide directamente a través de la atmósfera.



1. Radiación solar (100%)
2. Reflexión de las nubes (30%)
3. Dispersión difusa (7%)
4. Absorción atmosférica (14%)
5. Dispersión difusa que reflejan los gases
6. Radiación celeste
7. Reflexión de la tierra (4%)
8. Radiación total que llega a la tierra (51%)
9. Superficie terrestre
10. Nubes

Figura 1.1. Distribución de la Radiación Solar

Esta radiación es percibida en forma de luz. La luz no es más que una corriente de fotones que se han generado al producirse reacciones nucleares en el sol, y que llegan agrupados a la tierra en forma de haces de luz. Sólo una parte de ese haz de luz es captado por el ojo humano, en una

gama de color (espectro electromagnético) que va del rojo al violeta. Sin embargo el haz se extiende hasta el color ultravioleta e infrarrojo.

Se pronostica que el desarrollo de tecnologías solares limpias, baratas e inagotables supondrá un enorme beneficio a largo plazo en el mundo. Aumentará la seguridad energética de los países mediante el uso de una fuente de energía local, inagotable y, aún más importante, independiente de importaciones, además de que aumentará la sostenibilidad, reducirá la contaminación, disminuirán los costes de la mitigación del cambio climático y evitará la subida excesiva de los precios de los combustibles fósiles.

Las diferentes tecnologías solares se pueden clasificar en pasivas o activas según cómo captura, convierte y distribuye la energía solar. Las tecnologías activas incluyen el uso de paneles fotovoltaicos y colectores solares térmicos, entre otros dispositivos, para recolectar la energía y convertirla en una energía específica, así parte de la radiación electromagnética del sol se transforma en energía mediante la reacción que determinados materiales tienen al ser excitados por un fotón luminoso. Mientras que en las pasivas se capta la energía del sol de forma directa, sin ningún tipo de mecanismo o dispositivo, ni su transformación previa, estos sistemas utilizan materiales, así como diferentes técnicas enmarcadas en la arquitectura bioclimática como: la orientación de los edificios con respecto a la incidencia de la radiación solar, la selección de materiales con una masa térmica favorable o que tengan propiedades para dispersar la luz, así como el diseño de espacios mediante ventilación natural.

La tecnología solar pasiva es el conjunto de técnicas dirigidas al aprovechamiento de la energía solar de forma directa, sin transformarla en otro tipo de energía, para su utilización inmediata o para su almacenamiento sin la necesidad de sistemas mecánicos ni aporte externo de energía, aunque puede ser complementada por ellos, por ejemplo para su regulación. La tecnología solar pasiva incluye sistemas de ganancia directa e indirecta para el calentamiento de espacios, sistemas de calentamiento basados en termosifón, uso de masa térmica y materiales con cambio

de fase para suavizar las oscilaciones de la temperatura del aire y brindar un mejor confort térmico, como las cocinas solares, chimeneas solares, etc.

La arquitectura bioclimática es la aplicación del principio de tecnología solar pasiva al diseño de edificaciones, consiste en el diseño de edificios teniendo en cuenta las condiciones climáticas, aprovechando los recursos disponibles (sol, vegetación, lluvia, vientos) para disminuir los impactos ambientales, intentando así reducir el consumo de energía. En la arquitectura bioclimática, la energía no se aprovecha por medio de captadores industrializados, sino que son los propios elementos constructivos los que optimizan la energía.

Un concepto utilizado en la arquitectura bioclimática y el cual es uno de los principales objetivos de la misma es el confort térmico, el cual representa el estado en el que una persona se encuentra en equilibrio fisiológico dado que no existe un malestar térmico. A su vez es un concepto utilizado en el diseño bioclimático como parámetro de control de las condiciones de habitabilidad tanto en espacios interiores como en exteriores.

Otra forma de proporcionar confort térmico en el diseño bioclimático es utilizando aislamiento térmico, ya sea por medio de muros más gruesos para retardar el flujo de calor a través de estos o incluso techos de blocks huecos. Los blocks huecos proporcionan aislamiento debido a que cuentan con un espacio de aire dentro de ellos que ayuda a disipar el calor.

En el presente trabajo se estudiará y analizará el efecto térmico del block para techos con recubrimiento como aislante térmico en distintos climas de la república mexicana. A continuación se presentan las fichas técnicas de la revisión de la literatura que se consultó.

1.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se inició una revisión bibliográfica sobre estudios relacionados con transferencia de calor a través de blocks con cavidades para su uso en habitaciones o edificaciones, a continuación se presentan los resúmenes de los artículos analizados.

Abdou y Murali (1994), desarrollaron un programa computacional para investigar el comportamiento térmico de paredes construidas de concreto ensamblado, donde se consideró la contribución de los efectos térmicos de las celdas de aire en el interior, así como juntas de mortero. Se utilizaron tres muestras; la primera constituye una pared construida de concreto hueco a escala completa de 4ft x 4ft, montada en hiladas horizontales apiladas con tres blocks en cada hilada, esta primera pared se utiliza para comparar con las otras paredes. En la segunda pared la junta de mortero se elimina y se reemplaza por adhesivo. En la tercera se eliminan las celdas de aire. Las resistencias térmicas de las paredes se determinan midiendo las diferencias del flujo de calor y la temperatura bajo condiciones de estado permanente. La resistencia térmica de la pared sólida fue aproximadamente 25% menos que la pared hueca, pero solamente 18% menor que la pared sin juntas de mortero. Las juntas de mortero y las celdas de aire contribuyen positivamente con la integridad térmica de las paredes construidas con concreto. Al comparar las paredes con y sin juntas de mortero, la resistencia térmica (R) incrementa un $\approx 8\%$, mientras que las celdas de aire contenidas dentro del block de concreto incrementa el valor de R en un 25%.

Vasile et al. (1998), estudiaron el comportamiento higrotérmico de ladrillos huecos verticales en relación con la humedad relativa de los alrededores. Se consideró un ladrillo vertical hueco y otro con doble hueco de 25cm de altura con ancho de 8.8cm y un espesor de aire al interior de 5.5cm, a tres temperaturas diferentes. Se utilizó el código numérico 2D (HYGRO) para calcular el transporte a través de la parte sólida, utilizando dos coeficientes de transferencia de calor para la cavidad, uno para la transferencia de calor y otro para la transferencia de masa (vapor). Se realizó un estudio experimental para poder obtener los coeficientes de transferencia de calor en la superficie de la cavidad. Se encontró que el flujo de calor a través del ladrillo hueco aumenta con la diferencia de presión de vapor. En el ladrillo con doble hueco el flujo de calor es afectado por

el nivel de vapor dentro del ladrillo hueco. Los cálculos iniciales muestran una alta sensibilidad del flujo de calor a través de ladrillos huecos respecto al nivel de humedad de los alrededores y en consecuencia de los materiales.

Al-Hazmy (2005), estudió la transferencia de calor considerando la convección y conducción a través de ladrillos de construcción huecos, para evaluar la configuración adecuada de aislamiento del ladrillo a temperaturas de Arabia Saudita. Se consideraron tres diferentes configuraciones para el ladrillo de construcción. En la primera configuración se considera un ladrillo completamente sólido sin huecos. La segunda configuración representa el caso extremo en el que se desvanece la parte sólida del material quedando tres huecos en su interior. Mientras que en el tercer caso los huecos se llenan parcialmente con material aislante de poliestireno. Considerando la aproximación de Buossinesq se resuelven las ecuaciones gobernantes de masa, momentum y energía mediante el software de CFD FLUENT. Entre los resultados, al comparar el tercer caso con respecto al primero y al segundo, se reduce la velocidad de transferencia de calor en 26 y 6% respectivamente. El efecto intercelular de la convección natural demuestra ser un efecto significativo que no puede ser ignorado cuando se considera la resistencia térmica de estructuras de construcción huecas. Para la modelación de un día caluroso típico de verano, el uso de barras sólidas de poliestireno reduce la transferencia de calor en 25%.

Vijaykumar et al. (2007), compararon mediante un estudio numérico el comportamiento de techos con distintas composiciones. Se analizaron cuatro techos diferentes uno con un espesor de 150mm de concreto reforzado (RCC); el segundo con 150mm de RCC y una cubierta de 75mm de espesor de aislamiento (techo convencional); el tercero con 150mm de RCC con 75mm de teja de barro hueca con los huecos bloqueados al final; el cuarto con las mismas condiciones que el tercero, pero las cavidades abiertas. Las estructuras del techo se modelaron y resolvieron utilizando el módulo térmico de Análisis de Elemento Finito del Software ANSYS. Debido a que el aire remueve el calor, la menor distribución de temperatura se observa en el cuarto techo. Cuando se compara el techo convencional (techo 2) con respecto al 3 y al 4 se observa una reducción de calor entrante de 38 y 63% respectivamente. El techo 4 es la mejor elección de combinación para climas de verano tropical.

Li et al. (2008), desarrollaron un código numérico 3D para encontrar la configuración óptima del número de huecos y su arreglo para un block de 290 x 140 x 90 en la cual se tiene la menor conductividad térmica mediante la técnica de volumen finito. Se evaluaron 72 configuraciones con diferente número y arreglo de los huecos prediciendo numéricamente su conductividad térmica. Se consideró la transferencia de calor por convección y radiación dentro de los huecos, por conducción de la superficie interior del sólido a la exterior y, por convección y radiación de la superficie exterior al medio ambiente, simulando temperatura y velocidad del aire. La radiación en la superficie de los huecos hace que la conductividad térmica equivalente aumente con un incremento máximo de 25.8% para un block de dos huecos y un incremento mínimo de 4.6% para un block de 14 huecos. La configuración óptima es de ocho huecos en lo largo y cuatro en lo ancho con una conductividad térmica de 0.400W/ (mK).

Baig y Antar (2008), realizaron un estudio numérico para calcular la pérdida de calor (valor de R) en un block con huecos para diferente número de huecos llenados con aire y distintos diseños de cavidades. Se utilizaron 5 distintas configuraciones, variando la posición de los huecos, distancia, tamaño y razón de aspecto entre ellos. El valor de R del caso 1 (modelo base) es de 0.47 K m² / W, al compararlo con el caso 2 se observa un decremento en la transferencia de calor del 13.5% y de 17.65% con respecto al caso 3. Incrementar el número de cavidades es efectivo para reducir el flujo de calor sin comprometer su resistencia estructural. Debido a que los diseños no son reportados en la literatura abierta, los resultados numéricos son validados calculando el número de Nusselt utilizando los diseños de otros investigadores. Disminuyendo el espesor del material sólido, decrece el puente térmico y se evita pérdidas por conducción innecesarias, además utilizando huecos de una alta razón de aspecto (caso 3 contra caso 2) y menor ancho provoca una disminución de la transferencia de calor por convección.

Antar y Baig (2009), realizaron un análisis numérico de transferencia de calor conjugada (conducción-convección) para evaluar los parámetros que incrementan la resistencia térmica (R)

en un block con huecos. Se consideraron distintas configuraciones de los huecos, variando su ancho, propiedades del fluido, así como la diferencia de temperatura entre las superficies del block, manteniendo constante el ancho del block. Incrementando el número de cavidades de uno a dos, y después a tres resultó un decremento de la máxima velocidad del aire dentro de la cavidad de 30.34% y 40.46%, y la resistencia térmica incrementa 21.1% y 28.3% respectivamente; al incrementar el número de cavidades de cuatro a cinco y de cinco a seis se observa un incremento del valor de R de 3.18% y 2.25%, respectivamente. Un máximo de seis cavidades no compromete su resistencia estructural, decrece la pérdida de calor (incrementa el valor de R) significativamente y con este número de cavidades no es necesario rellenar los huecos con aislante como resultado de la reducción de la convección natural.

Del Coz Díaz et al (2009), realizaron un análisis térmico numérico en 2D para optimizar el diseño de blocks huecos de concreto ligero para pisos internos. Se evaluaron sesenta blocks, treinta considerando el flujo de calor hacía arriba y treinta hacía abajo; en cada caso, cinco distintos materiales de concreto ligero con seis configuraciones del número de cavidades en dirección vertical y horizontal con dimensiones de 0.57m x 0.25m x 0.20m. El estudio se llevó a cabo mediante el método de elemento finito buscando validar una relación entre la densidad del concreto ligero y su conductividad térmica realizada previamente en pruebas de laboratorio. El mejor block desde el punto de vista térmico es el block etiquetado como F3, dado que su valor promedio es el mejor (0.34% y 0.44% para flujos de calor hacía arriba y abajo, respectivamente); por otro lado, desde el punto de vista de resistencia térmica (R) los mejores blocks son el F3 y el F6 con pequeñas diferencias entre ellos. Variando la longitud y ancho de los huecos, es posible modificar el comportamiento térmico de los blocks y subsecuentemente de todo el piso.

Vivancos et al (2009), determinaron experimentalmente la resistencia térmica en distintos tipos de blocks utilizando el método de “guarded hot-plate”. Se analizaron 7 tipos blocks comerciales: sólido (SFB), de panal (HCB, HPFB, HPB) y perforados (VPB14, VPB19, HHB) para medir el flujo de calor en función del tiempo. Las mediciones se realizaron con un aparato diseñado para establecer el flujo de calor unidireccional a través de un par de especímenes en estado permanente. Para el block SFB se determinó una resistencia térmica (R_B) de 0.148 Km^2/W ,

mientras que para el HPB fue de $R_B = 0.290 \text{ Km}^2/\text{W}$ y para el VPB19 de $R_B = 0.642 \text{ Km}^2/\text{W}$. El modelo permitió la determinación de R_B , el flujo de calor (q) y el tiempo necesario para alcanzar la mitad de q (t_B).

Zukowski y Hease (2010), realizaron un estudio numérico-experimental para estudiar blocks huecos llenados con perlita como aislante. Se analizó un block de 24.8cm x 30 cm con 12 huecos rectangulares. El estudio se realizó mediante un aparato experimental para obtener el calor específico, conductividad térmica y densidad del block para tres distintas temperaturas, evaluado en intervalos de 60s; posteriormente con la información obtenida del estudio experimental se simuló en el software Fluent. Los resultados obtenidos del modelo experimental y el modelo numérico son similares con diferencias relativamente pequeñas de menos de 0.5°C ; al comparar el valor de la conductividad térmica del block sólido (0.410 W/mK) con el block con perlita (0.046 W/mK) se observaron mejores resultados. Se obtuvieron datos básicos para poder simular el block hueco llenado con perlita como aislante, el block llenado con perlita es hasta 50% más ligero que el block sólido.

Morales et al (2011), realizaron un estudio numérico para mejorar la distribución geométrica de los huecos de blocks de Termocilla ® ECO 29, buscando obtener una menor conductividad térmica. Se analizaron cuatro distintas alternativas de huecos en el block, siempre conservando las dimensiones del block de 286mm x 250mm. El estudio se realizó mediante la técnica de elemento finito para obtener el coeficiente global de transferencia de calor en cada caso, siempre mejorando uno del otro. El mejor modelo tiene 25 filas de romboides de huecos con una mejora del 16% en comparación con el block original ECO 29. Sin huecos rectangulares el flujo de calor atraviesa un mayor número de huecos, aumentando su resistencia térmica y por consiguiente reduciendo su conductividad térmica.

Oluwole et al (2012), realizaron un análisis numérico en 2D con Matlab para estudiar la transferencia de calor por conducción a través de blocks convencionales y de ensamble con distinto número de cavidades. El estudio consideró el número de cavidades, arreglos regulares y

escalonados de las mismas. Se simuló durante ocho horas con una temperatura de 40°C en un costado del block para simular el exterior de una habitación, y una temperatura interior inicial (otro costado del block) de 25°C. Considerando un block totalmente sólido después del tiempo de simulación alcanza los 40°C en su interior; para el caso de dos cavidades se llegó a una temperatura de 26.22°C y 26.88°C en un block convencional y de ensamble respectivamente; con cuatro cavidades se alcanzó 25.43°C y 25.3°C respectivamente; para el caso de ocho cavidades no existió un cambio significativo en ninguno de los blocks con respecto a cuatro cavidades. Para el caso de los blocks de ensamble se observó que un arreglo escalonado disminuye el flujo de calor dentro del block de manera significativa.

Kus et al. (2013), realizaron un estudio experimental del comportamiento higrotérmico de paredes de block con cavidad de concreto agregado de piedra pómez (PAC). Las pruebas se realizaron utilizando dos paredes de 19x120x240cm de diferentes blocks PAC con tres filas de huecos, con dos blocks de 185x390x190mm y 185x330x240mm (ancho x largo x alto). El estudio se realizó con el método de hot box, midiendo humedad con sensores colocados dentro de las cavidades del block PAC y termopares en ambas caras de los huecos bajo condiciones controladas de interior y exterior del hot box calibrado. Los resultados indican que las cavidades de los blocks tienen un mejor comportamiento en términos de transmitancia térmica que sus partes sólidas. La estructura porosa y otras características como la rugosidad, el número de cavidades, el tamaño de las cavidades y el arreglo de las cavidades, entre otras, juegan un rol importante en el comportamiento higrotérmico.

Sharma et al. (2013), realizaron un estudio numérico para comparar los enfoques 1-D y 2-D en la predicción de la transferencia de calor en una loza compuesta con un material aislante insertado dentro de la loza sólida con distinta geometría (cuadrado, diamante, hexágono 1, hexágono 2, círculo). La parte inferior de la cara de la loza se simula como disipador de calor isotérmico, la parte superior se mantiene a alta temperatura, la parte derecha e izquierda se encuentran aisladas. El análisis unidimensional se realizó usando la ley de Fourier, mientras que para el análisis bidimensional se utilizó el software Fluent 6.3. Del análisis bidimensional se observa que la velocidad de transferencia de calor decrece cuando se incrementa la fracción de

volumen del material insertado, lo cual corrobora el análisis 1-D; además que la forma de diamante ofrece la máxima resistencia térmica. El estudio brindó conocimiento acerca de la región de aplicación de la solución analítica 1-D con respecto a la solución convencional 2-D, esto es mientras la fracción del volumen del material insertado permanezca por debajo del 20% para una forma hexagonal o circular insertada.

Zhang et al. (2014), analizaron la influencia del comportamiento térmico de la pared de blocks con cavidades producido por las condiciones de frontera, las propiedades termofísicas de los materiales del block y la configuración de las cavidades del block, considerando además la resistencia térmica del material, el factor de decremento y el tiempo de retraso. Se utilizaron blocks de concreto ligero con cavidades, de medidas 390mm x 190mm x 190mm. Se midieron las temperaturas en las dos superficies de la pared mediante termopares. Todos los materiales se consideraron térmicamente homogéneos y medios isotrópicos; las propiedades térmicas de cada material no pueden cambiar durante el proceso de transferencia de calor. Las ecuaciones se discretizaron mediante el método de diferencias finitas (FDM) con el esquema de Gauss-Seidel en MATLAB, utilizando el método de punto de iteración (PIM), mientras que el método experimental utilizado se llama método de cambio de temperatura en cámara caliente. Bajo la influencia de las condiciones iniciales, existe una gran diferencia entre los resultados calculados y los datos experimentales en los primeros 400 min. Debido a la diferencia en las conductividades térmicas entre el material del block y la capa de aire, la isoterma en el block está distribuida de manera desigual. El comportamiento térmico de la pared es perfecto con una conductividad térmica del material del block menor a 1.0 W/mK.

Ait-Taleb et al. (2014), realizaron un estudio numérico de la transferencia de calor conjugada: convección, conducción y radiación a través de una estructura de blocks huecos, los cuales se calentaron de forma diferencial. La estructura tiene tres cavidades en la dirección horizontal y dos cavidades en la dirección vertical. Los lados superior e inferior se consideran isotérmicos y se mantienen a temperaturas constantes, mientras que los lados verticales se consideran adiabáticos. Las ecuaciones gobernantes se discretizaron utilizando el método de volumen finito y el método de acople de las ecuaciones de masa y momentum se realizó mediante el algoritmo

SIMPLE. Los resultados de la simulación muestran que el flujo de calor varía casi linealmente en ambos casos, sin embargo cuando fue calentado por debajo el fenómeno predominante es por conducción de calor, mientras que cuando es calentado por arriba predomina la conducción y radiación de calor. Se encontró que el block con dos celdas en la dirección vertical permite una considerable reducción de la transferencia de calor entre el exterior y el interior del block.

Caranua et al. (2014), compararon el método de medir el flujo de calor y el método infra-rojo para establecer una correlación de los resultados obtenidos de cada técnica de medición. El programa experimental preliminar consistió en establecer tres diseños de mezcla de concreto clasificados en HCB-1, HCB-2 y HCB-3, respectivamente, incluyendo diferentes porcentajes de arcilla expansible, perlita y basalto; para compararlos con respecto al block estándar local. En cada mezcla de diseño se ocupó: cemento, agregados minerales (piedra local y arena), arcilla expandible y súper plastificantes. En el método de medidor de flujo de calor se realizaron mediciones in-situ validadas comparando con métodos de prueba de laboratorio establecidas, mientras que el método infra-rojo se realizó utilizando termografía infrarroja. En este estudio se asume flujo de calor unidireccional aislando con poliestireno en la parte superior, inferior y ambos lados del modelo experimental. El modelo HCB-2 produjo la mejor combinación de resultados utilizando el método de medidor de flujo de calor con un valor de $U = 2.16 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, estableciendo una mejora del 3.6% con respecto al valor de $U = 2.24 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ para el HCB local estándar. El block HCB-2 se considera como la mezcla óptima entre las distintas muestras. Esta estrategia incrementó el potencial para establecer el mejor balance entre propiedades térmicas y estructurales.

Del Coz Diaz et al. (2014), realizaron un estudio con seis distintos tipos de ladrillos de concreto ligero con cavidades para construir modelos predictivos utilizando el método de respuesta de superficie (RSM) y el método de elemento finito (FEM), con el fin de estudiar el comportamiento térmico para distintos parámetros como: la conductividad, la convección y la radiación. Se modeló una pared construida con tres diferentes blocks, todos con el mismo espesor y dos diferentes longitudes. La geometría de las cavidades es diferente dependiendo del tipo de block. Utilizando el método de RSM y FEM se encontró la solución exacta de las

ecuaciones de transferencia de calor en los distintos casos. Los fenómenos de conducción y convección son tomados en cuenta para las seis distintas geometrías de blocks con cavidad utilizando la transmitancia térmica como función principal. Los resultados obtenidos utilizando FEM son procesados con el fin de obtener un parámetro principal que defina el problema: el coeficiente de transferencia de calor global, U (W/m^2k). Con el fin de minimizar la transmitancia térmica, fue usado un diseño de compuesto central (CCD) junto con la técnica RSM para optimizar los valores de las variables de entrada: emisividad del material, ancho y largo de las cavidades. En general, un incremento en el ancho de la cavidad implica un mejor comportamiento térmico.

Su et al. (2015), realizaron un estudio numérico-experimental para estudiar la transferencia de calor a través de sistemas de enfriamiento de techos de concreto. Se analizaron cinco casos; El Caso 1 y Caso 2 cuentan con una distancia entre tubos de 150mm, una temperatura de abastecimiento de agua de 12 y 13.3°C, respectivamente; mientras que los Casos 3 y 4 tienen una distancia entre tubos de 300mm, y una temperatura de abastecimiento de agua de 13.6 y 10.8°C, respectivamente. El estudio numérico se realizó utilizando el método de diferencias finitas (FDM), mientras que para el estudio experimental se utilizó una cámara de enfriamiento de techo de concreto (C-CRCP) de aproximadamente 2000mm x 2000mm x 2820mm. Comparando los resultados experimentales de los Casos 1 y 2 con los resultados numéricos se observa que la temperatura cambia de la entrada a la salida en 1°C, aproximándose muy bien a los resultados experimentales. El concreto podría disminuir el impacto de la temperatura de la superficie del techo con una menor fluctuación de la temperatura del agua de abastecimiento. La distribución de temperaturas dentro de la C-CRCP se obtuvo utilizando el modelo de FDM coincidiendo con los resultados experimentales con un error promedio de 3 a 4%. La capacidad de enfriamiento de la C-CRCP se relacionó con la temperatura de abastecimiento de agua y la velocidad del flujo del agua directamente.

Tang et al (2015), realizaron un estudio numérico para estudiar el comportamiento térmico de blocks huecos con aislamiento en las caras internas de los huecos utilizados para paredes. Se analizaron 12 distintos blocks de 240mm x 115mm x 90mm, utilizando 10mm de 4 distintos

materiales de aislamiento, 5 distintos materiales del block, 6 tipos de morteros y tres distintas configuraciones de huecos. Para realizar el estudio numérico desarrollo un código mediante el Método de Volumen Finito en tres dimensiones capaz de resolver conducción, convección y radiación. Al utilizar 10mm de aislamiento se observan resultados con una reducción de conductividad térmica equivalente de entre 20.3 y 61.1%. Con una alta resistencia térmica en el material del mortero o del block se puede ayudar a mejorar el comportamiento del aislamiento térmico.

1.3 CONCLUSION DE LA REVISION BIBLIOGRAFICA

Con base a la breve revisión bibliográfica sobre los estudios realizados, se observó que se han realizado diversos estudios en blocks huecos considerando aspectos como llenado de los huecos con aislante, efecto de material para unir los blocks, o la forma en que se une un block con otro, así como también el comportamiento higrotérmico, considerando condiciones de frontera, propiedades termofísicas y configuración de las cavidades, calentamiento del block de forma diferencial, comparación de diferencias de resultados entre enfoque 1-D y 2-D, número de huecos e incluso distintos diseños de las cavidades.

Además, han sido pocos los trabajos realizando el análisis para la aplicación de techos, entre ellos existen trabajos numéricos analizando distintos materiales, o incluso algunos trabajos numérico-experimentales de la transferencia de calor a través de techos radiantes. La aplicación de blocks huecos se ha encontrado también en trabajos analizando su uso en pisos.

En los trabajos realizados en la literatura se analiza desde solución experimental, hasta numérica comercial, e incluso códigos desarrollados por los autores. Sin embargo no se han encontrado artículos relacionados para techos con blocks huecos y climas de la República Mexicana.

1.4 OBJETIVO

Estudiar y analizar el efecto térmico del block para techos en la república Mexicana.

Objetivos específicos:

- Aprender la técnica de volúmenes finitos.
- Implementar un código computacional para modelar la transferencia de calor convectiva.
- Desarrollar un código numérico para simular la transferencia de calor conjugada en un medio compuesto sólido-aire (block).
- Seleccionar diferentes condiciones climáticas de la República Mexicana.
- Realizar el estudio paramétrico de un block con diferentes clima de México.

1.5 ALCANCE

Desarrollar e implementar un código computacional mediante la técnica de volúmenes finitos para el modelado de un block para techos con condiciones de clima de México. Los fenómenos considerados serán de convección y conducción en dos dimensiones.

Se seleccionarán condiciones climáticas de diferentes estados del país para días característicos del año para información del modelado. Se realizará el estudio paramétrico con las condiciones climatológicas seleccionadas, dimensión del block, tipo de recubrimientos y aislante, así como su evaluación horaria durante un día dependiendo de la información climatológica compilada (estudio pseudo-transitorio). Finalmente, mediante valores de fluxes de calor y temperatura se llevará a cabo la evaluación térmica para realizar una propuesta de techo.

1.6 ESCRITURA DE LA TESIS

Actualmente, existen distintos tipos de blocks en el mercado, por lo que es necesario plantear aquel que será utilizado para este estudio. Este punto es realizado en el **Capítulo 2**, en donde se muestra el modelo físico del block con huecos utilizado para techos, considerando además recubrimiento como aislante térmico. En el modelo físico se describe además la transferencia de calor conjugada (conducción y convección), así como las consideraciones contempladas para este estudio. Por otra parte en el modelo matemático se presentan las ecuaciones gobernantes para el modelo analizado, que describen el comportamiento del sistema y las condiciones de frontera para el block con huecos utilizado para techos, estas ecuaciones son discretizadas a partir de las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía.

Una vez definido el modelo matemático es necesario utilizar un método numérico para la solución de las ecuaciones definidas en el modelo matemático, por lo que en el **Capítulo 3** se muestra la metodología de solución numérica utilizada para realizar este estudio. Así entonces se define el método de Volumen Finito, y una breve descripción del algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) y SIMPLEC (*SIMPLE-consistent*) utilizados para el acople de las ecuaciones de conservación de masa y momentum. Por último, ya implementado el método de Volumen Finito, es necesario verificar el código numérico mediante casos de referencia, tales como: “Transferencia de calor por conducción en estado permanente”, “Validación de la implementación de Esquemas de Interpolación para problemas convectivos-difusivos” y “Cavidad cuadrada con pared deslizante con algoritmo SIMPLE y SIMPLEC”. Todos los resultados obtenidos en los problemas analizados se compararon con los reportados en la literatura.

Una vez verificado el código con resultados reportados en la literatura se procedió a obtener los resultados de las distintas configuraciones establecidas para realizar este trabajo, los resultados obtenidos son reportados en el **Capítulo 4**, en donde se realiza el análisis y discusión de los mismos mediante gráficas y tablas.

Después de haber analizado los resultados, en el **Capítulo 5** se describen finalmente las conclusiones a las que se han llegado en cuanto al uso de block con huecos para techos de la República Mexicana, el efecto del uso de recubrimientos y aislamiento térmico.

CAPÍTULO II

MODELOS FÍSICOS Y MATEMÁTICOS DE UN BLOCK HUECO

En este capítulo se muestra y se describe el modelo físico del block hueco utilizado para techos con recubrimiento como aislamiento térmico, con transferencia de calor conjugada (conducción y convección), así como los casos y parámetros de los mismos que se consideraran en el estudio. Además, se muestra el modelo matemático, en el cual se definen las ecuaciones gobernantes que describen el comportamiento del sistema, así como sus respectivas condiciones de frontera.

2.1 MODELO FÍSICO DEL BLOCK HUECO

En la República Mexicana el clima está determinado por diversos factores (Figura 2.1), entre los que se encuentra la altitud sobre el nivel del mar, la latitud geográfica, diversas condiciones atmosféricas, y la distribución de tierra y agua. Debido a las condiciones antes mencionadas, el país cuenta con una gran diversidad de climas, los cuales de manera muy general pueden clasificarse por su temperatura, en cálido y templado, y por su humedad, en húmedo, subhúmedo y muy seco.

El clima seco se encuentra en la mayor parte del centro y norte del país (28.3% del territorio nacional) con temperaturas en promedio de entre 22 a 26°C y 18 a 22°C, además de precipitaciones de 300 a 600mm anuales. El clima muy seco (20.8% del país) registra temperaturas en promedio de 18 a 22 °C con precipitaciones de 100 a 300mm anuales.

Con relación al clima cálido, puede subdividirse en cálido húmedo y cálido subhúmedo. El primero (4.7% del país) con temperaturas entre 22 y 26 °C y precipitaciones de 2000 a 4000mm anuales. Por otro lado, el clima subhúmedo (23% del país), tiene 1000 a 2000mm anuales y temperaturas entre 22 y 26 °C.

Por su parte el clima templado se divide en húmedo y subhúmedo; en el primero (2.7% del país) se encuentran temperaturas entre 18 y 22 °C, con precipitaciones de 2000 a 4000mm anuales. Respecto al clima templado (20.5% del país) con temperaturas entre 10 a 18 °C, y 18 a 22 °C, con precipitaciones de 600 a 1000mm anuales.

Debido a los climas que se presentan en la República Mexicana, las edificaciones pueden acumular calor, ya que los materiales utilizados para las construcciones no siempre son los más adecuados o incluso un mal diseño puede representar futuros problemas de confort térmico, y por

consiguiente, reflejarse en un alto consumo energético debido a los sistemas de calentamiento y/o enfriamiento que se deban utilizar para establecer condiciones de confort en la habitación.

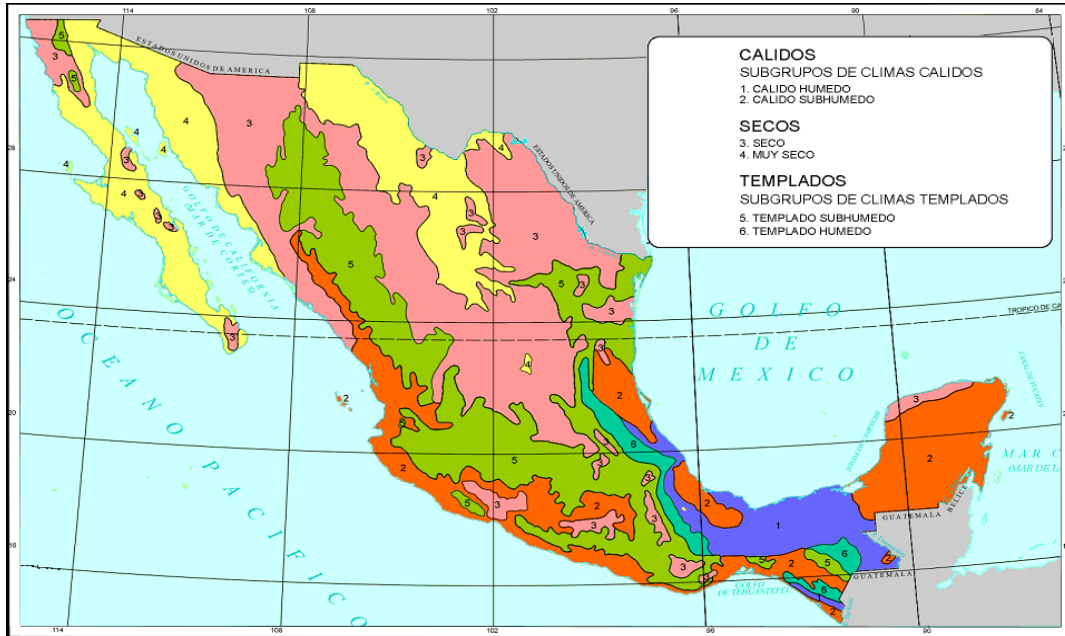


Figura 2.1. Climas de la República Mexicana, INEGI (2010)

Una alternativa en las construcciones con climas extremos es el uso de blocks huecos en los techos, los cuales además de reducir el peso estructural, mejoran las propiedades térmicas gracias a que las cavidades llenas de aire funcionan como aislante térmico, ayudando así a disminuir el calor que se transfiere hasta el interior del edificio.

En la Figura 2.2, se muestra la configuración de un típico techo utilizando blocks huecos, considerando los blocks de la parte central del techo, el efecto principal de transferencia de calor proviene del sol al techo, y del techo al interior de la habitación.

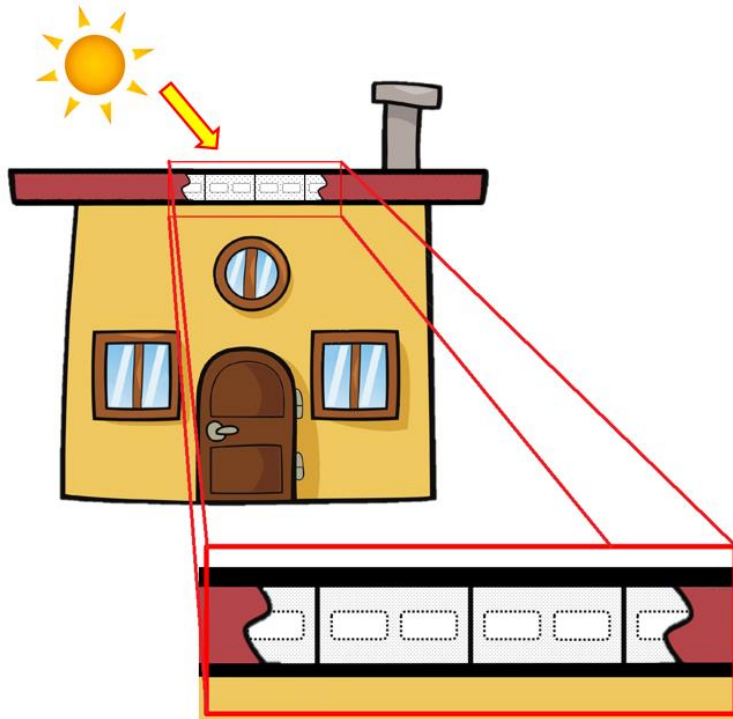
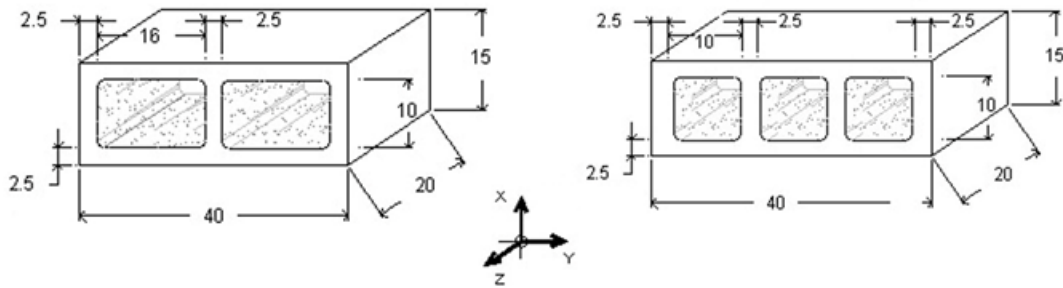


Figura 2.2. Modelo Físico de una Casa con Techo de Block Hueco

El estudio se basa en analizar el uso y comportamiento de los blocks huecos utilizados para techos, expuestos en la parte superior (exterior) a condiciones climáticas y en la parte inferior a condiciones de habitación. La representación geométrica de un solo block, será considerada como el modelo físico para la tesis, considerando un block del centro del techo como una dimensión rectangular con dos huecos simétricos desde las fronteras del block; además se puede suponer que la longitud del techo es mucho más grande en comparación a la longitud de un solo block, por lo cual no se consideran las contribuciones por parte de los blocks vecinos al mismo. En la Figura 2.3 se muestran las dimensiones del block con dos y tres huecos.



a) Dimensiones del Block de Dos Huecos (cm)

b) Dimensiones del Block de Tres Huecos (cm)

Figura 2.3. Dimensiones del Blocks Para el Estudio

Se consideran cuatro distintos casos en los que se buscará observar un mejor comportamiento en cuanto al flujo de calor que fluye al interior de la habitación, así como la temperatura en la misma.

2.1.1 Modelo Físico de un Block Hueco con Loza (B - L)

En esta configuración se consideran la transferencia de calor por radiación y convección del ambiente exterior a la parte superior del block (simulando el techo). Así mismo, se considera la transferencia de calor por conducción y convección a través del block y en los huecos, respectivamente; se desprecian las contribuciones de los blocks adyacentes sobre las paredes verticales, por lo cual se consideran aisladas, mientras que se presenta transferencia de calor por convección hacia la parte inferior del block hacia el aire a una temperatura de habitación, T_{int} .

La Figura 2.4 muestra el Modelo Físico de la configuración del Block Hueco con Loza, en ella se describe la situación del sistema de una manera visual muy sencilla de comprender, se pueden observar solamente el block con su respectiva loza de 5cm, además de los distintos fenómenos de transferencia de calor que interfieren en el problema y la consideración de las paredes verticales aisladas. Cabe mencionar que la mayoría de los techos cuentan solamente con esta

configuración, y en muchos de los casos las temperaturas al interior de la habitación no alcanzan las condiciones de confort necesarias para poder brindar un ambiente agradable.

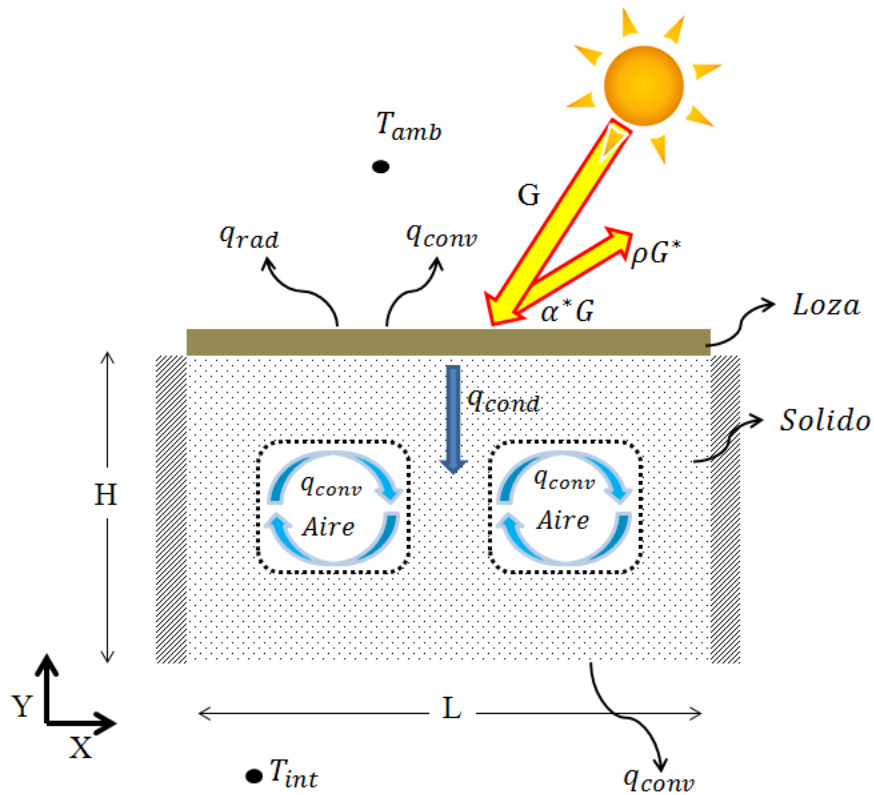


Figura 2.4. Block Hueco con Loza

2.1.2 Modelo Físico de un Block Hueco con Loza y Película Reflectiva (B – L – B / W)

Esta configuración (Figura 2.5) cuenta con las mismas consideraciones que la configuración anterior en cuanto a los fenómenos de transferencia de calor a simular, a diferencia que en éste caso se considera además no solo el block y la losa, sino también una película reflectiva a estudiar. Se analizará una película blanca y una negra para esta configuración.

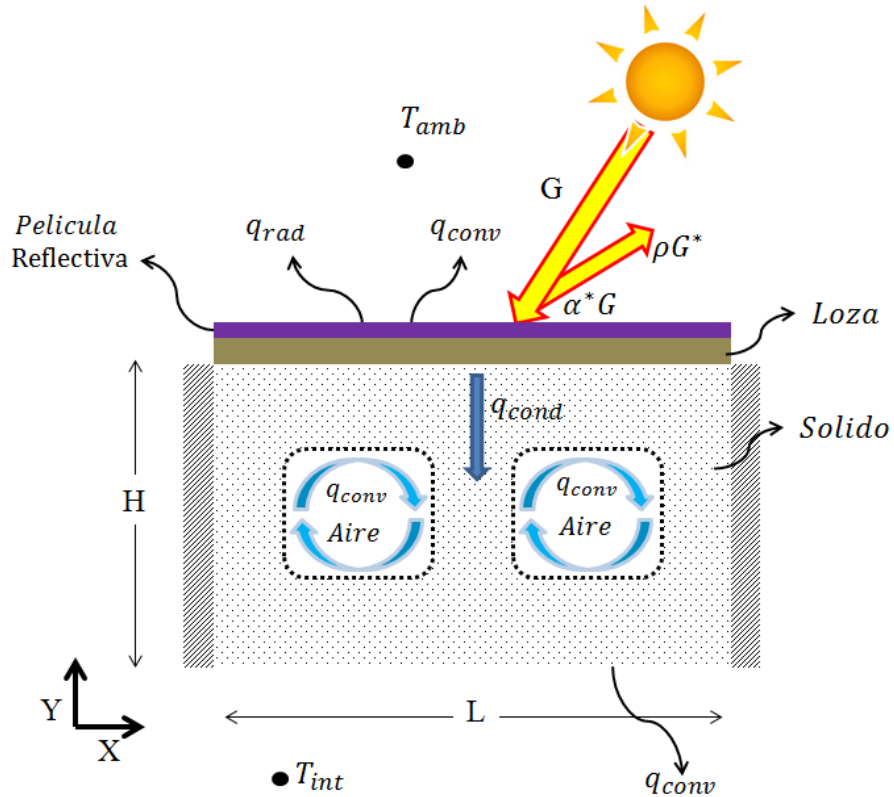


Figura 2.5. Block Hueco con Loza y Película Reflectiva

2.1.3 Modelo Físico de un Block Hueco con Aislamiento Térmico y Loza (B - A - L)

Nuevamente, esta configuración (Figura 2.6) considera los mismos fenómenos de transferencia de calor que el primer modelo. Sin embargo a diferencia del primero y el segundo, en este se ve implicado una disminución de la velocidad de transferencia de calor del exterior al block, al introducir un material de aislamiento térmico de poliestireno expandido (Foamular® 250) de 2.5cm de espesor entre la loza y el block.

Con este material aislante se espera que las temperaturas al interior de la habitación sean aún menores que sin el mismo, o por lo menos no aumentar demasiado y de esta forma poder brindar mejores condiciones de confort.

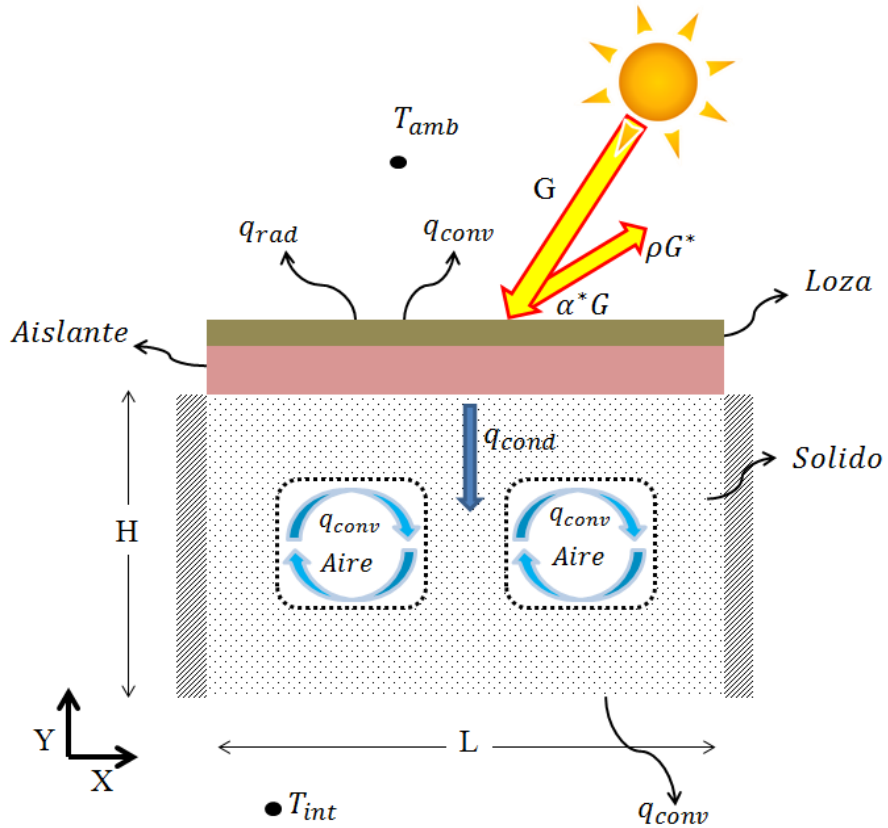


Figura 2.6. Block Hueco con Aislamiento Térmico y Loza

2.1.4 Modelo Físico de un Block Hueco con Aislamiento Térmico, Loza y Película Reflectiva (B – A – L – B / W)

Esta configuración (Figura 2.7) es una combinación de las tres anteriores, y se espera sea aquella que tenga el mejor comportamiento en cuanto a resultados en el aumento de la temperatura y flujo de calor al interior de la habitación ya que combina aislamiento térmico, revoco y película reflectiva negra o blanca.

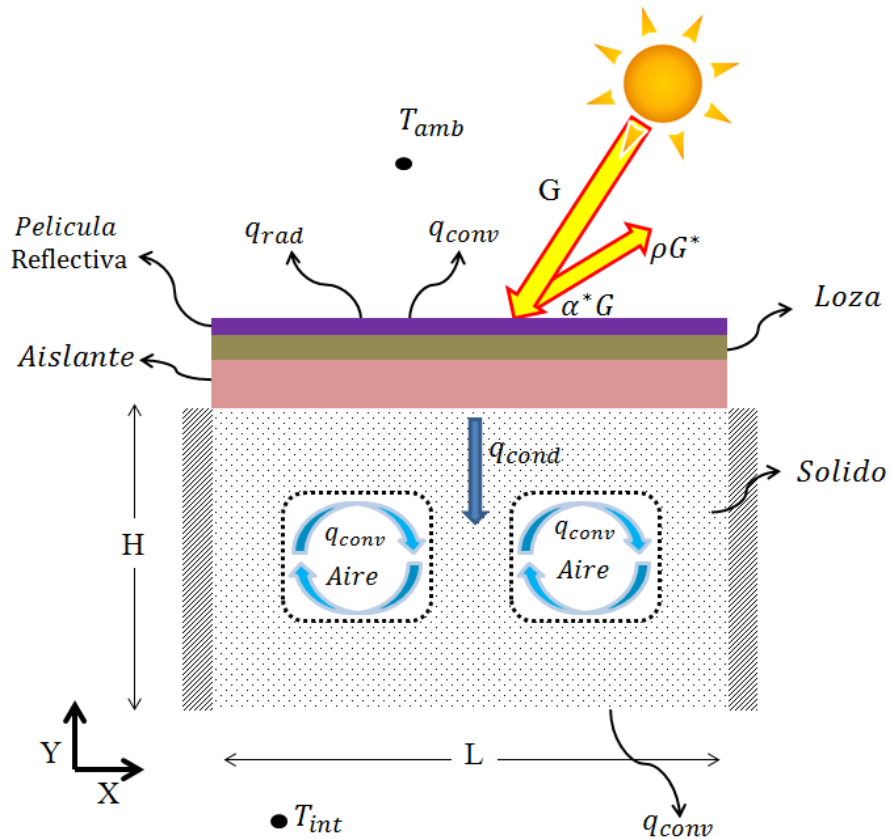


Figura 2.7. Block Hueco con Aislamiento, Loza y Película Reflectiva

2.2 CONSIDERACIONES

- En las partes huecas del block se supone el movimiento de aire seco con comportamiento de un fluido newtoniano en régimen de flujo laminar.
- Se considera transferencia de calor conjugada en el block (conducción y convección), y la radiación térmica solamente se considera del exterior al techo (condición de frontera).
- Las propiedades termofísicas del aire y del block se consideran constantes, a excepción de la densidad del aire con el término de flotación, en donde se utiliza la aproximación de Boussinesq. Este término se encuentra inmerso en el término de flotación de la ecuación de Momentum-y.

- Las partes sólidas del block se consideran como un medio homogéneo y sin generación de calor.
- Debido a la complejidad del estudio, éste se realizó en dos dimensiones para un solo block al considerar una tercera dimensión mucho más larga en comparación con su ancho. Esta consideración simplifica la complejidad del problema, además de disminuir el tiempo de cómputo.
- Al tomar un block del centro, se asume que sus paredes laterales son adiabáticas, ya que la principal aportación de calor proviene de sus paredes superior e inferior (exterior e interior, respectivamente).
- Se considera un material aislante en la parte exterior del block (superior).
- Se considera el uso de una película reflectiva en la parte exterior del block (superior) de espesor despreciable.
- Se compara el desempeño térmico de un block con 2 y 3 huecos para todas las consideraciones antes mencionadas.

2.3 MODELO MATEMÁTICO DEL BLOCK HUECO

Para el problema planteado se considera la transferencia de calor conjugada (convección natural y conducción de calor) a través del block, el cual tiene aisladas las paredes verticales, con pérdidas por convección y radiación en la pared horizontal superior, y solo por convección en la pared horizontal inferior, como se muestra en la Figura 21. Las ecuaciones de conservación (masa, momentum y energía) representan el comportamiento del fenómeno de convección en el block; dichas ecuaciones se escriben de manera indicial como:

Ecuación de Conservación de Masa

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Ecuación de Conservación de Momentum

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho g_i \beta (T - T_\infty) \quad (2)$$

Ecuación de Conservación de Energía

$$\frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{1}{c_p} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Posteriormente, se utilizará una técnica de bloqueo de celdas, para que los valores de velocidad sean nulos en la región sólida del block, y la transferencia de calor conjugada quede implícita en las ecuaciones anteriores.

Condiciones de Frontera Térmicas

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad 0 < Y < H \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad 0 < Y < H \quad (5)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = h[T - T_{ext}] \quad 0 \leq X \leq L \quad (6)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=H} = h[T - T_{ext}] + \varepsilon\sigma[T^4 - T_{sky}^4] + \alpha G$$

$$0 \leq X \leq L \quad (7)$$

Los valores de velocidad en la región sólida serán nulos, así como las condiciones de frontera que delimitan el block. Para el caso de la configuración de block sin película reflectiva, el término αG de la Ec. 7 se considera nulo.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

En este capítulo se explica de manera general el “Método de Volumen Finito” utilizado para la solución de este estudio, así como el algoritmo “SIMPLE” (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) para el acople de la presión con las ecuaciones de conservación de momentum.

3.1 MÉTODOS NUMÉRICOS

Al observar nuestro alrededor es posible contemplar multitud de fenómenos asociados a los fluidos y/o transferencia de calor. Este tipo de fenómenos se encuentran interaccionando con nosotros en todo momento y en todo lugar, sin embargo muchas veces no se les presta la atención necesaria, y en muchos casos su mejor entendimiento podría implicar un mejor aprovechamiento de los mismos o incluso una mejor eficiencia en muchos casos en los que el hombre les saca provecho. A partir de la curiosidad y necesidad de comprender el trasfondo del comportamiento de los fluidos y otros fenómenos asociados a este, los científicos plantearon formulaciones para su estudio, dividiéndose en Teórica y Experimental.

Por su parte la solución **experimental** plantea el uso de prototipos a pequeña o mediana escala y de esta forma determinar las variables de interés, sin embargo muchas veces implica una gran inversión económica para la obtención de resultados, además de que sólo es aplicable al sistema específico en el que se efectuó la prueba. En el caso de la solución teórica se subdivide en analítica y numérica. La **analítica** (métodos analíticos) se refiere a aquellos métodos que poseen una solución analítica; por otro lado la **numérica** se enfoca en los métodos numéricos, en donde se obtienen como resultado una serie de valores aproximados para la solución deseada.

Entre los métodos numéricos más conocidos y utilizados se encuentran el método de *Diferencias Finitas (MDF)*, el de *Elemento Finito* y el de *Volúmenes Finitos*. Especialmente el método de *Volúmen Finito*, se desarrollo originalmente como una forma especial de la formulación en diferencias finitas. El objetivo principal de este método es encontrar una forma sencilla de resolver las ecuaciones de conservación. Se divide el dominio en un número finito de volúmenes de control, en el cuál será calculada la información de la variable de interés, posteriormente se aplican las ecuaciones de conservación previamente discretizadas obteniendo ecuaciones algebraicas más sencillas de resolver. Una ventaja notable en este método es que no existe problema en cuanto al tipo de malla que se utilice, ya que puede ser utilizado para cualquier tipo de mallas.

3.2 MÉTODO DE VOLUMEN FINITO

El método de volumen finito (MVF) tiene como objetivo usar la forma integral de las ecuaciones de conservación. El dominio de estudio es subdividido en un número finito de volúmenes de control (VC) contiguos y las ecuaciones de conservación son aplicadas para cada VC. En el centroide de cada VC recae un nodo computacional en el cual se calcula la variable de interés. Se calculan los valores de las variables en las superficies 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. El MVF puede ser adecuado a cualquier tipo de malla y por lo tanto, puede ser aplicado a geometrías complejas. El algoritmo numérico usando el MVF consiste en:

- Integración de las ecuaciones gobernantes.
- Discretización al sustituir una variedad de aproximaciones finitas para los términos en las ecuaciones integradas.
- Solución de las ecuaciones algebraicas por un método iterativo.

La formulación de MVF permite tener resultados más exactos conforme los volúmenes de control se aproximen al infinito, es decir, al continuo.

3.3 GENERACIÓN DE MALLA

Al generar la malla se divide el dominio físico en volúmenes de control y dentro de cada volumen de control se tiene localizado un nodo en el que se determinará el valor de la variable. En otras palabras, se determinan las características geométricas del sistema.

El nodo dentro del volumen de control a ser analizado se define como P (Figura 3.1), mientras que los nodos vecinos se definen como E (east), W (west), N (north) y S (south) para izquierda, derecha, arriba y abajo, respectivamente. Las fronteras entre los nodos y P, se definen con letras minúsculas e, w, n y s. A la distancia entre el nodo P y los nodos vecinos se define como δx_{PE} , δx_{WP} , δy_{PN} y δx_{SP} según sea el caso.

Por otra parte el espesor de cada volumen de control se define como Δx y Δy , para los nodos sobre el eje x o el eje y, respectivamente.

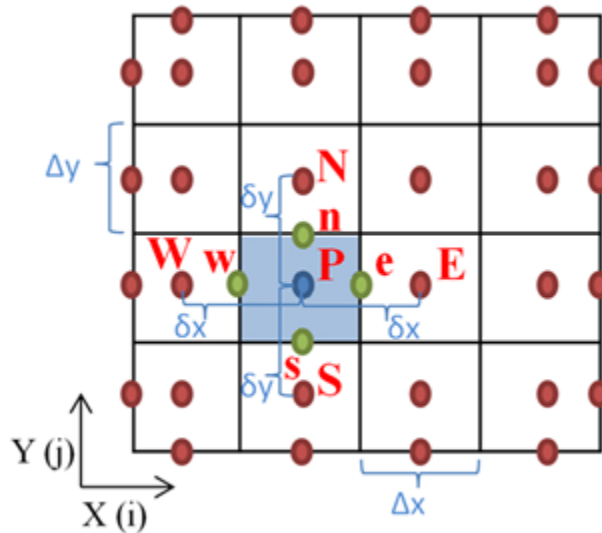


Figura 3.1. Distribución Volumen Finito

3.4 ECUACIÓN GENERAL CONVECCIÓN-DIFUSIÓN

Como se mencionó anteriormente las ecuaciones de conservación (masa, momentum y energía) describen el fenómeno bajo estudio, además de obedecer el principio de conservación generalizado; esto permite que las ecuaciones puedan ser representadas en una sola expresión general, a la cual se le llama “ecuación general conservativa de convección difusión”.

Patankar (1980) describe la ecuación como:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{Término Temporal}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho u \cdot \phi)}{\partial X} + \frac{\partial(\rho v \cdot \phi)}{\partial Y} + \frac{\partial(\rho w \cdot \phi)}{\partial Z}}_{\text{Términos Convectivos}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial X} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial Z} \right)}_{\text{Términos Difusivos}} + \underbrace{\delta}_{\text{Término Fuente}}$$

(8)

La ecuación se compone del término temporal, el cual representa la acumulación o disminución de la variable con respecto al tiempo; los términos convectivos representan el transporte de la variable de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad del flujo; los términos difusivos representan el flujo de la variable a nivel molecular debido a las corrientes difusivas y el término fuente representa la generación o destrucción de la variable en el interior del volumen de control.

En la Tabla 3.1 se muestran las equivalencias de las ecuaciones de masa, momentum y energía en términos generales, utilizando la ecuación 8.

Tabla 3.1. Equivalencias de la Ecuación General

ECUACIÓN CONSERVATIVA	ϕ	Γ	S	Ec.
<i>Masa</i>	1	0	0	1
<i>Momentum – x</i>	<i>u</i>	μ	$-\frac{\partial P}{\partial x} + F_x + S_x$	2a
<i>Momentum – y</i>	<i>v</i>	μ	$-\frac{\partial P}{\partial y} + F_y + S_y$	2b
<i>Energía</i>	T	$\frac{\lambda}{Cp}$	0	3

3.5 DISCRETIZACIÓN DE LA ECUACIÓN GENERALIZADA DE CONVECCIÓN-DIFUSIÓN

Discretizar los términos convectivos implica la solución de problemas en los que muchas veces no solo existe difusión, sino también un aporte importante de información por parte del movimiento del fluido, por lo cual deben ser considerados el comportamiento de ambos.

Es necesario conocer los flujos convectivos y los flujos difusivos para determinar los flujos totales (J_e, J_w, J_n, J_s) en las caras del volumen de control. En la Figura 3.2, se muestra el Volumen de Control sobre una malla cartesiana en dos dimensiones, con la cual se discretiza la ecuación (8).

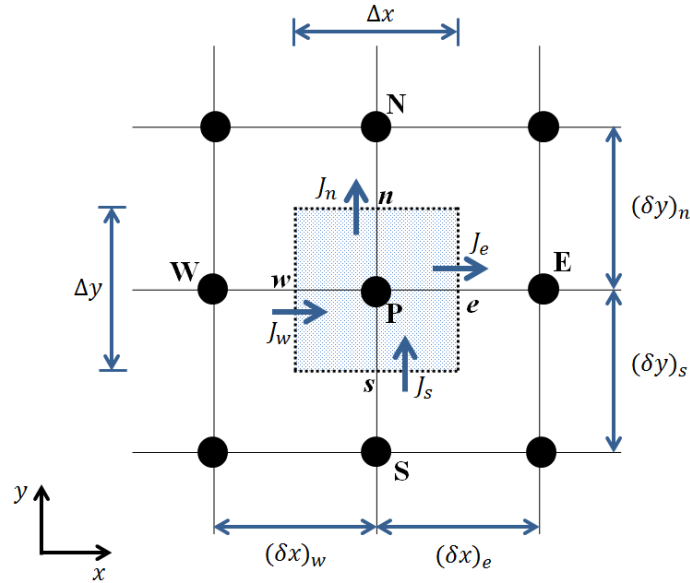


Figura 3.2. Volumen de Control para un Nodo

Para el cálculo de los flujos convectivos se utilizan esquemas de interpolación para conocer la variable deseada en la cara de un VC a partir de los valores nodales, mientras que para los términos difusivos se recomienda utilizar una diferencia centrada. Los diferentes esquemas de interpolación difieren en el tipo de aproximación utilizada para calcular dichos términos, lo que puede llevar a tener problemas de convergencia e incluso soluciones irreales o ilógicas.

Para poder observar la importancia de los flujos convectivos es necesario discretizar la Ecuación Generalizada para el caso de los nodos internos en los que se desconoce la variable de interés (φ). Partiendo de la Ecuación Generalizada para dos dimensiones, en coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u\varphi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v\varphi) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial y} \right) + S \quad (9)$$

Integrando la Ec. 9 sobre los límites geométricos del volumen de control, se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\overline{\rho\phi})}{\partial t} \Delta x \Delta y + [(\rho u \phi)_e - (\rho u \phi)_w] \Delta y + [(\rho v \phi)_n - (\rho v \phi)_s] \Delta x = \\ \left[\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] \Delta y + \left[\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] \Delta x + \bar{S} \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (10)$$

Se observa que los términos $\overline{\rho\phi}$ y \bar{S} son términos promedios que prevalecen para todo el VC, sin embargo la Ec. 10 aún no ha sido integrada en el tiempo, por lo que es necesario hacer una consideración acerca de cómo las ϕ 's y S varían desde $t = t_0$ a $t + \Delta t$. A pesar de que se pueden realizar distintas consideraciones, las más relevantes pueden generalizarse mediante la siguiente expresión,

$$\int_t^{t+\Delta t} [\phi] dt = [f \phi + (1 - f) \phi^0] \Delta t \quad (11)$$

donde f denota un factor de peso ponderado que varía entre 0 y 1, en otras palabras,

Si $f = 0.0$ el esquema es Explícito

Si $f = 0.5$ el esquema es Crank-Nicolson

Si $f = 1.0$ el esquema es implícito

Para este trabajo se utilizó un esquema implícito ($f = 1.0$). Siguiendo estas consideraciones, el resultado de la integración temporal de la Ec. 10 en el volumen de control es:

$$\begin{aligned} & \frac{(\rho\varphi)_P^{n+1} - (\rho\varphi)_P^n}{\Delta t} \Delta x \Delta y + [(\rho u\varphi)_e^{n+1} - (\rho u\varphi)_w^{n+1}] \Delta y + [(\rho v\varphi)_n^{n+1} - \\ & (\rho v\varphi)_s^{n+1}] \Delta x = \left[\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_e^{n+1} - \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_w^{n+1} \right] \Delta y + \left[\left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_n^{n+1} - \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_s^{n+1} \right] \Delta x + \\ & S^{n+1} \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (12)$$

La ecuación anterior se puede simplificar mediante la definición de los fluxes convectivos o de intensidad convectiva a través de las caras del Volumen de Control:

$$\begin{aligned} F_w &= (\rho u)_w \Delta y, & F_e &= (\rho u)_e \Delta y, \\ F_s &= (\rho v)_s \Delta x, & F_n &= (\rho v)_n \Delta x \end{aligned} \quad (13)$$

Los términos difusivos o conductancias en las caras del volumen de control se definen como:

$$\begin{aligned} D_w &= \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} \Delta y, & D_e &= \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} \Delta y, \\ D_s &= \frac{\Gamma_s}{\delta x_{SP}} \Delta x, & D_n &= \frac{\Gamma_n}{\delta x_{PN}} \Delta x \end{aligned} \quad (14)$$

Una forma de relacionar los fluxes convectivos con los difusivos es mediante el número de Péclet (Pe),

$$\begin{aligned} Pe_w &= \frac{F_w}{D_w}, & Pe_e &= \frac{F_e}{D_e}, \\ Pe_s &= \frac{F_s}{D_s}, & Pe_n &= \frac{F_n}{D_n} \end{aligned} \quad (15)$$

Finalmente, los flujos totales a través de las caras de los volúmenes de control (flux convectivo más flux difusivo):

$$J_w = \left[(\rho u \varphi)_w - \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_w \right] \Delta y, \quad J_e = \left[(\rho u \varphi)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_e \right] \Delta y \quad (16)$$

$$J_s = \left[(\rho v \varphi)_s - \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_s \right] \Delta x, \quad J_n = \left[(\rho v \varphi)_n - \left(\Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_n \right] \Delta x$$

Sustituyendo los términos de flujos totales (Ec. 16) de las caras del volumen de control en la Ec. 12, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{(\rho \varphi)_P - (\rho \varphi)_P^0}{\Delta t} \Delta x \Delta y + (J_e - J_w) + (J_n - J_s) = S \Delta x \Delta y \quad (17)$$

El término fuente S puede depender de la variable φ , por lo cual es necesario separar el término en dos partes, $S = S_C + S_P \varphi_P$. Una parte que dependa directamente de la variable ($S_P \varphi_P$), mientras que la otra parte no depende de la variable (S_C). Bajo esta consideración, la Ec. 17 se puede reescribir como:

$$\frac{(\rho \varphi)_P - (\rho \varphi)_P^0}{\Delta t} \Delta x \Delta y + (J_e - J_w) + (J_n - J_s) = (S_C + S_P \varphi_P) \Delta x \Delta y \quad (18)$$

La ecuación discreta de convección-difusión debe alcanzar una solución final mediante un proceso iterativo, para asegurarse que esta solución es correcta debe cumplir con el principio de conservación de masa o continuidad (Ec. 1). La Ec. 18 se integra espacial y temporalmente, llegando a:

$$\frac{(\rho_P - \rho_P^0)}{\Delta t} \Delta x \Delta y + (F_e - F_w) + (F_n - F_s) = 0 \quad (19)$$

Multiplicando la Ec. 19 por φ_P ,

$$\frac{(\rho_P - \rho_P^0)}{\Delta t} \varphi_P \Delta x \Delta y + (F_e - F_w) \varphi_P + (F_n - F_s) \varphi_P = 0 \quad (20)$$

Y posteriormente restando la Ec. 20 a la Ec. 18, se llega a:

$$(\varphi_P - \varphi_P^0) \frac{\rho_P^0}{\Delta t} \Delta x \Delta y + [(J_e - F_e \varphi_P) - (J_w - F_w \varphi_P)] + [(J_n - F_n \varphi_P) - (J_s - F_s \varphi_P)] = (S_C + S_P \varphi_P) \Delta x \Delta y \quad (21)$$

La Ec. 21 finalmente cumple con el principio de conservación de masa. Ahora es necesario convertir esta ecuación discreta a una notación de coeficientes agrupados, es decir, expresar la variable de un nodo P en función de la variable de los nodos vecinos E, W, N, S, y en función de otros parámetros que engloben el término fuente). Para ello, se utiliza la formulación de esquema generalizado de Patankar (1980):

Partiendo de la solución exacta o analítica:

$$\frac{\varphi - \varphi_0}{\varphi_L - \varphi_0} = \frac{e^{\frac{Pe x}{L}} - 1}{e^{Pe} - 1}, \quad \text{donde: } Pe = \frac{\rho u L}{\Gamma} = \frac{F}{D} \quad (22)$$

La solución exacta (Ec. 22) puede ser usada como un perfil para aproximación, por ejemplo, entre los puntos P y E, con φ_P y φ_E reemplazando φ_0 y φ_L y la distancia $(\delta x)_e$ por L:

$$J_e = F_e \left(\frac{e^{(Pe_e)}}{e^{(Pe_e)} - 1} \varphi_P - \frac{1}{e^{(Pe_e)} - 1} \varphi_E \right) \quad (23)$$

Haciendo:

$$J_e^* = \frac{J_e}{D_e} = Pe \left(\frac{e^{(Pe_e)}}{e^{(Pe_e)} - 1} \varphi_P - \frac{1}{e^{(Pe_e)} - 1} \varphi_E \right) \quad (24a)$$

J^* también puede ser expresada como:

$$J^* = B\varphi_i - A\varphi_{i+1} \quad (24b)$$

donde A y B son coeficientes dimensionales, funciones del número de Peclet, por lo tanto,

$$J_e^* = \frac{J_e}{D_e} = B(Pe_e)\varphi_P - A(Pe_e)\varphi_E \quad (25)$$

Sabiendo que:

$$B(Pe) = A(Pe) + Pe$$

, se llega a:

$$\begin{aligned} J_e^* - F_e\varphi_P &= D_e A(Pe_e)(\varphi_P - \varphi_E) \\ &= a_E(\varphi_P - \varphi_E) \end{aligned} \quad (26)$$

Análogo para todas las interfaces:

$$J_e - F_e\varphi_P = a_E(\varphi_P - \varphi_E)$$

$$J_w - F_w \varphi_P = a_w(\varphi_w - \varphi_P) \quad (27)$$

$$J_n - F_n \varphi_P = a_n(\varphi_P - \varphi_N)$$

$$J_s - F_s \varphi_P = a_s(\varphi_s - \varphi_P)$$

Finalmente se obtiene la Ecuación de Convección-Difusión (Ecuación Generalizada) en notación de coeficientes agrupados, al sustituir la Ec. 27 en la Ec. 21, obteniendo una ecuación de la forma:

$$a_P \varphi_P = a_w \varphi_w + a_E \varphi_E + a_s \varphi_s + a_n \varphi_n + b \quad (28)$$

O bien:

$$a_P \varphi_P = \sum_{vecinos} a_{vecinos} \varphi_{vecinos} + b \quad (29)$$

donde:

$$a_E = D_e A(|Pe_e|) + \max[-Fe, 0] \quad (30)$$

$$a_w = D_w A(|Pe_w|) + \max[Fw, 0] \quad (31)$$

$$a_n = D_n A(|Pe_n|) + \max[-Fn, 0] \quad (32)$$

$$a_s = D_s A(|Pe_s|) + \max[Fs, 0] \quad (33)$$

$$a_p^0 = \rho_p^0 \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (34)$$

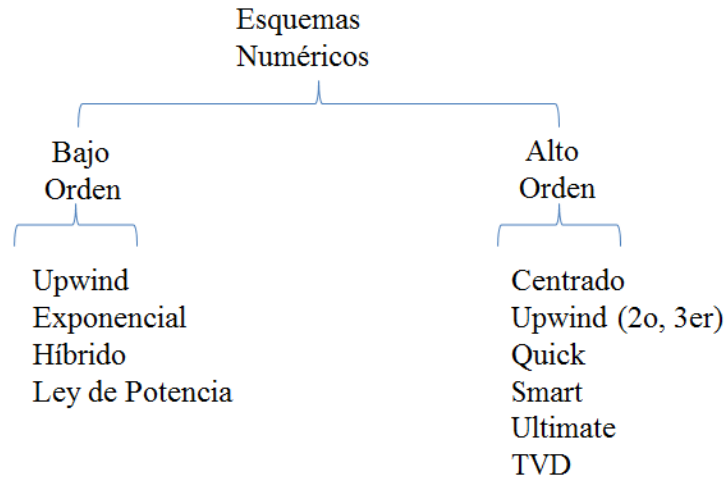
$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + \left(\rho_P \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} - S_P \Delta x \Delta y \right) \quad (35)$$

$$b = a_p^0 \phi_p^0 + S_p \Delta x \Delta y \quad (36)$$

3.5.1 Esquemas de Aproximación Numérica

Para resolver la ecuación discretizada (Ec. 28), los coeficientes deben contar con toda la información requerida, sin embargo la información se tiene en los puntos nodales y es necesario conocer los valores de las variables en las caras de los volúmenes de control.

La forma en que se obtiene la información en las caras de los volúmenes de control puede variar dependiendo del tipo de Esquema de Aproximación que se utilice (*función* $A(|Pe|)$). A pesar de que existen esquemas de bajo y alto orden, los esquemas de bajo orden están basados en una combinación de simplicidad del algoritmo a desarrollar, rápida convergencia y obtención de resultados relativamente satisfactorios, al tomar uno o dos puntos nodales para la aproximación del valor de la interface del volumen de control. En problemas 2D y 3D, los esquemas de bajo orden son satisfactoriamente aceptables si en sus direcciones de flujo las velocidades son bajas o se tienen números de Peclet pequeños.



El esquema **centrado** se utiliza para calcular los valores de la variable en las fronteras del VC como resultado de una media aritmética o una aproximación lineal, sin embargo no toma en cuenta la dirección de flujo, a diferencia del esquema **upwind** que además de tomar en cuenta la dirección de flujo propone una mejor aproximación para la variable, esto a pesar de ser un esquema de primer orden; por otra parte el esquema **híbrido** que es una combinación del esquema upwind y el centrado, utiliza una expresión exacta para los coeficientes con base a la solución analítica utilizando una formulación con base al número de Peclet local; el esquema **exponencial** no se justifica en el caso de cálculos de problemas muy complejos de gran demanda computacional debido a que el uso de funciones exponenciales no es muy eficiente; y por último el esquema de **ley de potencia** tiene ventajas de exactitud, comparada con el esquema centrado e híbrido, esta formulación utiliza una aproximación de ley de potencia en lugar de la aproximación lineal, lo que permite obtener resultados cercanos a los del esquema exponencial a un costo computacional más reducido.

En la Tabla 3.2 se muestran los valores de la función $A(|Pe|)$ para los distintos esquemas comentados anteriormente.

Tabla 3.2. Función A ($|Pe|$)

<i>Esquema Numérico</i>	<i>A (Pe)</i>
<i>Centrado</i>	$1-0.5 Pe $
<i>Upwind</i>	1
<i>Exacto o Exponencial</i>	$\frac{ Pe }{e^{ Pe } - 1}$
<i>Híbrido</i>	$\max [0, (1-0.5 Pe)]$
<i>Ley de Potencia</i>	$\max [0, (1-0.1 Pe)^5]$

3.6 ALGORITMOS DE ACOUPLE: SIMPLE Y SIMPLEC

En los problemas de dinámica de fluidos se ven involucradas las componentes de velocidad y presión, estas ecuaciones pueden ser representadas mediante la ecuación general conservativa de convección-difusión. Sin embargo se debe tomar en cuenta que la ecuación de momentum tiene un término convectivo, el cual es altamente no-lineal y además las ecuaciones de momentum y continuidad están fuertemente acopladas debido a las componentes de velocidad que aparecen en ellas, con esto se forma un sistema de ecuaciones diferenciales parciales. Esto representa una complejidad debido al rol que juega la presión en las ecuaciones de momentum, debido a que no existe una ecuación de transporte para la presión.

Una solución a este problema fue el algoritmo desarrollado por Patankar y Spalding (1972), al presentar una formulación implícita en términos de velocidad y presión, al que llamaron SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). En el algoritmo SIMPLE se obtiene una ecuación de corrección de presión por medio de la ecuación de continuidad para corregir el campo de presión y velocidades.

Uno de los principales problemas presentados por el método SIMPLE es la representación del gradiente de presión en las ecuaciones de momentum, Patankar (1980) mostro que la solución de las ecuaciones de continuidad y momentum discretizadas en los mismos nodos computacionales, puede conducir a una distribución de presión oscilatoria que no corresponde a la solución real, para resolver este problema se propuso el uso de “mallas desplazadas”.

3.6.1 Malla Desplazada o Escalonada (Staggered Grid)

Una alternativa para el acople de las presiones de continuidad y momentum es el uso de mallas superpuestas (Figura 3.3) en función de las variables que se requiere calcular. Mientras la malla principal es aquella en la que se colocan y almacenan las variables escalares (presión, temperatura, energía cinética, etc.), en las otras mallas que se desplazan en las direcciones x , y , z se almacenan las componentes de velocidad u, v, w respectivamente. El desplazamiento de las mallas se realiza de tal forma que las fronteras de sus volúmenes de control coinciden con los puntos nodales de la malla principal.

Entre las ventajas del uso de malla desplazada se encuentra el tener sus correspondientes nodos discretos en la posición de interface del VC de la malla principal, evitando tener que interpolar los valores, ya que se tiene la información de los fluxes convectivos en las interfaces de los VC; otra ventaja fue la discutida por Patankar (1980), que consiste en sobrellevar la dificultad de la representación del gradiente de presión de las ecuaciones de momentum.

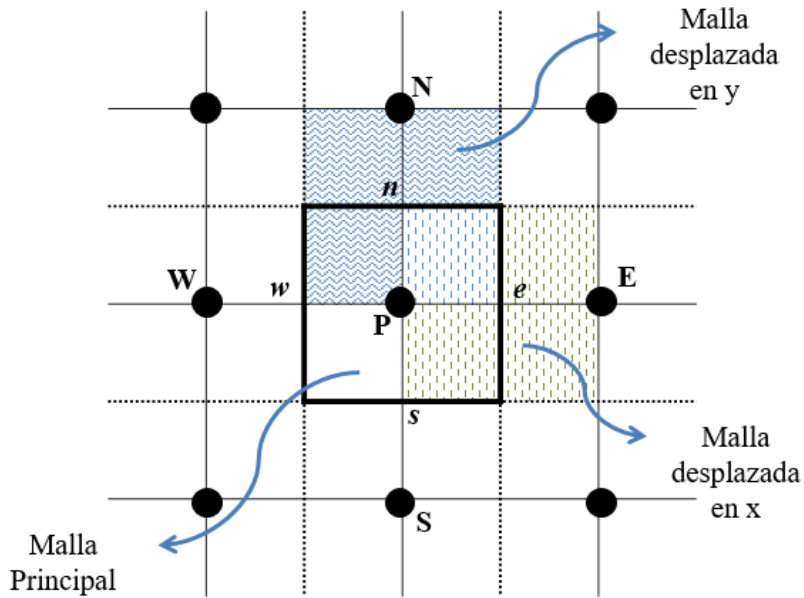


Figura 3.3. Representación de la Malla Desplazada

3.6.2 Gradiente de Presión

Una de las principales razones por las cuales se utilizan las mallas desplazadas para las componentes de velocidad implica que la interface de sus VC se relacione con los puntos nodales de la malla principal y sobre estos se tiene la información almacenada de la presión, por lo tanto los balances de presión son inmediatos.

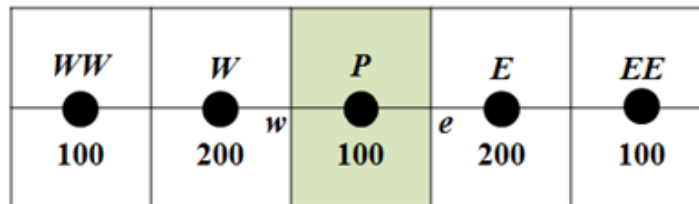


Figura 3.4. Malla Principal en 1D

Aplicando la ecuación de momentum en dirección x sobre el nodo "P" (Figura 3.4) se observa la dificultad de la representación del término de gradiente de presión, $-\frac{\partial P}{\partial x}$, integrando sobre los

límites del VC, el gradiente de presión queda aproximado como $P_w - P_e$, lo cual representa la presión ejercida por las presiones sobre el VC.

Al no tener la información de la presión en las interfaces de sus volúmenes de control se debe realizar una interpolación lineal a partir de los valores existentes en los nodos vecinos. En otras palabras se aproxima como:

$$P_w - P_e = \frac{P_w + P_P}{2} - \frac{P_P + P_E}{2} = \frac{P_w - P_E}{2} \quad (37)$$

Considerando los valores de la Figura 3.4, dado que la evaluación del gradiente de presión es la diferencia entre W y E, puede resultar una estimación irreal debido a que el gradiente de presión sería 0, indicando que las ecuaciones de momentum tendrían una distribución constante de presión, y esto a su vez sería una inconsistencia.

3.6.3 Secuencia de operación del algoritmo SIMPLE y SIMPLEC

El algoritmo SIMPLE es numéricamente eficiente y estable en el manejo de fluidos compresibles como incompresibles, además de ser muy utilizado para modelar todo tipo de fluidos y geometrías. El método resuelve las ecuaciones de conservación mediante la suposición de un campo de presiones y velocidades, realizando posteriormente una corrección de estas después de su cálculo, este proceso se realiza de manera iterativa hasta llegar a la solución correcta.

Es necesario descomponer el término Fuente de forma que se pueda introducir el término de la presión dentro de las ecuaciones de momentum (2a y 2b).

$$b = -A_e(P_E - P_P) + b^u \quad (38)$$

$$b = -A_n(P_N - P_P) + b^v \quad (39)$$

Los términos $-A_e(P_E - P_P)$ y $-A_n(P_N - P_P)$, representan la fuerza de presión que actúa sobre el volumen de control dado. Mientras que $A_e = \Delta y$ y $A_n = \Delta x$ representan el área del VC que atraviesa el flux correspondiente (convectivo y/o difusivo) para el caso bidimensional.

Una vez introducido el término de la presión en las ecuaciones de momentum, se pueden reordenar. Reescribiendo las ecuaciones de momentum discretizadas sobre su respectiva malla desplazada como,

$$a_{i,j}^u u_{i,j} = a_e^u u_e = \sum_{vecinos} a_{vecinos}^u u_{vecinos} - A_e(P_E - P_P) + b^u \quad (40a)$$

$$a_{i,j}^v v_{i,j} = a_n^v v_n = \sum_{vecinos} a_{vecinos}^v v_{vecinos} - A_n(P_N - P_P) + b^v \quad (40b)$$

Sin embargo para resolver las ecuaciones de velocidad (40a y 40b) se necesitan conocer los campos de presiones o de lo contrario estimarla, de ser así, es necesario proponer un campo de presiones P^* . Para saber si el campo de presiones propuesto es correcto, es necesario que satisfaga las ecuaciones de continuidad, debido a esta razón se resuelve un nuevo campo de velocidades derivado de las Ecs. (40a y 40b) como:

$$a_e^u u_e^* = \sum_{vecinos} a_{vecinos}^u u_{vecinos}^* - A_e(P_E^* - P_P^*) + b^u \quad (41a)$$

$$a_n^v v_n^* = \sum_{vecinos} a_{vecinos}^v v_{vecinos}^* - A_n(P_N^* - P_P^*) + b^v \quad (41b)$$

Debido a que existe una aportación tanto convectiva (F) como difusiva (D) es necesario definir las ecuaciones para estas aportaciones, tanto en la malla “ u ” (Ec. 42 y 43), como “ v ” (Ec. 44 y 45). Es necesario realizar una interpolación debido a los arreglos de la malla, así, utilizando una aproximación lineal y utilizando la notación de la Figura 3.5 se tiene que,

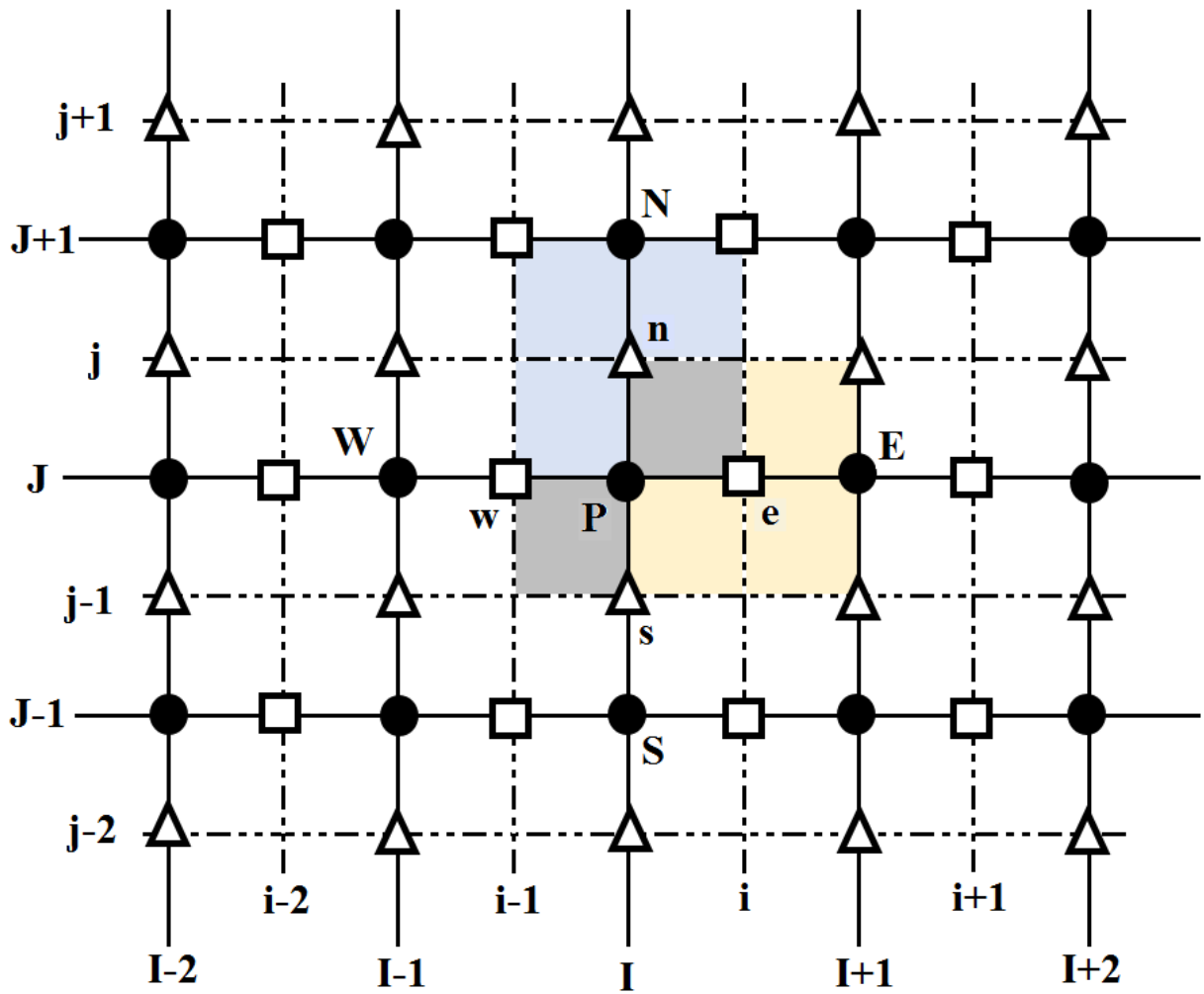


Figura 3.5. Malla Principal (\bullet), Malla Desplazada en Dirección x (\square) y Malla Desplazada en Dirección y (Δ)

“ u ”

$$F_e^u = (\rho u)_E A_e = \frac{(\rho u)_{i,J} + (\rho u)_{i+1,J}}{2} A_e$$

$$F_w^u = (\rho u)_P A_w = \frac{(\rho u)_{i-1,J} + (\rho u)_{i,J}}{2} A_w$$

$$F_n^u = (\rho v)_{i,j} A_n = \frac{(\rho v)_{I,j} + (\rho v)_{I+1,j}}{2} A_n$$

$$F_s^u = (\rho v)_{i,j-1} A_s = \frac{(\rho v)_{I,j-1} + (\rho v)_{I+1,j-1}}{2} A_s$$

$$D_e^u = \left(\frac{\Gamma}{\delta x} \right)_E A_e = \frac{\Gamma_{i+1,J}^u}{(x_{i+1}^u - x_i^u)} A_e$$

$$D_w^u = \left(\frac{\Gamma}{\delta x} \right)_P A_w = \frac{\Gamma_{i,J}^u}{(x_i^u - x_{i-1}^u)} A_w$$

$$D_n^u = \left(\frac{\Gamma}{\delta y} \right)_{i,j} A_n = \frac{\Gamma_{I,J}^u + \Gamma_{I,J+1}^u + \Gamma_{I+1,J}^u + \Gamma_{I+1,J+1}^u}{4(y_{J+1}^u - y_J^u)} A_e$$

$$D_s^u = \left(\frac{\Gamma}{\delta y} \right)_{i,j-1} A_s = \frac{\Gamma_{I,J-1}^u + \Gamma_{I,J}^u + \Gamma_{I+1,J-1}^u + \Gamma_{I+1,J}^u}{4(y_J^u - y_{J-1}^u)} A_s$$

(42)

(43)

“v”

$$F_e^v = (\rho u)_{i,j} A_e = \frac{(\rho u)_{i,j} + (\rho u)_{i,j+1}}{2} A_e$$

$$F_w^v = (\rho u)_{i-1,j} A_w = \frac{(\rho u)_{i-1,j} + (\rho u)_{i-1,j+1}}{2} A_w$$

$$F_n^v = (\rho v)_N A_n = \frac{(\rho v)_{l,j} + (\rho v)_{l,j+1}}{2} A_n$$

$$F_s^v = (\rho v)_P A_s = \frac{(\rho v)_{l,j-1} + (\rho v)_{l,j}}{2} A_s$$

$$D_e^v = \left(\frac{\Gamma}{\delta x} \right)_{i,j} A_e = \frac{\Gamma_{l,j}^v + \Gamma_{l,j+1}^v + \Gamma_{l+1,j}^v + \Gamma_{l+1,j+1}^v}{4(x_{l+1}^v - x_l^v)} A_e$$

$$D_w^v = \left(\frac{\Gamma}{\delta x} \right)_{i-1,j} A_w = \frac{\Gamma_{l-1,j}^v + \Gamma_{l-1,j+1}^v + \Gamma_{l,j}^v + \Gamma_{l,j+1}^v}{4(x_l^v - x_{l-1}^v)} A_w$$

$$D_n^v = \left(\frac{\Gamma}{\delta y} \right)_N A_n = \frac{\Gamma_{l,j+1}^v}{(y_{j+1}^v - y_j^v)} A_n$$

$$D_s^v = \left(\frac{\Gamma}{\delta y} \right)_P A_s = \frac{\Gamma_{l,j}^v}{(y_j^v - y_{j-1}^v)} A_s$$

(44)

(45)

Para obtener el campo de presión correcto se propone el uso de una corrección de presión “P” de forma que se utilice tanto la presión propuesta P^* inicialmente como la que se acaba de calcular con las ecuaciones (41a y 41b), quedando como:

$$P = P^* + P' \tag{46}$$

De esta forma se asegura que el campo de velocidades cumplirá la continuidad, análogamente esta modificación de la presión implica la necesidad de una modificación de los campos de velocidad, utilizando tanto las velocidades propuestas u^* , v^* inicialmente como también las velocidades calculadas con las ecuaciones (41a y 41b), las cuales se expresan de la forma:

$$u = u^* + u' \quad (47)$$

$$v = v^* + v'$$

Como se puede observar, para el caso de u (análogamente para “ v ”) en las Ecs. 47, es necesario conocer u^* y u' para obtener la velocidad correcta “ u ”, sin embargo, hasta el momento solo se tiene la ecuación para conocer u^* .

Una forma de obtener una expresión para “ u' ” (análogamente para “ v' ”), es restando las ecuaciones de momentum correctas (40) de las supuestas (41), se puede obtener una ecuación de la forma:

$$a_p^u (u_p - u_p^*) = \sum_{vecinos} a_{vecinos}^u (u_{vecinos} - u_{vecinos}^*) - A_e [(P_E - P_E^*) - (P_P - P_P^*)] + b^u \quad (48)$$

Como se puede observar las velocidades quedan de forma equivalente al despeje de u' de la Ec. (47), sustituyendo u' :

$$a_e^u u'_e = \sum_{vecinos} a_{vecinos}^u u'_{vecinos} - A_e (P'_E - P'_P) + b^u \quad (49)$$

$$a_e^v v'_e = \sum_{vecinos} a_{vecinos}^v v'_{vecinos} - A_n (P'_N - P'_P) + b^v$$

El algoritmo SIMPLE se caracteriza en asumir que los términos $\sum a_{vecinos}^u u'_{vecinos}$ y $\sum a_{vecinos}^v v'_{vecinos}$ de las ecuaciones (49) son cero, de esta manera se simplifica la relación entre las velocidades de corrección y la presión de corrección, sin embargo, esto puede provocar una inconsistencia.

En este punto radica la diferencia con el algoritmo SIMPLER, ya que en este no se omiten los términos de sumatoria de los coeficientes vecinos multiplicada por la corrección de velocidad, sino que se resta en ambos lados de la ecuación, quedando como:

$$(a_e^u - \sum a_{vecinos}^u) u'_e = \sum a_{vecinos}^u (u'_{vecinos} - u'_e) - A_e(P'_E - P'_P) + b^u \quad (50a)$$

$$(a_e^v - \sum a_{vecinos}^v) v'_e = \sum a_{vecinos}^v (v'_{vecinos} - v'_n) - A_n(P'_N - P'_P) + b^v \quad (50b)$$

Como es evidente para este algoritmo, no solo se asume, sino que al introducir los términos de las sumatorias en ambos lados de la ecuación, el término $\sum a_{vecinos}^u (u'_{vecinos} - u'_e)$ se hace nulo.

Así, entonces, despejando u' y v' de las Ecs. 50a, y 50b, se pueden reescribir como:

$$u'_e = d_e^u (P'_P - P'_E) \quad (51a)$$

$$v'_n = d_n^v (P'_P - P'_N) \quad (51b)$$

La diferencia, como ya se había comentado antes, se encuentra en la definición de los términos d_e^u y d_n^v :

SIMPLE

$$d_e^u = \frac{A_e}{a_e^u} \quad (52a)$$

$$d_n^v = \frac{A_n}{a_n^v} \quad (52b)$$

SIMPLEC

$$d_e^u = \frac{A_e}{a_e^u - \sum a_{vecinos}^u} \quad (53c)$$

$$d_n^v = \frac{A_n}{a_n^v - \sum a_{vecinos}^v} \quad (53d)$$

Para el caso del algoritmo SIMPLE, las velocidades de corrección (51a y 51b) se aproximarán a su valor correcto mediante un proceso iterativo, debido a que estas ecuaciones dependen únicamente de la variación de la presión de corrección es necesario relajar el valor de la misma para asegurar la convergencia. Por el contrario, gracias a la estabilidad que ofrece el algoritmo SIMPLEC no es necesario relajar la presión.

Una vez que se conoce u^* y u' , es posible calcular “ u ” mediante las Ec. 47 (Análogamente para “ v ”), o sustituyendo el valor de u' , como:

$$u_{i,j} = u_e = u_e^* + d_e^u (P'_P - P'_E) \quad (54)$$

$$v_{i,j} = v_n = v_n^* + d_n^v (P'_P - P'_N)$$

Al igual que se necesitaba información adicional de u' , es decir, una ecuación para calcular la velocidad de corrección. Es necesario conocer la presión de corrección “ P' ”. Esta ecuación se determina a partir de la ecuación de continuidad, al integrarla sobre un VC,

$$\frac{(\rho_P - \rho_P^0)}{\Delta t} \Delta V + [(\rho u A)_e - (\rho u A)_w] + [(\rho v A)_n - (\rho v A)_s] = 0 \quad (55)$$

Sustituyendo las Ecs (54) en la ecuación anterior se obtiene una ecuación expresada en función de la presión, como:

$$a_P P'_P = a_E P'_E + a_W P'_W + a_N P'_N + a_S P'_S + b' \quad (56)$$

De donde:

$$a_E = \rho_e d_e^u A_e \quad (57)$$

$$a_W = \rho_w d_w^u A_w \quad (58)$$

$$a_N = \rho_n d_n^v A_n \quad (59)$$

$$a_S = \rho_s d_s^v A_s \quad (60)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (61)$$

$$b = \frac{(\rho_P^0 - \rho_P)}{\Delta t} \Delta V + [(\rho u^* A)_w - (\rho u^* A)_e] + [(\rho v^* A)_s - (\rho v^* A)_n] \quad (62)$$

El término b será igual a cero cuando las velocidades estimadas satisfagan la ecuación de continuidad. Por lo tanto a medida que el proceso iterativo converja, la solución de las ecuaciones de conservación del término b debe tender a cero.

A continuación se muestran los pasos de los cuales se compone el método SIMPLE:

Paso 1:

Asignar P^* , u_{guess} , v_{guess} , φ^*

Paso 2:

Resolver las ecuaciones de momentum para resolver u^* , v^*

Paso 3:

Resolver la ecuación de corrección de presión para obtener P'

Paso 4 y 5:

Corregir Presión y Velocidades

Paso 6:

Resolver otras ecuaciones como de energía, especies químicas, etc.

Paso 7:

Aplicar el criterio de convergencia

Paso 8:

Definir si continuará iterando o si cumplió con el criterio de convergencia.

La Figura 3.6, muestra mediante un diagrama de flujo el proceso a seguir para implementar el algoritmo SIMPLEC.

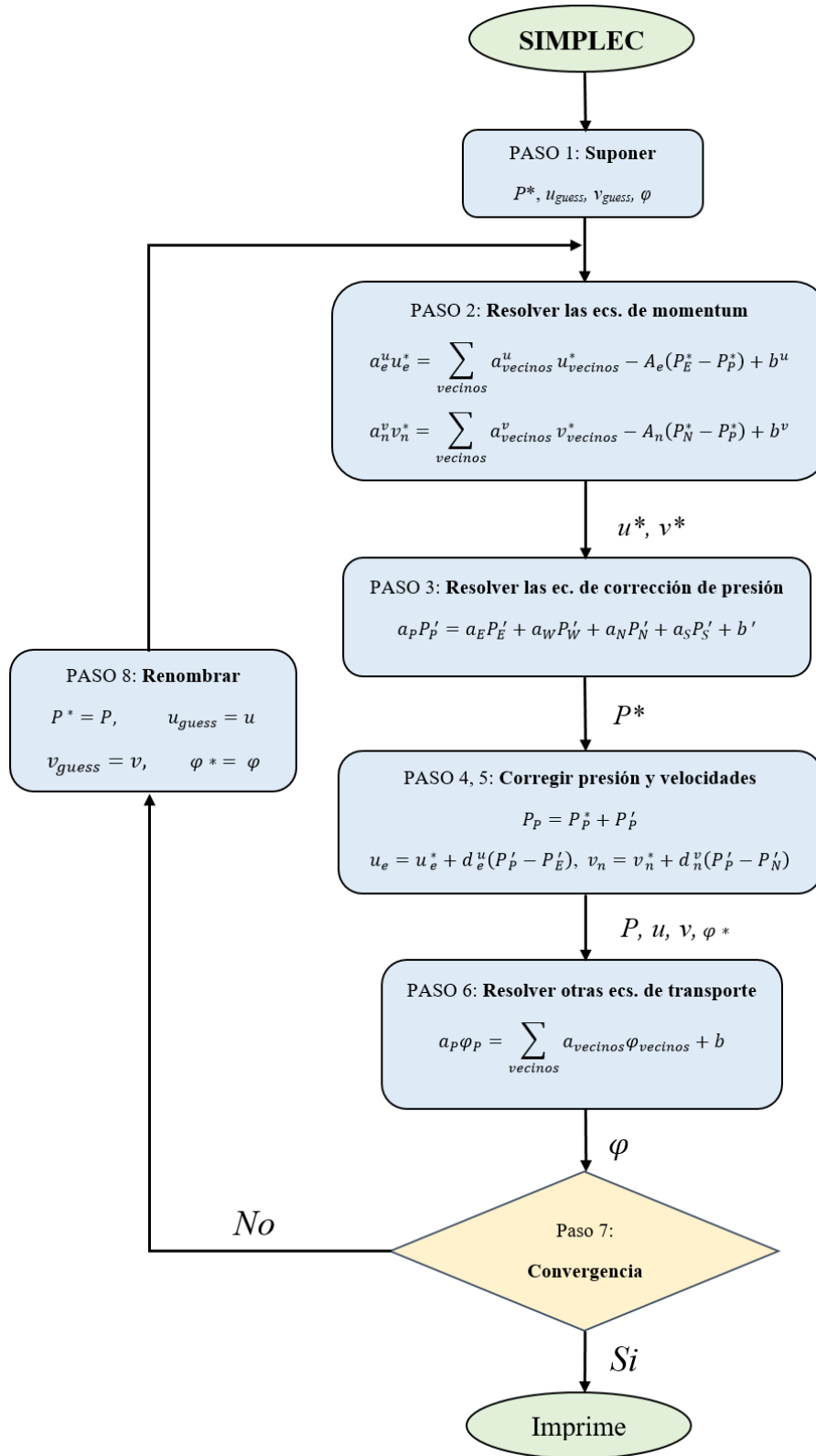


Figura 3.6. Algoritmo SIMPLEC

3.7 CONDICIONES DE FRONTERA

Para solucionar problemas que representan fenómenos mediante ecuaciones diferenciales es necesario conocer las condiciones bajo las cuáles se encuentra el mismo, ya que estas condiciones tienen una influencia directa en su comportamiento.

La solución requiere de condiciones iniciales, las cuales corresponden a las variables fijadas para un tiempo de referencia; y condiciones de frontera, que definen el valor de la variable dependiente en las fronteras del modelo físico bajo estudio.

Gracias a la forma en que se manejan las ecuaciones en el método de Volumen Finito, es fácil asignar el valor de una propiedad en los nodos fronteras. Las condiciones de frontera más comunes son:

- Condición de Dirichlet
- Condición de Neuman
- Condición de Robin

3.7.1 Condición de Dirichlet (Condición de Primera Clase)

Es la condición de frontera más común encontrada en CFD. Se basa en establecer un valor de la variable φ en la frontera, pudiendo ser una función dependiente del espacio y/o el tiempo, o simplemente un valor constante.

$$\varphi = \varphi_{Frontera}$$

Discretizando la condición de frontera a partir de la ecuación en notación de coeficientes agrupados (63),

$$a_P \varphi_P = a_E \varphi_E + a_W \varphi_W + a_N \varphi_N + a_S \varphi_S + b \quad (63)$$

Haciendo la analogía:

$$\begin{aligned} a_P &= 1 \\ a_E &= a_W = a_N = a_S = 0 \\ b &= \varphi_{Frontera} \end{aligned} \quad (64)$$

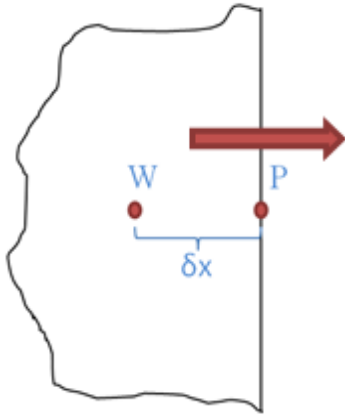
3.7.2 Condición de Neuman (Condición de Segunda Clase)

En este tipo de condición de frontera, se impone un gradiente de la variable φ en dirección normal a la frontera igual a una función del espacio y/o tiempo; sin embargo también es posible tener el gradiente igual a un valor constante. Un caso muy particular en transferencia de calor, es cuando la frontera cuenta con una condición adiabática, en este caso el gradiente es igual a cero.

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{Frontera} = f(x_n)$$

Para expresar esta condición de frontera en términos de coeficientes agrupados, es necesario realizar una aproximación numérica mediante un esquema centrado. Por ejemplo para la frontera Este:

FRONTERA ESTE



$$\frac{\partial \varphi}{\partial \eta} = \frac{\varphi_W - \varphi_P}{\delta X_{PW}}$$

$$\frac{\varphi_W - \varphi_P}{\delta X_{PW}} = A$$

$$\varphi_P = \varphi_W - A \delta x_{PW}$$

COEFICIENTES

$$a_E = 0$$

$$a_W = 1$$

$$a_N = 0$$

$$a_S = 0$$

$$a_P = 1$$

$$b = -A \delta x_{PW}$$

3.7.3 Condición de Robín (Condición de Tercera Clase)

En realidad este tipo de frontera es una combinación de las condiciones de frontera de primera y segunda clase; y establece que la frontera se encuentra gobernada por una ecuación diferencial de primer orden no homogénea,

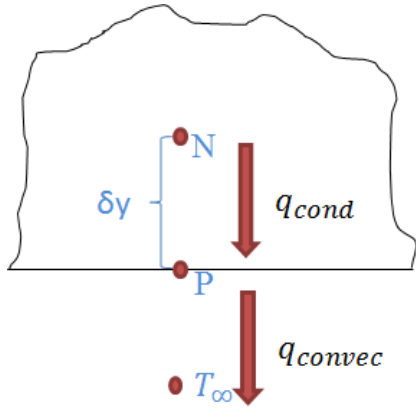
$$a \cdot \frac{\partial \varphi_{frontera}}{\partial n} + b \cdot \varphi_{frontera} = f(x_n)$$

De donde a y b son constantes diferentes de cero. Este tipo de ecuaciones son aplicadas para el caso de fronteras convectivas. Así entonces $a = \lambda$ (conductividad térmica), $b = h$ (coeficiente convectivo) y $f(x_n) = h\varphi_{medio}$. Sustituyendo estas condiciones se observa que,

$$\lambda \frac{\partial \varphi_{frontera}}{\partial n} = h(\varphi_{medio} - \varphi_{frontera})$$

FRONTERA NORTE

COEFICIENTES



$$q_{COND} = q_{CONV}$$

$$a_E = 0$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = h (T_\infty - T_P)$$

$$a_W = 0$$

$$-\lambda \left[\frac{T_N - T_P}{\delta y_{PN}} \right] = h (T_\infty - T_P)$$

$$a_N = \frac{\lambda}{\delta y_{PN}}$$

$$a_S = 0$$

$$\frac{-\lambda}{\delta y_{PN}} T_N + \frac{-\lambda}{\delta y_{PN}} T_P = h T_\infty - h T_P$$

$$a_P = \frac{\lambda}{\delta y_{PN}} + h$$

$$\left[\frac{\lambda}{\delta y_{PN}} + h \right] T_P = \frac{\lambda}{\delta y_{PN}} T_N + h T_\infty$$

$$b = h T_\infty$$

3.7.4 Condiciones de Frontera para la ecuación de la Presión Corregida

La ecuación de presión a diferencia de las ecuaciones de momentum, no es una ecuación básica de conservación, por lo cual es necesario un tratamiento en sus condiciones de frontera. Generalmente existen dos condiciones de frontera (Patankar, 1980). La primera sucede cuando la presión en la frontera es conocida y la velocidad desconocida; por otra parte se tiene el caso cuando la componente de la velocidad normal a la frontera esta prescrita.

- *Presión conocida en la frontera.* Esta sucede cuando el campo de presión estimado P^* es arreglado de tal forma que en la frontera $P^* = P_{frontera}$, entonces el valor de “ P ” en la frontera debe ser cero.
- *Velocidad normal a la frontera conocida.* Para que esto pueda suceder, la malla principal se diseña de tal forma que la frontera coincide con la interface del VC (Figura 3.7) y conociendo la velocidad v_n ; de esta forma al derivar la ecuación para P' sobre el

volumen de control, no es necesario que la cantidad de flujo a través de la frontera $(\rho v A)_n$ sea expresada en términos de v_n^* , pero si en términos de v_n . Así, no se recurre a P'_N y a_N tiene un valor igual a cero en la ecuación de P' . Considerando esto, ninguna información acerca de P'_N es necesario.

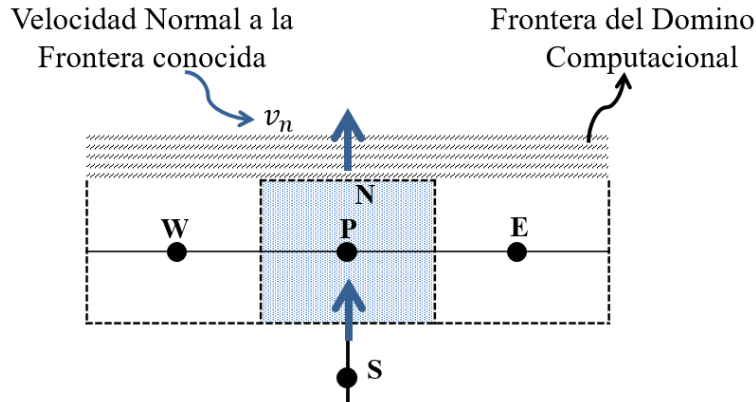


Figura 3.7. Volumen de Control 1D para la Velocidad Normal a la Frontera

3.8 MÉTODO DE SOLUCIÓN DE ECUACIONES ALGEBRAICAS

Después de haber discretizado las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas más sencillas, es necesario implementar algún método de solución para poder obtener la información correcta de la variable de interés ϕ . Sin embargo estas ecuaciones pueden ser lineales o no-lineales, y su complejidad depende de diversos factores como la dimensión del problema, número de puntos en la malla y de la estrategia de discretización.

Principalmente existen dos formas de clasificar los métodos de solución: directos e iterativos. Los métodos directos involucran cierto número de operaciones que son necesarias para la solución, sin embargo este número de operaciones pueden llegar a ser exponenciales al número de las ecuaciones por resolver, lo que implica una gran cantidad de memoria en los sistemas de cómputo. Por su parte los métodos iterativos implican la aplicación de algoritmos sencillos en repetidas ocasiones hasta cumplir un criterio de convergencia, además, en comparación con los directos requieren mucho menor costo de cómputo, lo cual los hace más factibles de utilizar.

Algunos de los métodos iterativos más comunes son el método de Jacobi y Gauss-Seidel, los cuales son empleados incluso para resolver grandes sistemas de ecuaciones algebraicas.

Las ecuaciones algebraicas a resolver forman una matriz de coeficientes agrupados, que generalmente es de forma tridiagonal, pentadiagonal, y heptadiagonal para los casos unidimensional, bidimensional y tridimensional, respectivamente (Patankar, 1980). Sin embargo, dado que los algoritmos para la solución de matrices están diseñados para matrices tridiagonales, se busca poder expresar las pentadiagonales y heptadiagonales en forma tridiagonal. Los algoritmos tri-diagonal matrix (TDMA) o también llamado Algoritmo de Thomas es utilizado para solucionar matrices tridiagonales de manera eficiente.

Algunos métodos utilizados variantes del TDMA, son:

- Método línea por línea en dirección X (LBL-X)
- Método línea por línea en dirección Y (LBL-Y)
- Método línea por línea en direcciones alternantes (LBL-ADI)
- Método Gauss-Seidel de línea por línea de en dirección X (LGS-X)
- Método Gauss-Seidel de línea por línea de en dirección Y (LGS-Y)
- Método Gauss-Seidel de línea por línea en direcciones alternantes (LGS-ADI)

En este trabajo se utiliza el método LGS-ADI el cuál es una combinación del método LGS-X y LGS-Y; ya que por la forma de solucionar las ecuaciones brinda una mejor y más rápida convergencia de la solución.

3.9 CRITERIO DE CONVERGENCIA

Mediante el uso de métodos iterativos para la solución del sistema de ecuaciones algebraicas, se busca aproximarse a la solución de la Ecuación Diferencial, sin embargo, esta aproximación se realiza de manera asintótica. En los procesos iterativos pueden presentarse el caso en que la solución diverge, es decir, en lugar de aproximarse a la solución se aleja de ella; o el caso en el que la solución converge, que es cuando su comportamiento tiene una tendencia a la solución. Además de los casos anteriores se tiene el caso en el que el comportamiento de la solución es inestable y se caracteriza por oscilaciones, sin embargo no significa que diverja o converja.

Una forma de monitorear si la tendencia que tiene la solución es a cualquiera de los casos antes mencionados es mediante el uso de criterios de convergencia del proceso iterativo.

A pesar de que existen distintos criterios de convergencia, en esta metodología se utiliza el residual másico y el de desviación cuadrática.

Residual Másico. Se utiliza para comprobar que la solución además de converger, cumple con el principio de continuidad en cada volumen de control.

$$R_{masico} = \frac{\max \left[\frac{(\rho_P^0 - \rho_P)}{\Delta t} \Delta V + [(\rho u^*)_w - (\rho u^*)_e] \Delta y + [(\rho v^*)_s - (\rho v^*)_n] \Delta x \right]}{\sum_{v.c.} \rho_P \Delta x \Delta y / \Delta t} \leq \varepsilon_{masico}$$

Residual de Desviación Cuadrática Media. Es una mejora del residual global, el cual permite obtener un valor único para todo dominio computacional.

$$R_\varphi = \sqrt{\sum_{v.c.} \left[a_P \varphi_P - \left(\sum_{vecinos} a_{vecinos} \varphi_{vecinos} + b \right) \right]^2} \leq \varepsilon_{masico}$$

3.10 VERIFICACIÓN DEL CÓDIGO

En esta sección se presenta la verificación del código numérico que se desarrolló para la solución del modelo matemático planteado anteriormente. La verificación se llevó a cabo mediante casos de referencia reportados en la literatura, tales casos se pueden observar en la Figura 3.8: “Problema de Cavity Cuadrada con Pared Deslizante”, “Convección Natural en una Cavity Cuadrada Calentada Diferencialmente”, “Cavity Calentada Diferencialmente con Solido Conductor Embebido” y “Cavity Calentada Diferencialmente con Paredes Gruesas Conductoras”.

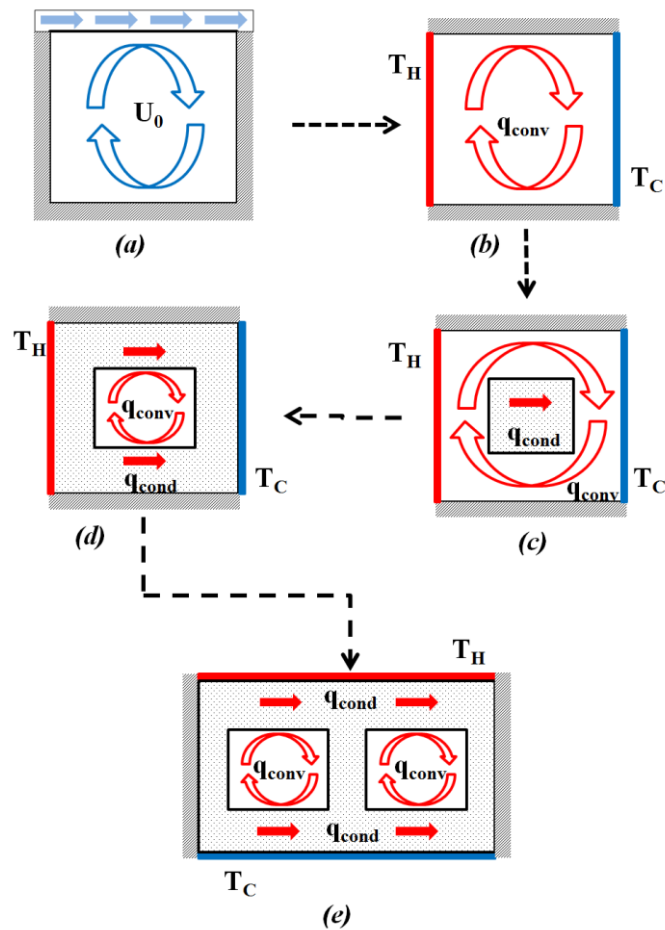


Figura 3.8. a) Problema de Cavity Cuadrada con Pared Deslizante, b) Convección Natural en una Cavity Cuadrada Calentada Diferencialmente, c) Cavity Calentada Diferencialmente con Sólido Conductor Embebido y d) Cavity Calentada Diferencialmente con Fluido Embebido.

3.10.1 Problema de Cavity con Pared Deslizante

Una vez implementado el algoritmo SIMPLEC en la técnica de Volumen Finito, se recurre a un estudio de la literatura (Guia et al, 1982) para probar y evaluar el mismo. Consiste en un problema conocido como “Driven-Cavity Problem”, en donde se puede observar flujo laminar e incompresible, en una cavidad cuadrada de ancho Hx y largo Hy , respectivamente, en donde la pared superior se desliza a una velocidad uniforme U_0 . En el estudio se considera flujo newtoniano e incompresible en régimen laminar con distintos número de Reynolds (100-10000), además de valores de velocidad a lo largo de una línea vertical y horizontal sobre el centro geométrico para u y v , respectivamente.

En la Figura 3.9 se muestra el modelo físico del problema a resolver. Se puede observar las velocidades en todas las paredes son igualadas a “0” para u y v , a excepción de la pared superior en donde $u=U_0$.

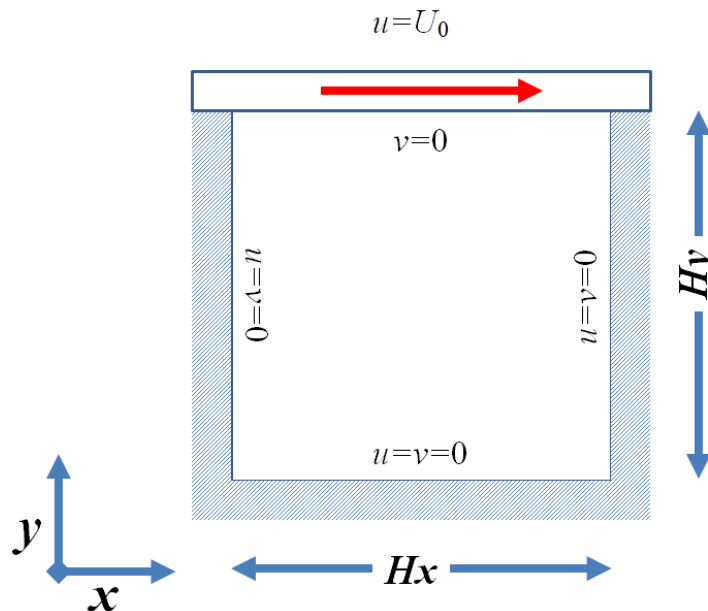


Figura 3.9. Modelo Físico del Problema de Cavity con Pared Deslizante.

Por su parte las ecuaciones implicadas para en este problema se expresan de la siguiente forma:

- Ecuación de Conservación de Masa

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (65)$$

- Ecuaciones de Conservación de Momentum

$$\frac{\partial(\rho u \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot u)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (66)$$

$$\frac{\partial(\rho u \cdot v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \cdot v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} \quad (67)$$

- Condiciones de Frontera de la Cavidad

$$u=v=0, \quad x=0, \quad 0 < y < Hy$$

$$u=v=0, \quad x=Hx, \quad 0 < y < Hy$$

$$u=v=0, \quad y=0, \quad 0 < x < Hx$$

$$u=U_0, \quad v=0, \quad y=Hy, \quad 0 < x < Hx$$

Utilizando la metodología del algoritmo SIMPLEC junto con el esquema Híbrido se resolvió para valores de Reynolds de: a) Re=100, b) Re=400 y c) Re=1000; las mallas utilizadas fueron 61x61, 121x121 y 129x129, respectivamente. En cuanto a la resolución de las ecuaciones algebraicas se empleó el algoritmo LGS-ADI junto a un criterio de convergencia de 1×10^{-10} en u , v y P . El fluido contenido en el interior de la cavidad considera las siguientes propiedades: $\lambda=0.0278$ W/(K m), $\rho=1.2047$ kg/m³, $CP=1007$ J/(K kg), $\mu=1.817E-05$ kg/s m.

A continuación se muestra una comparación de los resultados de las componentes de velocidad de u y v del algoritmo SIMPLEC con el de referencia reportado por Guia et al. (1982), para distintos Reynolds.

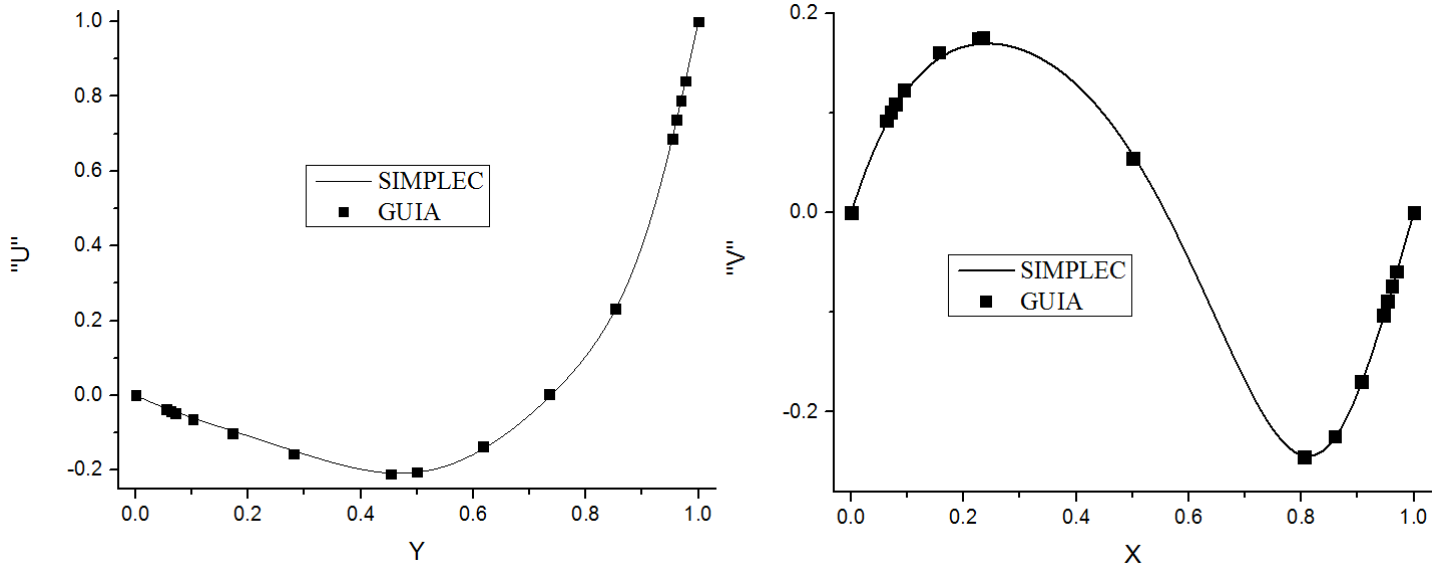


Figura 3.10. Componentes de Velocidad para un $Re=100$ y 61×61 nodos

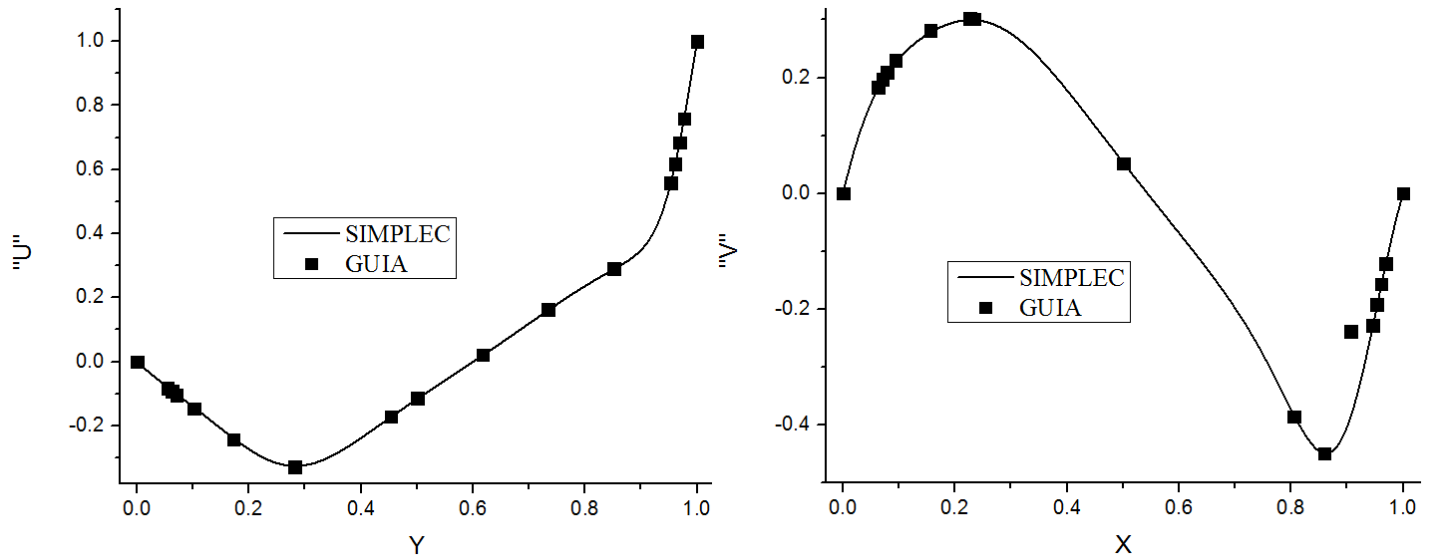


Figura 3.11. Componentes de Velocidad para un $Re=400$ y 121×121 nodos

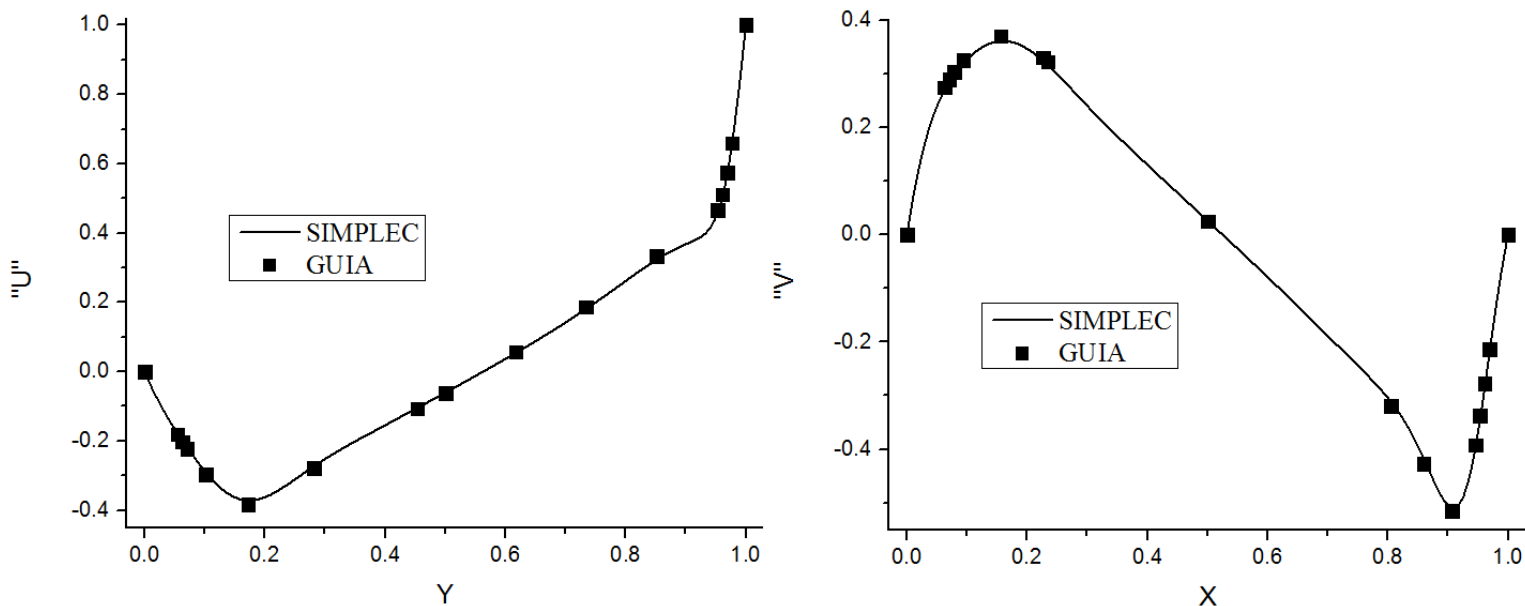


Figura 3.12. Componentes de Velocidad para un Re=1000 y 129x129 nodos

Una vez que se observó que los resultados coinciden cualitativamente con los reportados en la literatura, se procede a realizar una comparación cuantitativa mediante el cálculo del error relativo porcentual de la siguiente manera:

$$Error = \left| \frac{valor\ obtenido - valor\ Guia}{valor\ Guia} \right| \times 100$$

Una vez calculado el error relativo porcentual se pudo encontrar que los resultados obtenidos son aceptables al encontrarse por debajo de un 10% con una diferencia máxima de 6.53% para “u” en el caso del Reynolds de 400 y una diferencia mínima de 3.87% para “v” en el caso del Reynolds de 100.

3.10.2 Convección Natural en una Cavity Cuadrada Calentada Diferencialmente

En cuanto a problemas en los que interviene la transferencia de calor por conducción y convección es necesario utilizar una aproximación para resolver el acople entre la temperatura y la densidad del fluido. La aproximación de Boussinesq (Ec. 68) permite considerar las propiedades constantes en todo el campo excepto en el término de flotación, en donde el cambio de temperatura en el fluido provoca un cambio en su densidad y a su vez el movimiento del mismo; su objetivo se basa en suponer que la diferencia de inercia es despreciable pero la gravedad es suficientemente fuerte para provocar una diferencia significativa en el peso específico del fluido.

$$\rho_0 - \rho = \rho g \beta (T - T_0) \quad (68)$$

Donde T_0 es la temperatura de referencia, ρ_0 es la densidad correspondiente a esa temperatura, mientras que β es el coeficiente de expansión térmica.

Se modela una cavity cuadrada calentada diferencialmente en sus paredes verticales (Figura 3.13), siendo mayor la temperatura de la pared oeste que la temperatura en la pared este ($T_W > T_E$) y las paredes horizontales adiabáticas. Las cuatro paredes tienen una condición de no-deslizamiento. La cavity en su interior considera aire seco cuyo flujo es newtoniano e incompresible en régimen laminar. El fluido tiene las siguiente propiedades: $\lambda=25.63E-3$ W/(K m), $\rho=1.2047$ kg/m³, $C_p=1.004$ kJ/(K kg), $\mu=1.817E-05$ kg/s m, $\beta=3.411E-3$ K⁻¹, $g=9.81$ m/s² y $Pr=0.712$. Se consideraron además números de Rayleigh de 10^3 , 10^5 , 10^5 y 10^6 .

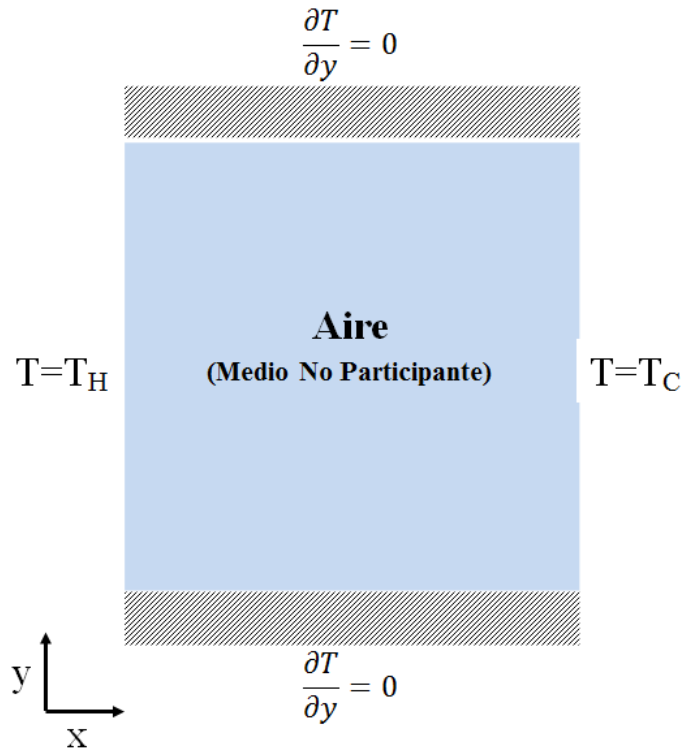


Figura 3.13. Modelo Físico de la Cavity Calentada Diferencialmente

Para verificar los resultados obtenidos es necesario recurrir al trabajo reportado por De Vahl Davis (1983), es necesario además, adimensionalizar los resultados para las escalas de longitud y velocidad, quedando H y $\sqrt{g\beta\Delta TH}$, respectivamente. El problema en forma adimensional queda en función del número de Rayleigh ($Ra = \rho g\beta\Delta TH^3/\alpha\nu$) y el número de Prandtl ($Pr = \nu/\alpha$), donde ν es la viscosidad cinemática y α es la difusividad térmica. Como se puede apreciar no se especifica la dimensión de la cavity (H), debido a que esta se determina con base al número de Rayleigh.

Partiendo del número de Rayleigh,

$$Ra = \frac{\rho g\beta\Delta TH^3}{\alpha\nu} \tag{69}$$

separando $\frac{1}{\alpha}$ para poder introducir Pr ,

$$Ra = \frac{\rho g \beta \Delta T H^3}{\nu} * \frac{1}{\alpha} \quad (70)$$

se multiplica por $\frac{\nu}{\nu}$, y se reacomoda la ecuación para tener $\frac{\nu}{\alpha}$,

$$Ra = \frac{\rho g \beta \Delta T H^3}{\nu^2} * \frac{\nu}{\alpha} \quad (71)$$

sustituyendo $\alpha = \lambda / \rho C p$,

$$Ra = \frac{\rho g \beta \Delta T H^3}{\nu^2} * \frac{\rho \nu C p}{\lambda} \quad (72)$$

Dado que el Prandtl también se puede definir como $Pr = \frac{\nu C p}{\lambda}$, se sustituye en la Ec. (72),

$$Ra = \frac{\rho^2 g \beta \Delta T H^3 Pr}{\nu^2} \quad (73)$$

donde despejando H , la Ec. (73), queda como:

$$H = \sqrt[3]{\frac{Ra \left(\frac{\nu}{\rho}\right)^2}{g \beta \Delta T Pr}} \quad (74)$$

considerando que es una cavidad cuadrada $HY = HX$.

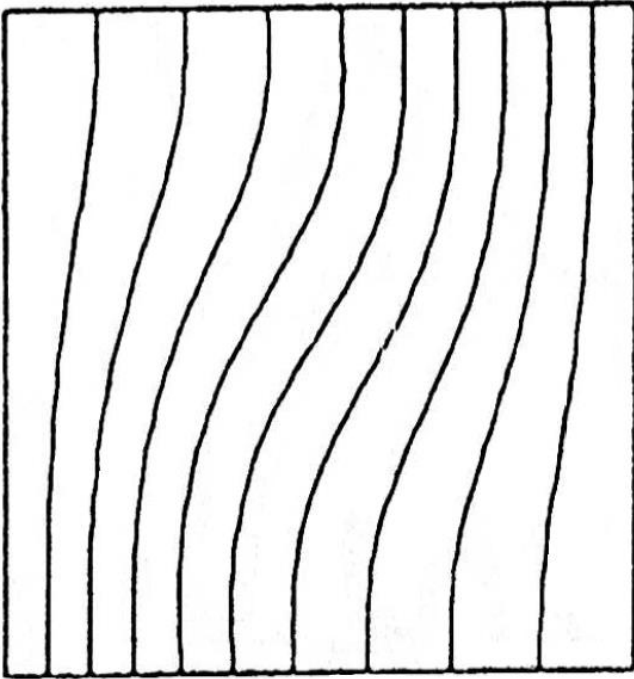


Figura 3.14. Mapa de Isothermas para un $Ra=10^3$
(Vahl Davis, 1983)

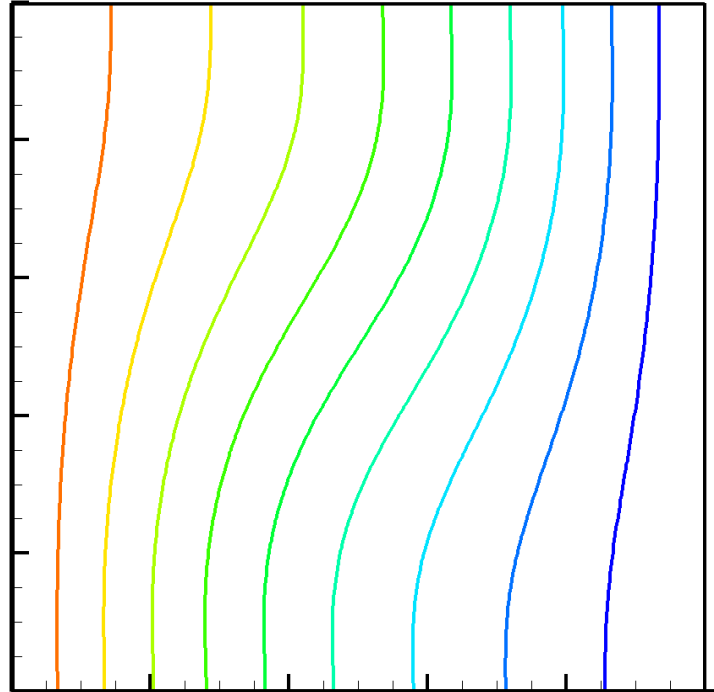


Figura 3.15. Mapa de Isothermas para un $Ra=10^3$
(Presente Estudio)

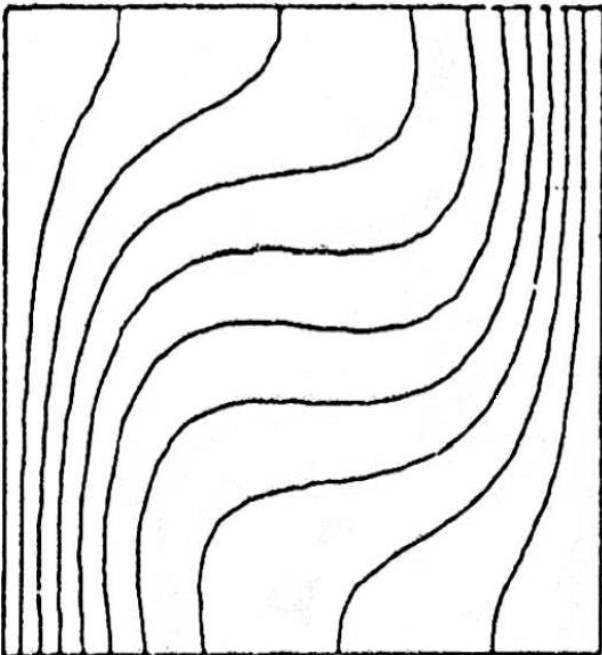


Figura 3.16. Mapa de Isothermas para un $Ra=10^4$
(Vahl Davis, 1983)

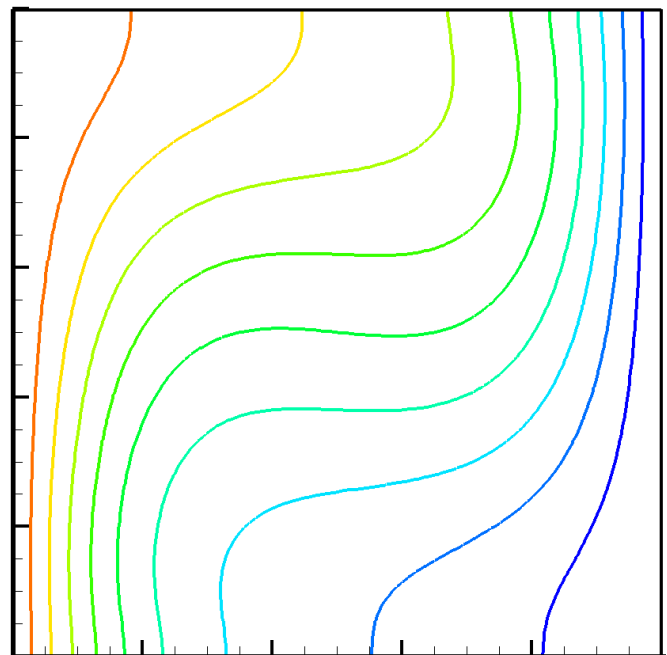


Figura 3.17. Mapa de Isothermas para un $Ra=10^4$
(Presente Estudio)

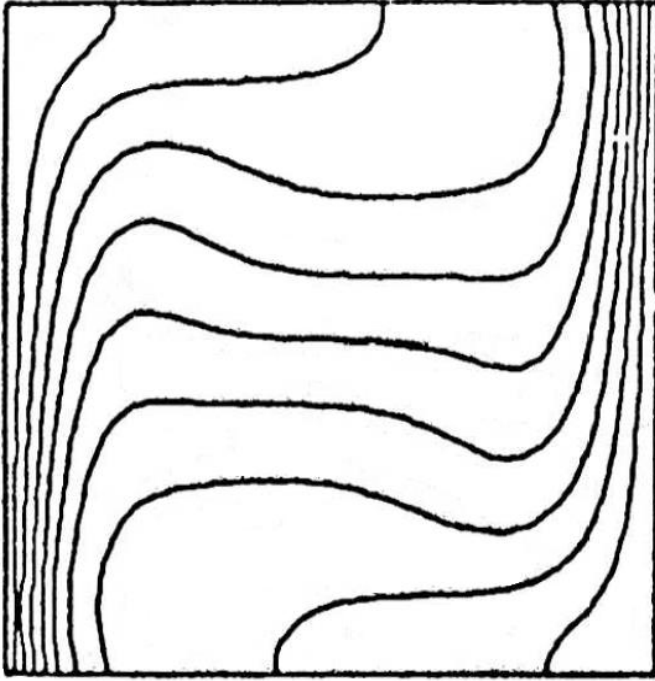


Figura 3.18. Mapa de Isotermas para un $Ra=10^5$
(Vahl Davis, 1983)

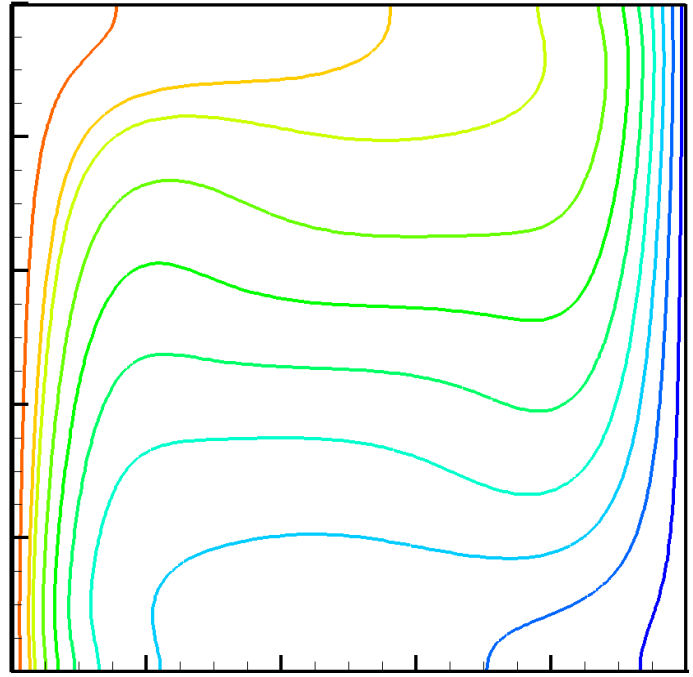


Figura 3.19. Mapa de Isotermas para un $Ra=10^5$
(Presente Estudio)

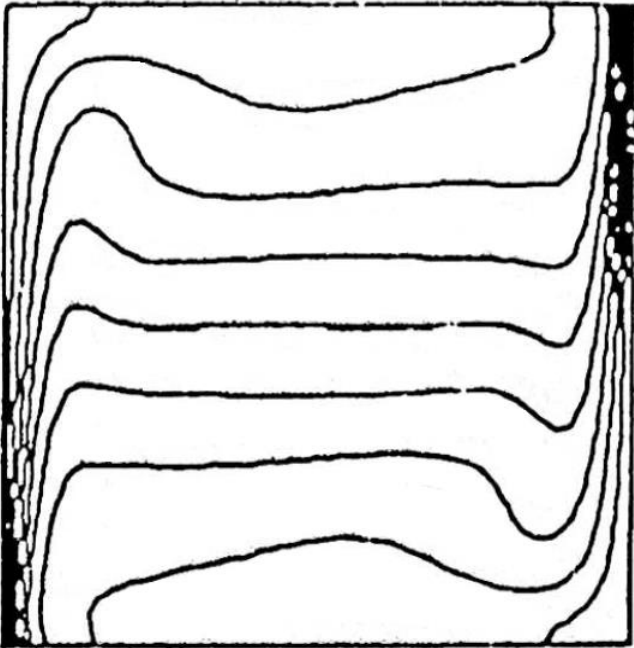


Figura 3.20. Mapa de Isotermas para un $Ra=10^6$
(Vahl Davis, 1983)

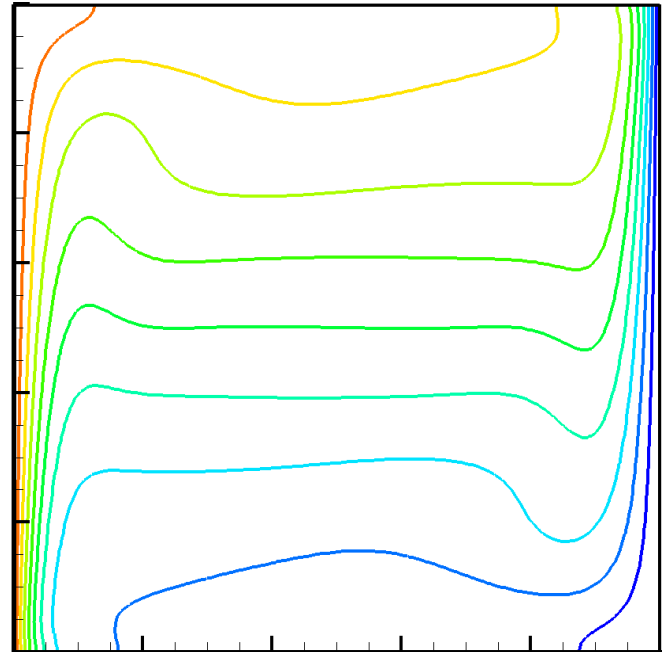


Figura 3.21. Mapa de Isotermas para un $Ra=10^6$
(Presente Estudio)

Cualitativamente los resultados coinciden con los reportados por Vahl Davis. Sin embargo es necesario realizar una comparación cuantitativa, la comparación se realiza mediante las componentes de velocidad adimensionales máximas (Ec. 75) y los números de Nusselt promedio (Ec. 77), máximo y mínimo en la pared caliente de la cavidad.

$$u_{max}^* = \frac{u_{max}}{\sqrt{g\beta\Delta TH}} \quad , \quad v_{max}^* = \frac{v_{max}}{\sqrt{g\beta\Delta TH}} \quad (75)$$

El número Nusselt local sobre la pared caliente se define con la razón de flujo de calor por convección local respecto al flujo de calor por conducción, esto es,

$$Nu_y = \frac{q_{conv}}{q_{cond}} = \frac{-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}}{-\lambda \frac{T_H - T_C}{H}} = \frac{T_H - T_y}{T_H - T_C} \cdot \frac{H}{\Delta x} \quad (76)$$

Donde, T_y es la temperatura del fluido en la posición y , y Δx es la diferencia horizontal a la cual se calcula esta temperatura con respecto a la pared vertical caliente. Finalmente, el número de Nusselt medio es el resultado de la integración sobre toda la pared vertical del número de Nusselt local:

$$Nu_{medio} = \frac{1}{h} \int_0^H Nu_y dy \quad (77)$$

Tabla 3.3. Resultados para un $Ra = 10^3$

	u_{max}	v_{max}	Nu_{max}	Nu_{min}	Nu_{medio}
Vahl Davis (1983)	0.137	0.139	1.501	0.694	1.116
Presente Estudio	0.135 (1.459)	0.137 (1.438)	1.508 (0.466)	0.698 (0.5763)	1.115 (0.089)

Tabla 3.4. Resultados para un $Ra = 10^4$

	u_{max}	v_{max}	Nu_{max}	Nu_{min}	Nu_{medio}
Vahl Davis (1983)	0.192	0.233	3.545	0.592	2.234
Presente Estudio	0.191 (0.52)	0.231 (0.858)	3.549 (0.112)	0.599 (1.182)	2.235 (0.044)

Tabla 3.5. Resultados para un $Ra = 10^5$

	u_{max}	v_{max}	Nu_{max}	Nu_{min}	Nu_{medio}
Vahl Davis (1983)	0.130	0.257	7.761	0.736	4.510
Presente Estudio	0.133 (2.307)	0.257 (0.00)	7.804 (0.554)	0.774 (5.163)	4.52 (0.221)

Tabla 3.6. Resultados para un $Ra = 10^6$

	u_{max}	v_{max}	Nu_{max}	Nu_{min}	Nu_{medio}
Vahl Davis (1983)	0.077	0.260	18.076	1.005	8.798
Presente Estudio	0.079 (2.597)	0.262 (0.2)	18.281 (1.134)	1.127 (12.139)	8.899 (1.147)

Como se puede apreciar por debajo de los valores del Presente Estudio aparece el error relativo porcentual con respecto a los valores reportados por Vahl Davis.

Considerando que los errores son pequeños (menores al 10%) a excepción del Nu_{min} para un $Ra=10^6$ la solución obtenida se puede considerar aceptable para resolver problemas de convección natural.

3.10.3 Cavity Calentada Diferencialmente con Sólido Conductor Embebido

Para continuar con los problemas a desarrollar, se considera la misma cavidad utilizada para el problema de la cavidad calentada diferencialmente, utilizando ahora, un sólido en el centro de la misma (Figura 3.22). Utilizando la técnica del bloqueo de celda se pueden tratar este tipo de problemas.

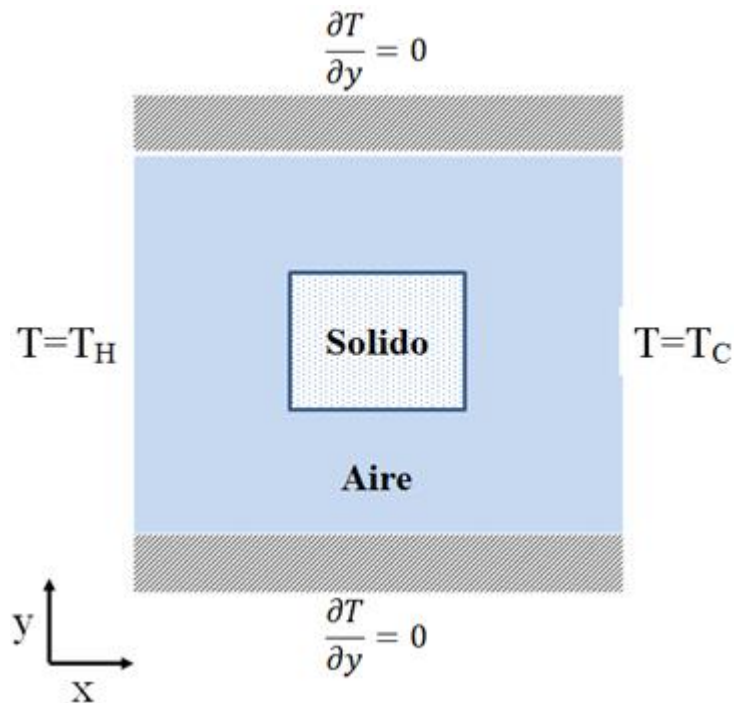


Figura 3.22. Cavity Calentada Diferencialmente con un Sólido Embebido Conductor

Para corroborar los resultados obtenidos se recurrió a un estudio en la literatura realizado por Jhon M. House et al. (1990), en el cual consiste en una cavidad cuadrada con un sólido conductor en el centro de la misma, en donde la pared Norte y Sur se encuentran aisladas, mientras que existe un gradiente de temperaturas constante entre las paredes Este (T_C) y Oeste (T_H), siendo $T_H=25^\circ\text{C} > T_C=15^\circ\text{C}$, además de tener un sólido conductor embebido en el centro de la cavidad.

Al no existir ningún otro medio que mueva el fluido, este es movido únicamente por los gradientes de temperatura. Los resultados obtenidos del mapa de isotermas se muestran en la Figura 3.23, en donde son comparados por los obtenidos por House et al. (1990).

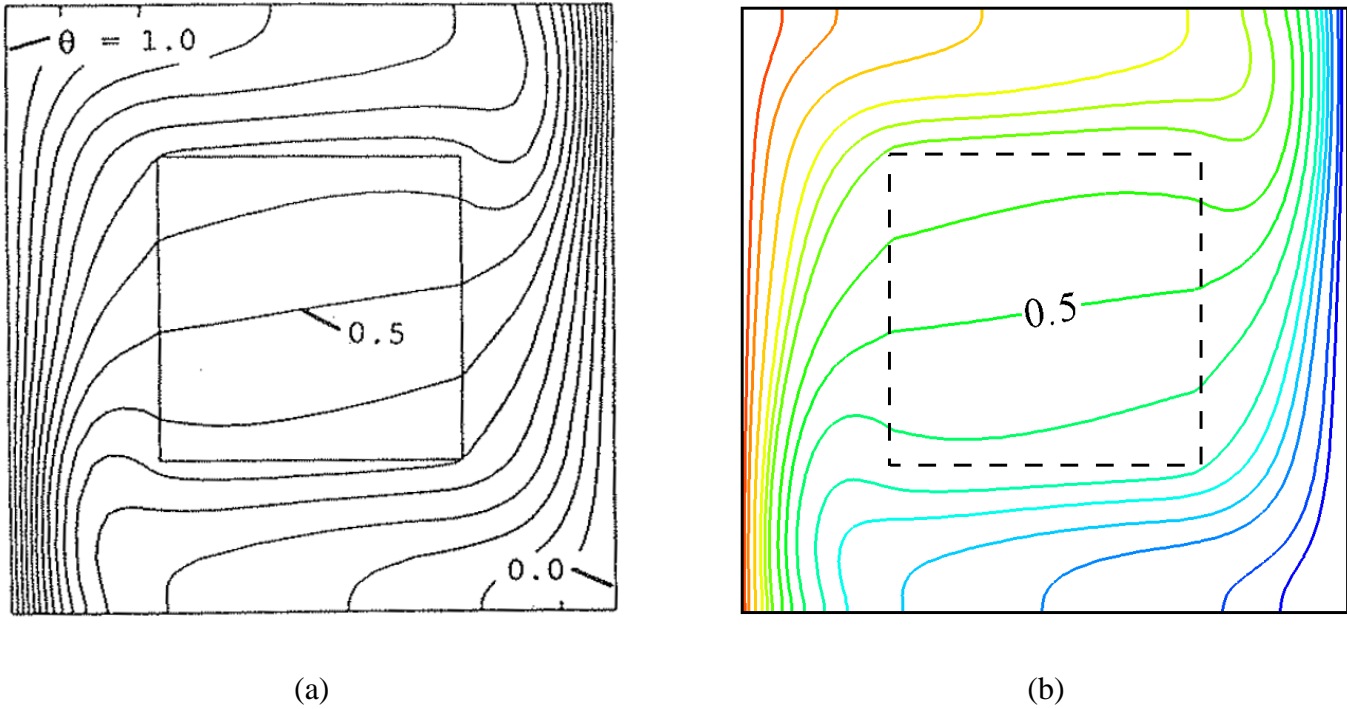
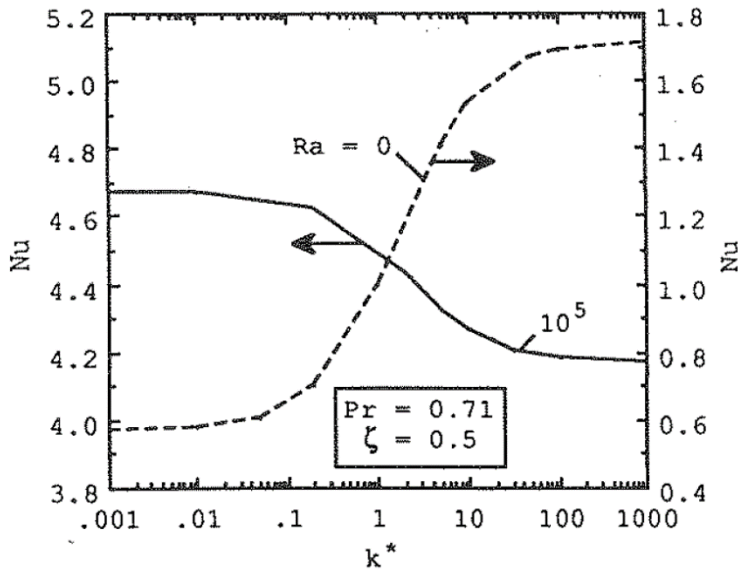


Figura 3.23. Mapa de isotermas de la Cavity Calentada Diferencialmente con un Sólido Embebido Conductor; (a) House et al. (1990), (b) Presente Estudio

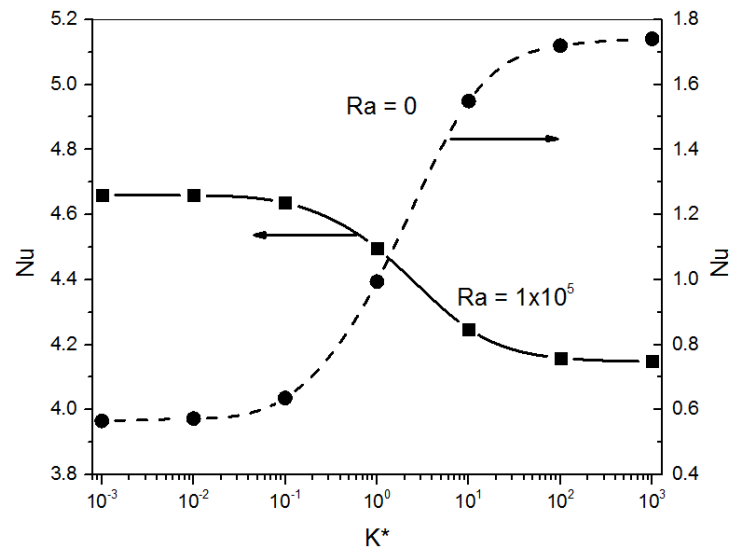
Cualitativamente los resultados coinciden con los reportados por House et al., sin embargo es necesario realizar una comparación cuantitativa. En la Tabla 3.7, se realiza una comparación de los Nusselt promedio para distintos valores de razón de conductividad térmica (k^*) obteniendo así la diferencia relativa porcentual; de igual manera en la Figura 3.24, se realiza la reproducción de la Tabla de House, en la cual se grafican los valores de Nusselt para un $Ra= 10^5$ con respecto a distintos valores de k^* .

Tabla 3.7. Comparación del Nusselt Promedio en la Pared Caliente de la Cavity Calentada Diferencialmente con un Sólido Embebido Conductor

k^*	House et al. (1990)	Mezrhah et al. (2006)	Presente Estudio	Diferencia
0.2	4.624	---	4.613	0.225%
0.5	4.324	---	4.312	0.259%
1	---	4.458	4.496	0.852%



(a)



(b)

Figura 3.24. Efecto de la razón de conductividad térmica sobre el Nusselt para $Ra = 10^5$; (a) House et al. (1990), (b) Presente Estudio

Como se observa en la Tabla 3.7, la diferencia relativa porcentual es menor al 10%, por lo cual se puede considerar aceptable para resolver problemas de convección con sólido embebido

conductor. De igual manera la Figura 3.24, se muestran que los resultados obtenidos se acotan perfectamente a los reportados por House.

3.10.4 Cavity Calentada Diferencialmente con Paredes Gruesas Conductoras

Un problema planteado por Zhao et al. (2007), el cual consiste en una cavidad calentada diferencialmente con paredes gruesas conductoras (Figura 3.25), con paredes horizontales adiabáticas. En este problema el ancho de la cavidad (W_A) se encuentra en función del coseno de 37° multiplicado por el ancho total de la cavidad considerando las paredes gruesas (L), y se busca obtener la razón total de transferencia de calor (Q) variando el Rayleigh desde 10 hasta 10^6 , para una razón de conductividad térmica de 1.0.

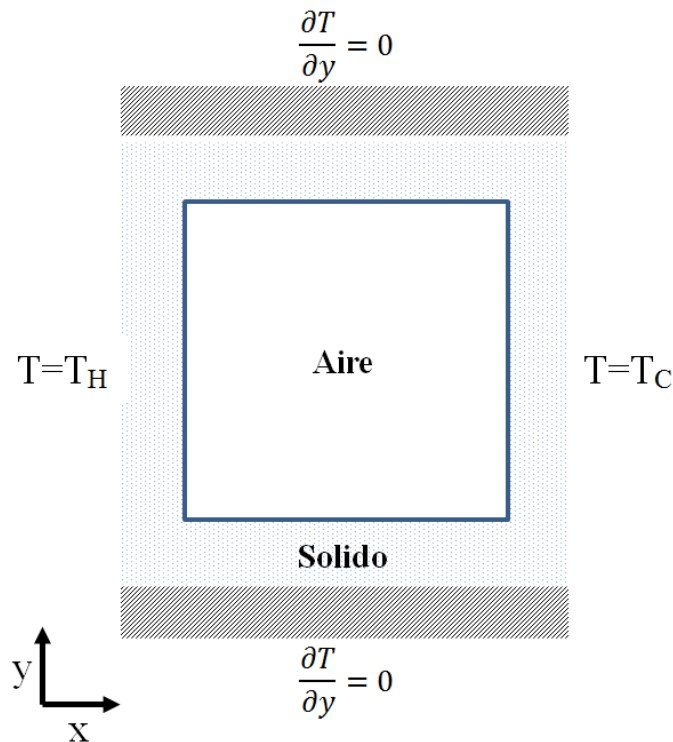


Figura 4. Cavity Calentada Diferencialmente con Paredes Gruesas Conductoras

En la Figura 3.26 se muestran los resultados obtenidos de las líneas de corriente para un $Ra=1 \times 10^6$, de igual manera en la Tabla 3.8 muestran los resultados cualitativos en comparación a

los proporcionados por Zhao et al. (2007), con su respectivo error relativo porcentual (entre paréntesis).

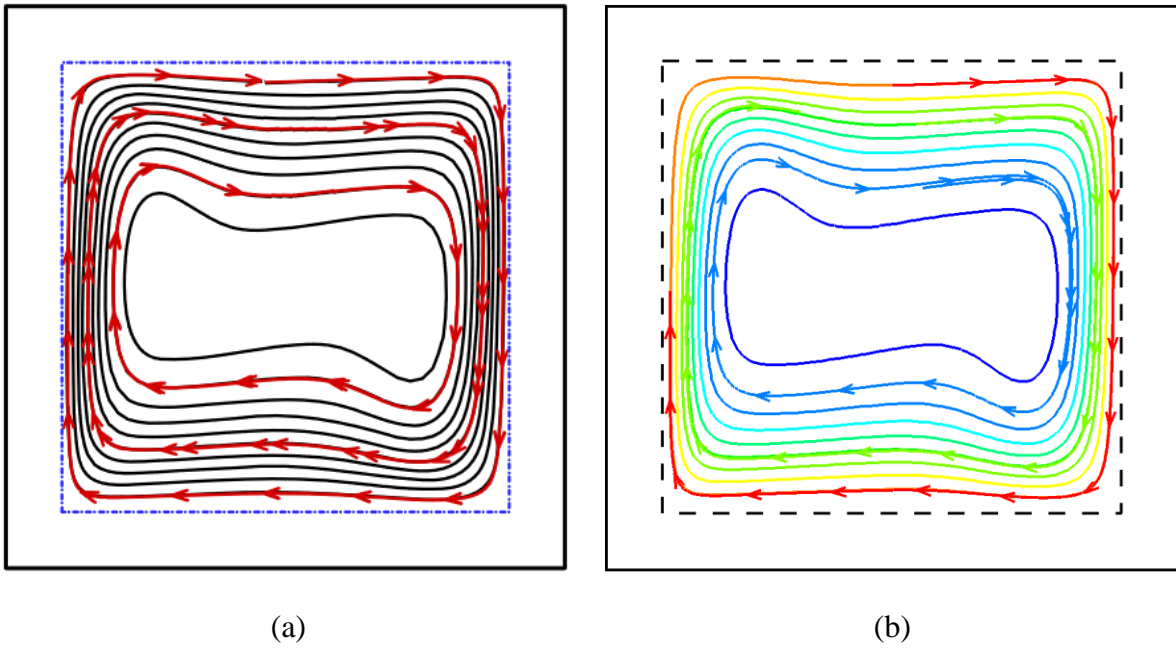


Figura 5. Líneas de Corriente de la Cavity Calentada Diferencialmente con Paredes Gruesas Conductoras; (a) Zhao et al. (2007), (b) Presente Estudio

Tabla 3.8. Comparación de la Razón de Transferencia de Calor Para Distintos Rayleigh de la Cavity Calentada Diferencialmente con Paredes Gruesas Conductoras

	$Ra= 10^1$	$Ra=10^3$	$Ra=10^4$	$Ra=10^6$
Zhao et al. (2007)	1	1.02	1.41	2.90
Presente Estudio	1 (0)	1.028 (0.74)	1.404 (0.42)	2.879 (0.72)

3.11 ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DE MALLA

Una vez verificado el código se llevó a cabo un análisis de independencia de malla para encontrar la dimensión de malla computacional adecuada para el problema a resolver, es decir, el block con dos y tres huecos; en otras palabras se busca obtener el tamaño de malla óptimo en la cual los resultados no muestran cambios significativos. Para propósitos de comparación se calculó la velocidad “ u ” al interior de las cavidades, así como el flujo de calor y temperatura en la pared superior de la loza y en la pared interior del block.

Para llevar a cabo este análisis se consideró el caso de radiación solar más extremo en la Ciudad de Hermosillo, Sonora; el cual corresponde a los siguientes datos climáticos: $G_{sol}=1081\text{W/m}^2$, $T_{amb}= 36.9 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_{wind}=2.2 \text{ m/s}$; las propiedades termofísicas de los materiales utilizados se presentan en el apéndice A.

3.11.1 Block con Dos Huecos

Las regiones sólidas solamente consideran conducción de calor en la solución del problema, por lo cual no es necesario tener una malla muy refinada para estas zonas, sin embargo en los huecos se considera la solución de convección, la cual demanda una malla lo suficientemente fina como para poder observar la fenomenología que pasa dentro de la cavidad. En las regiones sólidas se consideró suficiente 10 nodos para cada 2.5cm tanto para el block, aislante y loza, lo cual se mantuvo constante durante el estudio de independencia de malla. Con respecto a las cavidades, debido a las dimensiones de las mismas no se tienen los mismos números de nodos en X como en Y, por lo mismo se mantuvo una relación de 1:6 para el número de nodos de X (M) con respecto a los de Y (N).

En la Figura 3.27 se muestra el planteamiento de la variación del número de nodos para el estudio de independencia de malla para el número de nodos $M \times N$; se analizaron mallas numéricas de 21×14 , 41×26 , 61×39 , 81×51 y 101×64 analizando velocidad en u , temperatura y flujo de calor tanto en la parte superior de la loza (exterior) como en la pared interior del block (hacia la habitación).

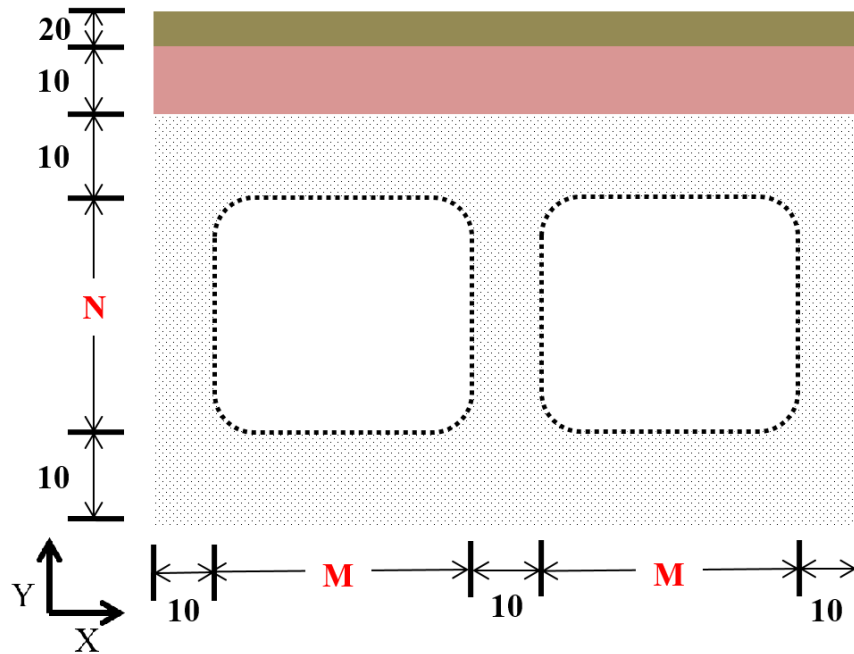
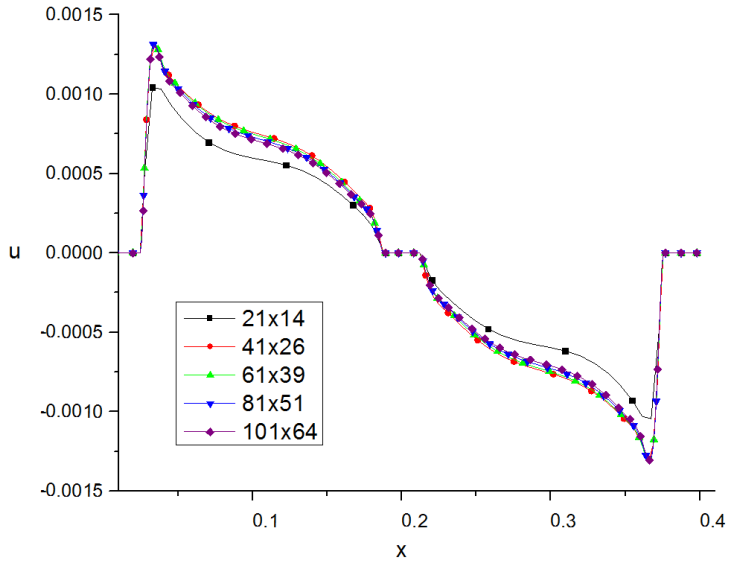
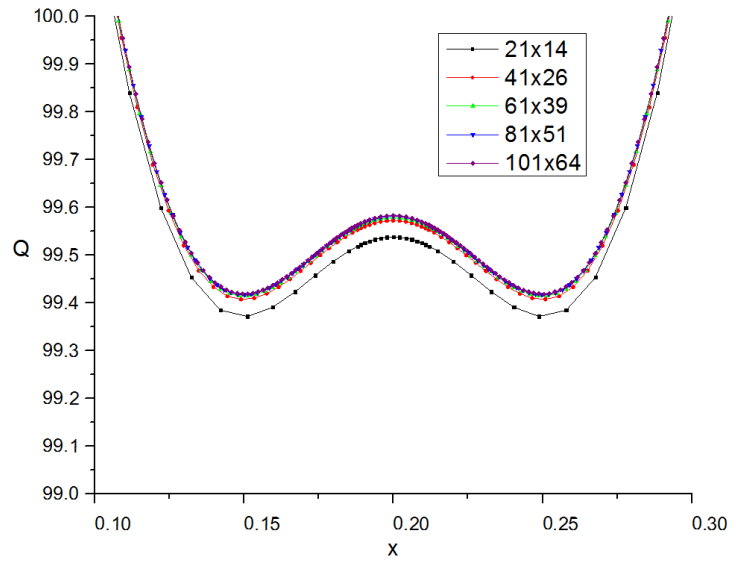


Figura 6. Representación de la Variación de Malla (Número de Nodos)

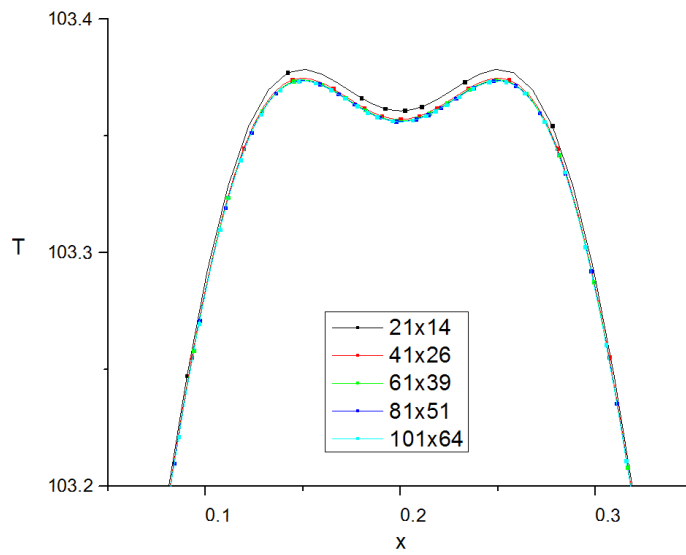
En la Figura 3.28 se muestran los perfiles de las componentes de velocidad u a lo largo de la mitad de las cavidades ($y=7.5\text{cm}$), mientras que la temperatura y el flujo de calor se ubican en la parte inferior del block ($y=0\text{cm}$), y la parte superior de la loza ($y=22.5\text{cm}$). Se puede observar en las gráficas que para el flujo de calor y temperatura, los perfiles se superponen entre la malla de 61×39 y 101×64 , sin embargo en el perfil de velocidad se observa el mismo comportamiento entre la malla 81×51 y 101×64 . En la Tabla 3.9 se puede observar el comportamiento de las mallas de manera cuantitativa obteniendo un error relativo porcentual menor al 1% a partir de la malla de 81×51 ; basado en estos resultados fue esa la malla elegida para realizar el estudio del block de dos huecos.



a) Componente u



b) Flujo de Calor



c) Temperatura

Figura 3.28. Efecto del número de nodos en el block de dos huecos.

Tabla 3.9. Análisis de Independencia de Malla para el Block de Dos Huecos

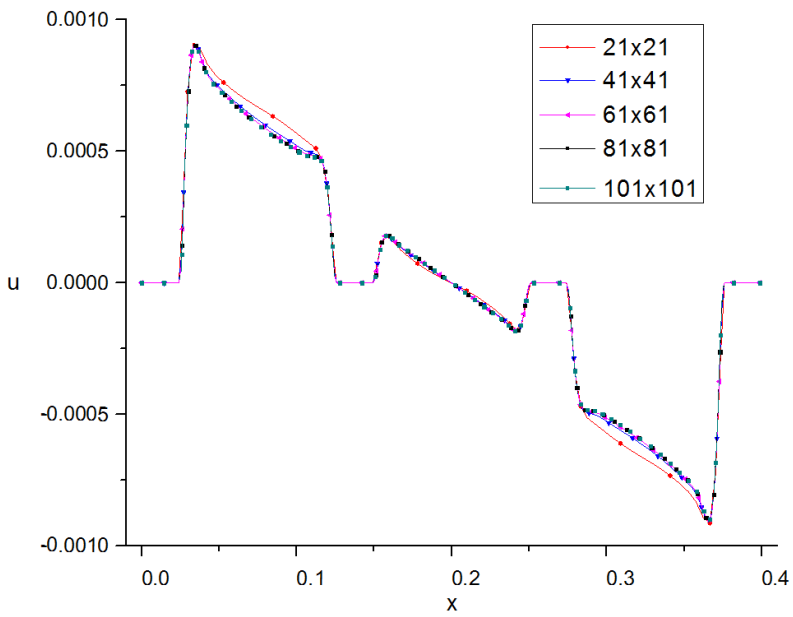
<i>MALLA</i>	<i>U</i>	<i>%</i>	<i>Q</i>	<i>%</i>	<i>T</i>	<i>%</i>
<i>21x14</i>	0.0010	----	133.0261	----	46.7008	----
<i>41x26</i>	0.0013	24.6557	132.9581	0.0511	46.6898	0.0237
<i>61x39</i>	0.0013	21.3936	132.9729	0.0111	46.6922	0.0052
<i>81x51</i>	0.0013	0.7300	132.9812	0.0062	46.6935	0.0029
<i>101x64</i>	0.0013	0.6070	132.9856	0.0034	46.6942	0.0016

3.11.2 Block con Tres Huecos

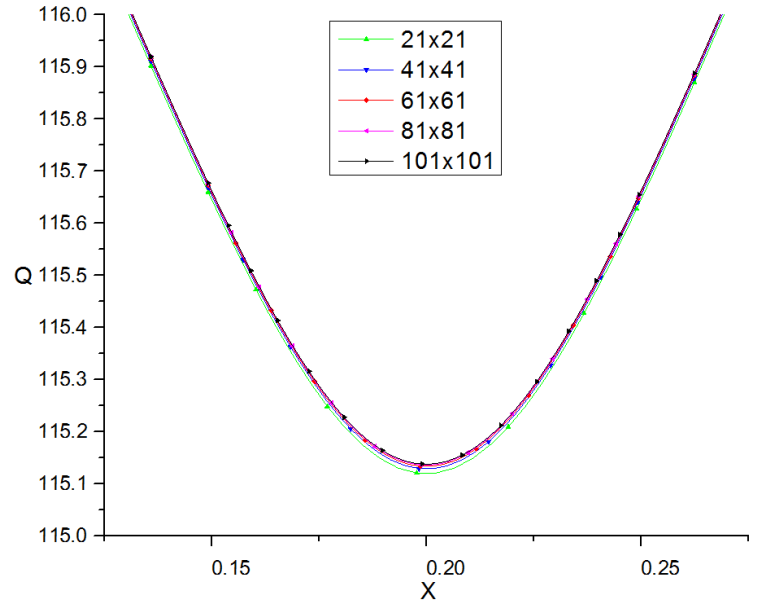
Al igual que en el block con dos huecos, en las regiones sólidas solamente consideran conducción de calor y por lo tanto no es necesario tener una malla muy refinada para estas zonas, a diferencia de las cavidades en donde se considera la solución de convección, y donde es necesaria una malla más fina para poder observar con claridad el comportamiento del fluido dentro de la cavidad. En las regiones sólidas se consideran también 10 nodos por cada 2.5cm tanto para el block, aislante y loza. A diferencia del block con dos huecos, en este las cavidades son completamente cuadradas (10cmx10cm) por lo cual el número de nodos es el mismo tanto en X (M) como en Y(N).

Se analizaron mallas numéricas de 21x21, 41x41, 61x61, 81x81 y 101x101 analizando velocidad en u , temperatura y flujo de calor tanto en la parte superior de la loza (exterior) como en la pared interior del block (hacia la habitación). En la Figura 3.29 se muestran los perfiles de las componentes de velocidad u a lo largo de la mitad de las cavidades ($y=7.5\text{cm}$), mientras que la temperatura y el flujo de calor se ubican en la parte inferior del block ($y=0\text{cm}$), y la parte superior de la loza ($y=22.5\text{cm}$). En la Tabla 3.10 se puede observar el comportamiento de las

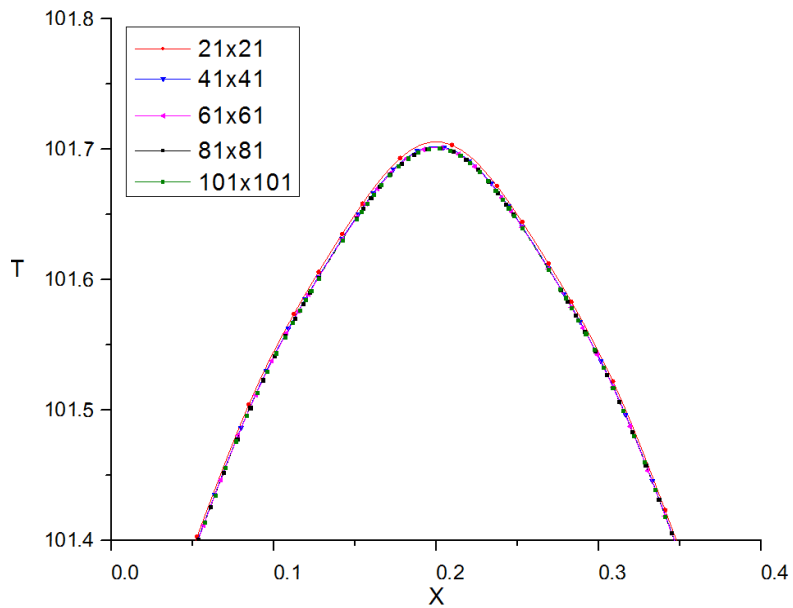
mallas de manera cuantitativa obteniendo un error relativo porcentual menor al 1% a partir de la malla de 81x81; basado en estos resultados fue esa la malla elegida para realizar el estudio del block de dos huecos.



a) Componente u



b) Flujo de Calor



c) Temperatura

Figura 3.29. Efecto del número de nodos en el block de tres huecos.

Tabla 3.10. Análisis de Independencia de Malla para el Block de Tres Huecos

<i>MALLA</i>	<i>U</i>	<i>%</i>	<i>Q</i>	<i>%</i>	<i>T</i>	<i>%</i>
<i>21x21</i>	0.00091	----	137.88845	----	47.49404	----
<i>41x41</i>	0.00091	0.18794	137.88574	0.00099	47.49360	0.00047
<i>61x61</i>	0.00090	0.01135	137.88766	0.00057	47.49392	0.00027
<i>81x81</i>	0.00090	0.01567	137.88859	0.00028	47.49407	0.00013
<i>101x101</i>	0.00090	0.01970	137.88910	0.00016	47.49415	7.61509E-05

Una vez realizada la independencia de malla se procedió a resolver el problema planteado, por lo cual en la Figura 3.30 se muestra el diagrama general de solución utilizado.

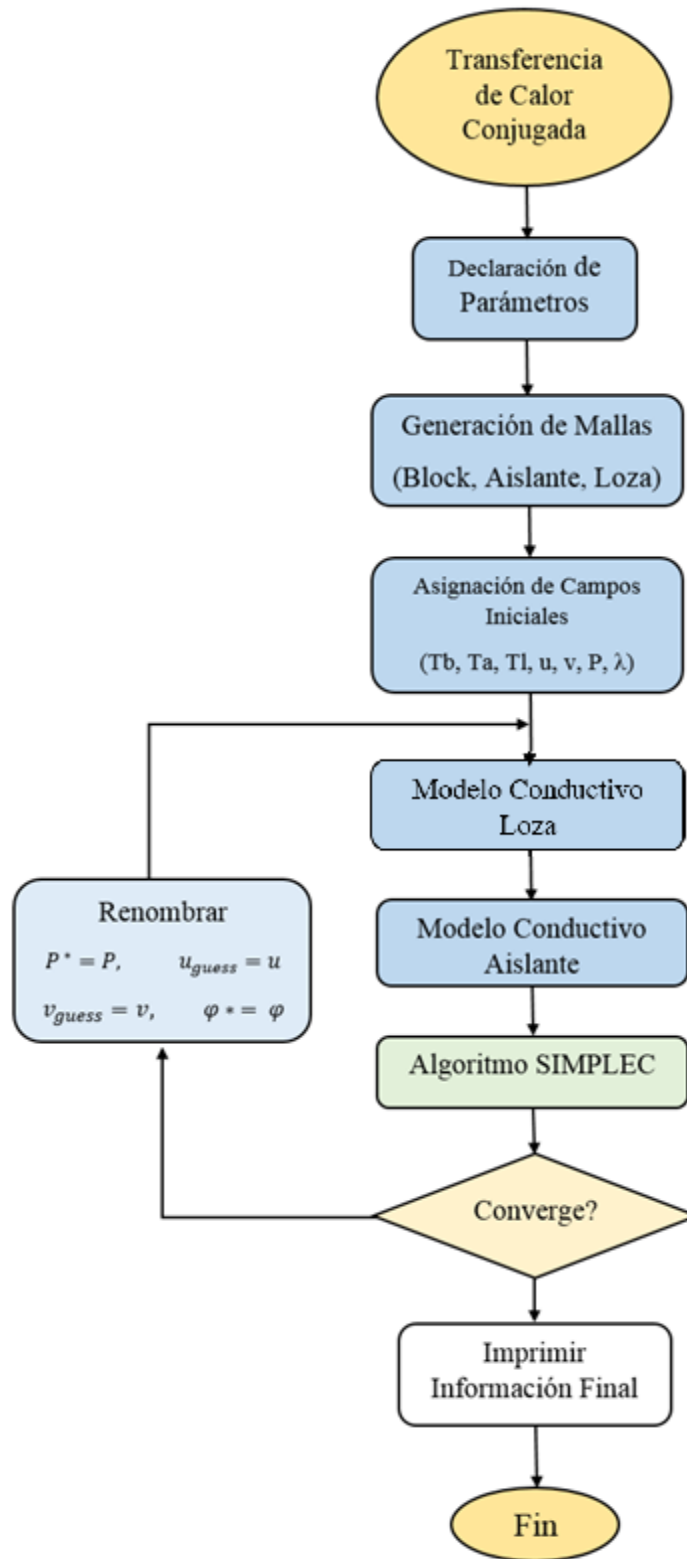


Figura 3.30. Diagrama General de Solución

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE TECHOS PARA LA REPÚBLICA MEXICANA

En este Capítulo se presentan los resultados numéricos obtenidos del análisis de la transferencia de calor conjugada en cuanto a las modelaciones para obtener el comportamiento térmico en las distintas configuraciones para el block de dos y tres huecos, de forma cualitativa y cuantitativa. Se presenta, además, la configuración con mejores resultados en cuanto al comportamiento de la temperatura al interior de la habitación en ambos blocks. Así, también, se realiza una comparación en cuanto a la mejor configuración en comportamiento térmico en el block de dos y tres huecos para observar diferencias significativas entre ambos.

4.1 PARAMETROS DE ESTUDIO

El comportamiento térmico del block con dos y tres huecos utilizado como techo en una habitación es analizado cada hora durante todo un día, tanto para el día más frío como para el día más cálido del año 2014 para la ciudad de Hermosillo, Sonora. Para el estudio se considera un block de 40cm de largo por 15cm de ancho con una loza de 5cm de espesor. Entre los materiales a modelar además del block y la loza se encuentra el uso de aislante poliestireno expandido de 2.5cm de ancho, las propiedades físicas de los materiales son presentadas en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Propiedades Físicas de los Materiales

<i>Material</i>	ρ (kg/m^3)	C_p ($J/kg K$)	K ($W/m K$)
<i>Block</i>	2500	920	1.74
<i>Aislante</i>	1050	1200	0.157
<i>Loza</i>	2240	880	1.7

Las configuraciones modeladas son las mismas tanto para dos como para tres huecos, siendo estas el uso de block con loza, block con loza y película negra, block con loza y película blanca; además de las configuraciones con uso de aislante como block con loza y aislante; block con loza, aislante y película negra; y block con loza, aislante y película blanca. Para las configuraciones en las cuales no se menciona el uso de película se considera un acabado gris, las propiedades tanto de este acabado como de las películas negra y blanca a utilizar se presentan en la Tabla 4.2. Las configuraciones para el block, así como sus dimensiones y características detalladas se presentaron en el Capítulo II.

Tabla 4.2. Propiedades de Películas Reflectivas

<i>Película</i>	Reflectancia (ρ)	Emisividad (ϵ)
<i>Gris</i>	0.33	0.87
<i>Blanca</i>	0.84	0.89
<i>Negra</i>	0.05	0.88

En la Tabla 4.3 se muestran los datos climáticos de irradiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento con los que se realizaron las simulaciones para la ciudad de Hermosillo, Sonora en el año 2014; además de que al interior de la habitación se considera una temperatura fija de 25 °C.

Tabla 4.3. Condiciones Climáticas en Hermosillo, Sonora (2014)

Tiempo (hrs)	Día más cálido (21 de Julio)			Día más frío (12 de Enero)		
	V_{wind} (m/s)	T_{amb} (°C)	G_{sol} (W/m²)	V_{wind} (m/s)	T_{amb} (°C)	G_{sol} (W/m²)
01:00	1.3	30.9	0	1.4	10.3	0
02:00	1.3	31	0	1.4	8.8	0
03:00	1.4	31	0	1.7	7.4	0
04:00	1.4	31.1	0	1.5	6.6	0
05:00	0.3	31.1	0	0.9	5.9	0
06:00	0.3	31.2	1	0.9	5.3	0
07:00	0.6	32.3	109	0.9	4.8	0
08:00	0.5	34.2	303	0.9	4.9	8
09:00	1.1	36.2	511	1	7.5	174
10:00	1.7	38.2	687	1.5	10.2	353
11:00	1.9	40	827	1.7	12.6	488
12:00	2.4	41.6	909	1.9	14.7	599
13:00	2	42.9	939	2.4	16.2	637
14:00	2	43.8	914	2.4	17.2	614
15:00	1.7	44.4	833	2.7	17.5	518
16:00	1.7	44.6	699	2.4	17.1	368
17:00	1.9	44.3	520	2.7	15.7	186
18:00	1	43.6	313	2.4	13.6	10
19:00	1	42.4	117	2.1	12.5	0
20:00	0.7	41.1	1	1.4	11.4	0
21:00	0.6	39.9	0	1	10.2	0
22:00	0.7	38.6	0	0.8	9.1	0
23:00	0.6	37.4	0	0.7	8	0
24:00	0.3	36.2	0	0.5	6.8	0

Como ya se mencionó anteriormente se modelaron seis configuraciones cada hora para un día completo tanto para el block con dos como con tres huecos, además de que el mismo número de modelaciones se realizó para el día más frío como para el día más cálido, realizando así un total de 576 modelaciones con una duración promedio de 2:30 hrs para cada modelación. El tiempo total de modelación para este estudio fue de 1440 hrs, un aproximado de 2 meses. Las

modelaciones se llevaron a cabo en una computadora del Laboratorio de Simulación Numérica del CENIDET.

El presente capítulo se divide en resultados para block de dos y tres cavidades, en cada sección se presentan los resultados de Temperatura y Fluxes de Calor (flujo de calor por unidad de área), tanto para el día frío como para el día cálido, en ese orden. Al final de este capítulo se presenta un resumen comparativo de todas las configuraciones analizadas, para el día frío y para el día cálido.

Con la finalidad de llevar un adecuado control y entendimiento de las distintas configuraciones, En la Figura 4.1 se muestra la nomenclatura en la cual se definen las distintas características de la simulación numérica.

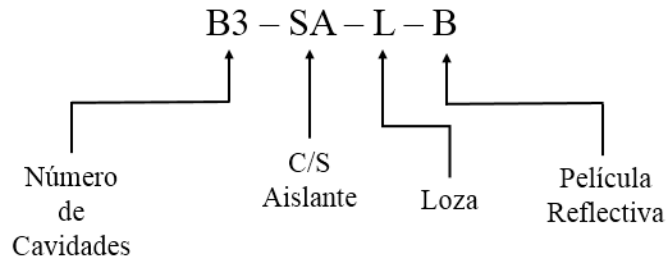


Figura 4.1. Nomenclatura de Configuraciones

Número de Cavidades: Para el estudio se consideró el caso del block con dos (B2) y tres cavidades (B3).

C/S Aislante: Hace referencia a las configuraciones que utilizan aislante (CA) y las que no lo utilizan (SA)

Película Reflectiva: Negra (B), Blanca (W) y acabado Gris (G).

4.2 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL BLOCK CON DOS HUECOS

En esta sección se presentan los resultados del comportamiento térmico del block con dos huecos para un día frío y un día cálido, según las condiciones climáticas presentadas en la Tabla 4.3.

4.2.1 Día Frío

4.2.1.1 Temperatura

En la Figura 4.2 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio de la superficie interior de un block de dos huecos y las distintas configuraciones establecidas en la tesis. Se considera como modelo de referencia a comparar la configuración B2-SA-L-G, la cual no cuenta con película reflectiva ni aislante, haciendo referencia a un techo común utilizado en las viviendas, alcanza una temperatura promedio interior durante el día de 22.2°C. Con respecto al uso de películas reflectivas en contraste a la configuración estándar, se observa que la configuración B2-SA-L-B alcanzó una temperatura promedio de 22.9°C, muy similar a la configuración estándar, mientras que la configuración B2-SA-L-W obtuvo en promedio 20.8°C, esto se debe a la alta reflectancia que tiene esta película, rechazando así gran cantidad de energía.

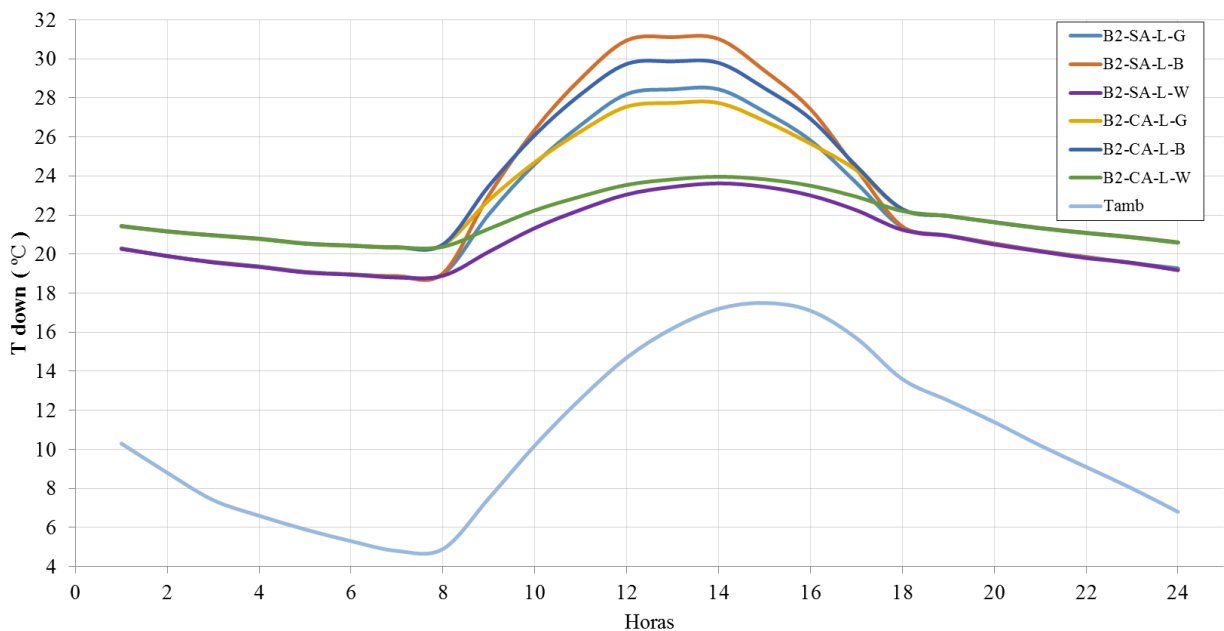


Figura 4.2. Comportamiento de las Temperaturas Promedio al Interior del Block para un día Frío

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B2-CA-L-G tiene una temperatura promedio de 22.9°C prácticamente tiene el mismo comportamiento que la configuración B2-SA-L-B, esto debido a que los valores de radiación son muy pequeños no se observa cambio significativo. Sin embargo, con respecto al uso de película y aislante, la configuración B2-CA-L-B al absorber gran parte de la energía del exterior brinda un aumento de la temperatura al interior con un promedio de 23.5°C. Y en cuanto a la configuración B2-CA-L-W, esta presenta un promedio en la temperatura de 21.8°C, esto debido a que a pesar de que rechaza la mayor parte de la energía proveniente del exterior, su aislamiento le sirve para retener la temperatura al interior del block.

En las Tablas 4.4 y 4.5 se muestran los resultados de las temperaturas promedio al interior del block durante las 24hrs modeladas para las configuraciones sin y con aislante, respectivamente, así como su respectiva diferencia porcentual con respecto a la configuración estándar. Como se observa la configuración B2-SA-L-G alcanza una temperatura máxima de 28.4°C a las 14:00hrs, el uso de película negra en la configuración B2-SA-L-B con respecto a la configuración estándar presenta un cambio de 2.6°C con una temperatura máxima de 31°C a la misma hora y una diferencia porcentual de 9.1%, sin embargo la película blanca en la configuración B2-SA-L-W tiene una disminución de la temperatura más significativa de 4.8°C con una máxima de 23.6°C y una diferencia porcentual de 16.9%.

Tabla 4.4. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas Promedio al Interior del Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Frío

Tiempo (Hrs)	B2-SA-L-G (°C)	B2-SA-L-B (°C)	%	B2-SA-L-W (°C)	%
01:00	20.3	20.3	0	20.3	0
02:00	19.9	19.9	0	19.9	0
03:00	19.6	19.6	0	19.6	0
04:00	19.4	19.4	0	19.3	0
05:00	19.1	19.1	0	19.1	0
06:00	19.0	19.0	0	19.0	0

07:00	18.9	18.9	0	18.8	0
08:00	19.0	19.0	0	18.9	0
09:00	22.0	23.0	4.4	20.1	8.7
10:00	24.6	26.4	7.2	21.3	13.3
11:00	26.6	29.0	8.9	22.3	16.3
12:00	28.2	30.9	9.8	23.1	18.2
13:00	28.4	31.1	9.4	23.4	17.6
14:00	28.4	31.0	9.1	23.6	16.9
15:00	27.3	29.4	7.7	23.4	14.1
16:00	25.8	27.4	6.2	23.0	10.9
17:00	23.6	24.4	3.0	22.2	5.9
18:00	21.4	21.4	0	21.2	0
19:00	21.0	20.9	0	20.9	0
20:00	20.5	20.5	0	20.5	0
21:00	20.2	20.2	0	20.1	0
22:00	19.9	19.8	0	19.8	0
23:00	19.5	19.5	0	19.6	0
24:00	19.3	19.2	0	19.2	0

Con respecto al uso de aislante en comparación a la configuración estándar, se observa que la configuración B2-CA-L-G tiene una disminución de temperatura insignificante de 0.7 con una máxima de 27.7°C y una diferencia porcentual de 2.5%; con respecto a la configuración B2-CA-L-B hubo un aumento en la temperatura de 1.4°C con una máxima de 29.8°C y una diferencia porcentual de 4.8%; mientras que la configuración B2-CA-L-W tiene una disminución de la temperatura de 4.5°C con un valor máximo de 24°C y una diferencia porcentual de 15.7%.

Tabla 4.5. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas Promedio al Interior del Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Frío

Tiempo (Hrs)	B2-CA-L-G (°C)	%	B2-CA-L-B (°C)	%	B2-CA-L-W (°C)	%
01:00	21.4	5.7	21.4	5.6	21.4	5.6
02:00	21.2	6.5	21.2	6.4	21.2	6.3
03:00	21.0	7.0	21.0	7.0	21.0	6.9
04:00	20.8	7.3	20.8	7.3	20.8	7.2
05:00	20.6	7.6	20.5	7.6	20.5	7.5
06:00	20.4	7.9	20.4	7.8	20.4	7.7
07:00	20.4	7.9	20.3	7.8	20.3	7.7
08:00	20.5	7.8	20.5	8.0	20.4	7.3
09:00	22.8	3.3	23.5	6.6	21.3	3.4
10:00	24.7	0.4	26.1	6.0	22.2	9.7
11:00	26.3	1.2	28.2	5.9	23.0	13.7
12:00	27.6	2.3	29.7	5.5	23.5	16.5
13:00	27.7	2.5	29.9	5.0	23.8	16.2
14:00	27.7	2.5	29.8	4.8	24.0	15.7
15:00	26.8	1.7	28.5	4.4	23.8	12.7
16:00	25.7	0.6	26.9	4.3	23.5	9.0
17:00	24.3	2.7	24.5	3.7	22.9	3.0
18:00	22.3	4.2	22.3	4.3	22.2	3.9
19:00	22.0	4.8	22.0	4.8	21.9	4.7
20:00	21.6	5.3	21.6	5.3	21.6	5.2
21:00	21.3	5.8	21.3	5.8	21.3	5.7
22:00	21.1	6.2	21.1	6.2	21.1	6.1
23:00	20.9	6.8	20.9	6.7	20.9	6.7
24:00	20.6	6.9	20.6	6.9	20.6	6.8

Con respecto a la temperatura promedio alcanzada en la superficie exterior del block, en la Figura 4.3 se muestra su comportamiento de la temperatura promedio al exterior de un block de dos huecos y las distintas configuraciones establecidas en la tesis. La configuración de referencia B2-SA-L-G alcanza una temperatura máxima exterior durante el día de 37.7°C. Con respecto al uso de películas reflectivas en contraste a la configuración de referencia, se observa que la configuración B2-SA-L-B alcanzó una temperatura máxima de 47.5°C, mientras que la configuración B2-SA-L-W obtuvo 19.4°C como temperatura máxima, esto se debe a la alta reflectancia que tiene esta película, rechazando así gran cantidad de energía.

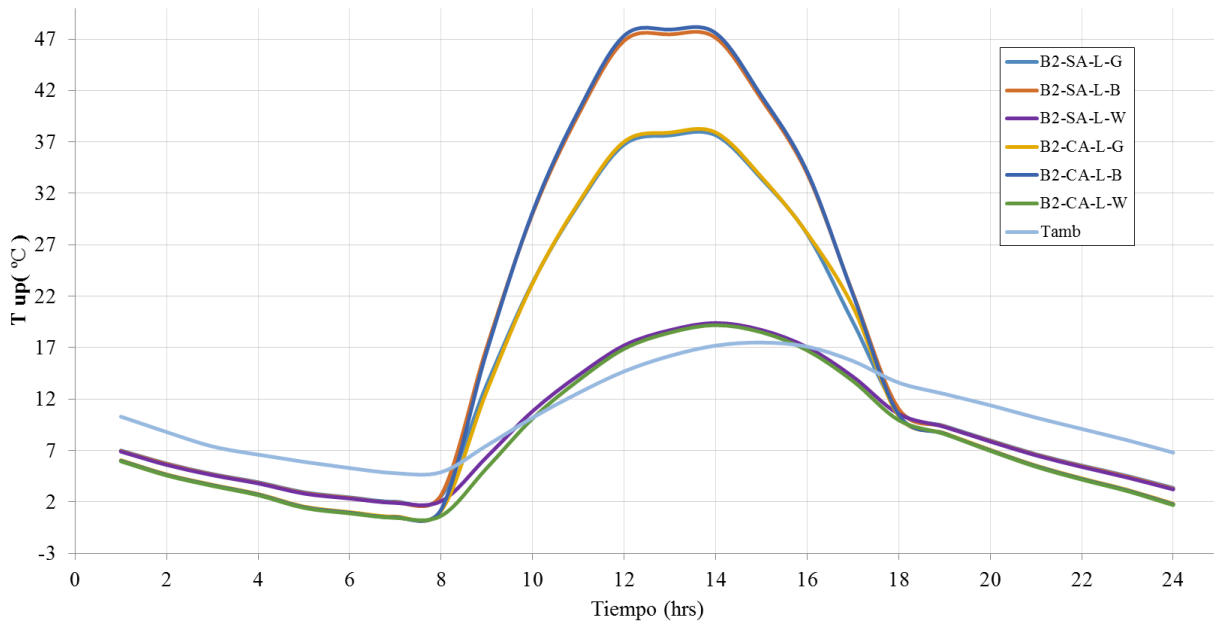


Figura 4.3. Comportamiento de las Temperaturas Promedio al Exterior del Block para un día Frío

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B2-CA-L-G tiene una temperatura máxima exterior de 37.9°C prácticamente tiene el mismo comportamiento que la configuración B2-SA-L-G, esto debido a que los valores de radiación son muy pequeños no se observa cambio significativo. Sin embargo, con respecto al uso de película y aislante, la configuración B2-CA-L-B al absorber gran parte de la energía del exterior brinda un aumento de la temperatura sobre la

superficie exterior con una temperatura máxima de 47.9°C. Y en cuanto a la configuración B2-CA-L-W, esta presenta una temperatura máxima exterior de 19.2°C, esto debido a que a pesar de que rechaza la mayor parte de la energía proveniente del exterior, su aislamiento le sirve para retener la temperatura al interior del block.

4.2.1.2 Fluxes de Calor

La Figura 4.4 muestra el comportamiento de los fluxes de calor promedio al interior de un block de dos huecos en un día frío y las distintas configuraciones analizadas. El flux de calor máximo se observa entre las 12:00 y las 14:00 hrs. Mediante una integración numérica por la regla del trapecio se puede observar que la configuración estándar 2B-SA-L-G tiene una pérdida de flux de calor de -525.4Wh/m^2 , esto sucede ya que la mayor parte del día la temperatura al interior del block es mayor debido a las condiciones climáticas del ambiente para un día frío, por lo cual no hay una ganancia de calor sino lo contrario. Con respecto a las configuraciones B2-SA-L-B y B2-SA-L-W el flux de calor que pierden es de -450.9 y -708.8Wh/m^2 , respectivamente.

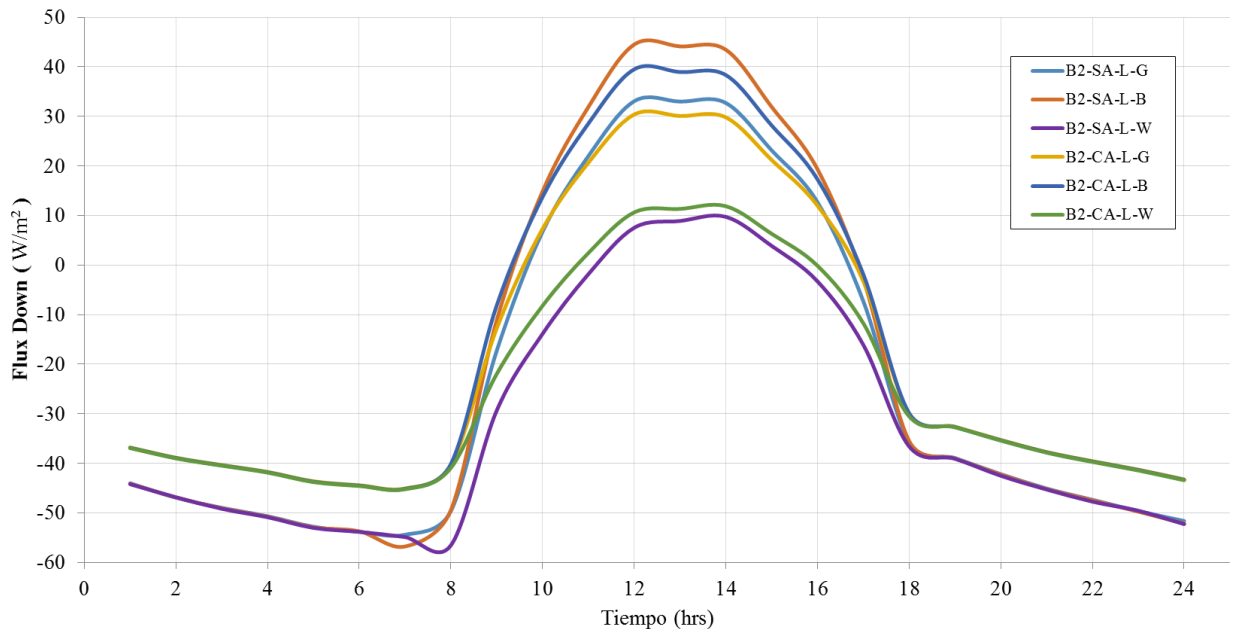


Figura 4.4. Comportamiento del Flujo de Calor Promedio al Interior del Block para un día Frío

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B2-CA-L-G tiene una pérdida de flux de calor de -415.6Wh/m^2 , ya que el aislante funciona como resistencia al flujo de calor del interior al exterior. Mientras que las configuraciones B2-CA-L-B y B2-CA-L-W pierden -357 y -553.3Wh/m^2 , respectivamente.

En las Tablas 4.6 y 4.7 se muestran los resultados de los fluxes de calor promedio al interior del block en las 24 hrs modeladas para las configuraciones sin y con aislante, respectivamente, así como su respectiva diferencia porcentual con respecto a la configuración estándar. También, se presenta el valor del flux de calor promedio para cada caso. Como se observa la configuración B2-SA-L-G presenta un flux de calor máximo de 32.69W/m^2 a las 14:00hrs, respecto al uso de película negra la configuración B2-SA-L-B presenta una diferencia de 10.7W/m^2 con respecto a la configuración estándar con un flux de calor máximo de 43.43W/m^2 a la misma hora y una diferencia porcentual de 32.8%, sin embargo la película blanca muestra una diferencia de 23W/m^2 con respecto a la configuración estándar con un flux de calor máximo de 9.7W/m^2 y una diferencia porcentual de 70.3%.

Tabla 4.6. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor al Interior de un Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Frío

Tiempo (Hrs)	B2-SA-L-G (W/m ²)	B2-SA-L-B (W/m ²)	%	B2-SA-L-W (W/m ²)	%
01:00	-44.0	-44.1	0	-44.2	0
02:00	-46.9	-46.9	0	-46.9	0
03:00	-49.0	-49.1	0	-49.2	0
04:00	-50.7	-50.8	0	-50.9	0
05:00	-52.8	-52.9	0	-53.0	0
06:00	-53.8	-53.7	0	-53.8	0
07:00	-54.4	-56.8	-4.4	-54.9	0
08:00	-49.6	-49.4	0	-56.6	-13.9
09:00	-17.3	-11.2	-35.5	-29.4	-69.7
10:00	6.7	14.9	121.4	-13.9	307.1

11:00	22.0	31.9	45.0	-1.8	108.4
12:00	33.1	44.5	34.6	7.5	77.2
13:00	33.0	44.1	33.8	8.9	73.0
14:00	32.7	43.4	32.8	9.7	70.3
15:00	23.1	31.9	37.9	3.9	83.3
16:00	12.7	19.3	52.5	-3.3	126.0
17:00	-7.3	-2.9	-60.8	-16.1	-120.2
18:00	-35.7	-35.5	0	-36.6	-2.4
19:00	-38.9	-39.0	0	-39.1	0
20:00	-42.2	-42.3	0	-42.5	0
21:00	-45.1	-45.2	0	-45.3	0
22:00	-47.3	-47.5	0	-47.7	0
23:00	-49.6	-49.8	0	-49.6	0
24:00	-51.6	-52.1	0	-52.3	0
q (t)	-525.4 Wh/m ²	-450.9 Wh/m ²		-708.8 Wh/m ²	

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B2-CA-L-G tiene una diferencia de 2.9W/m^2 al presentar un flux de calor de 29.8W/m^2 y una diferencia porcentual de 8.9%; con respecto a la configuración 2B-CA-L-B existe un aumento en de 5.6W/m^2 en el flux de calor, con un valor máximo de 38.3W/m^2 y una diferencia porcentual de 17.2%; mientras que la configuración B2-CA-L-W tiene una disminución del flux de 20.8W/m^2 con un flux máximo de 11.9W/m^2 y una diferencia porcentual de 63.7%.

Tabla 4.7. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor Promedio al Interior de un Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Frío

Tiempo (Hrs)	B2-CA-L-G (W/m²)	%	B2-CA-L-B (W/m²)	%	B2-CA-L-W (W/m²)	%
01:00	-36.8	-16.4	-36.9	-16.2	-36.9	-16.1
02:00	-38.9	-17.2	-38.9	-17.0	-39.0	-16.9

03:00	-40.3	-17.6	-40.4	-17.5	-40.5	-17.3
04:00	-41.7	-17.7	-41.8	-17.5	-41.9	-17.4
05:00	-43.6	-17.4	-43.7	-17.2	-43.8	-17.1
06:00	-44.4	-17.4	-44.5	-17.3	-44.6	-17.1
07:00	-45.1	-17.2	-45.2	-17.0	-45.2	-16.9
08:00	-40.3	-18.8	-40.1	-19.1	-40.9	-17.6
09:00	-12.8	-26.2	-8.2	-52.8	-22.0	-27.0
10:00	7.3	8.6	13.7	104.4	-8.2	222.5
11:00	20.7	6.1	28.6	29.8	2.4	88.9
12:00	30.4	8.1	39.5	19.5	10.6	67.9
13:00	30.1	8.8	38.9	18.0	11.3	65.7
14:00	29.8	8.9	38.3	17.2	11.9	63.7
15:00	21.2	8.4	28.2	21.7	6.3	72.8
16:00	12.0	5.5	17.3	36.3	-0.2	101.2
17:00	-3.2	-55.7	-1.9	-74.3	-11.7	-60.7
18:00	-30.0	-15.9	-29.9	-16.3	-30.5	-14.5
19:00	-32.6	-16.2	-32.7	-16.1	-32.7	-15.9
20:00	-35.3	-16.4	-35.4	-16.2	-35.4	-16.0
21:00	-37.7	-16.4	-37.8	-16.2	-37.9	-16.0
22:00	-39.6	-16.4	-39.6	-16.3	-39.7	-16.1
23:00	-41.3	-16.8	-41.4	-16.7	-41.4	-16.5
24:00	-43.2	-16.3	-43.3	-16.1	-43.4	-15.9
q(t)	-415.6 Wh/m ²		-357 Wh/m ²		-553.3 Wh/m ²	

4.2.2 Día Cálido

4.2.2.1 Temperatura

En la Figura 4.5 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio al interior del block de dos huecos en un día cálido y las distintas configuraciones con las que se trabajó. Se observa que la configuración de referencia B2-SA-L-G tiene una temperatura promedio de 30.7°C. Con respecto al uso de películas reflectivas en contraste a la configuración de referencia, se observa que la configuración B2-SA-L-B alcanza una temperatura promedio de 32°C, 1.3°C por arriba de la configuración estándar, esto se debe a las propiedades de la película negra; por el contrario la configuración B2-SA-L-W obtuvo en promedio 28°C, esto se debe a la alta reflectancia que tiene esta película, rechazando así gran cantidad de energía y disminuyendo la temperatura al interior del block.

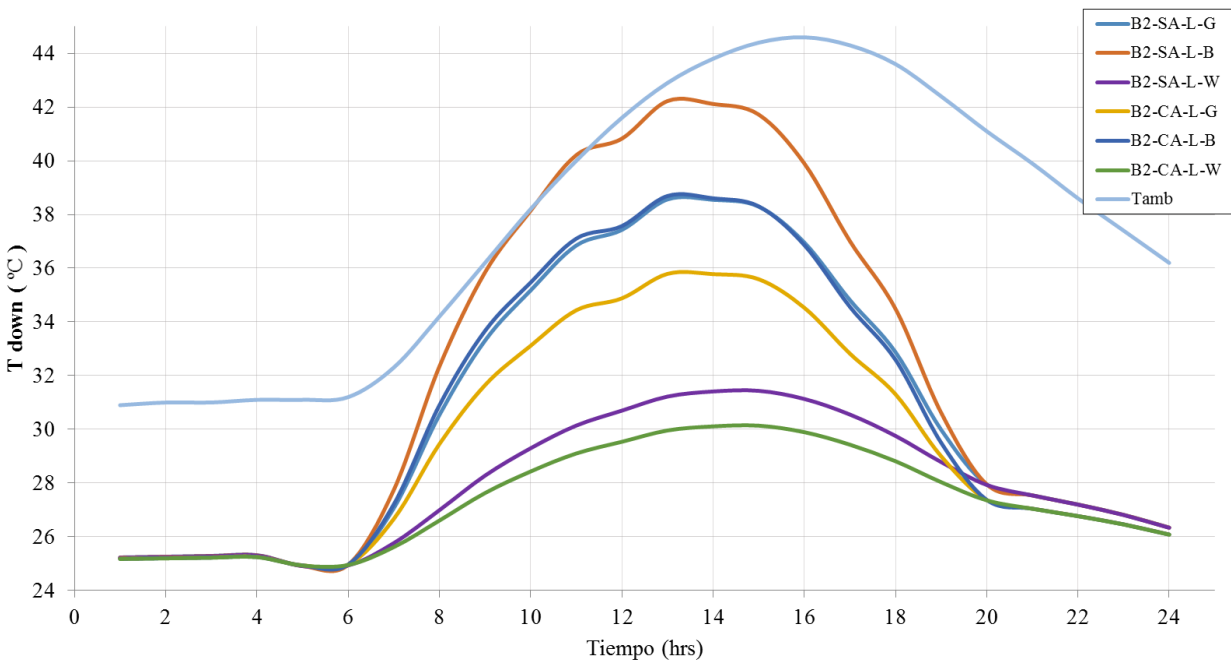


Figura 4.5. Comportamiento de las Temperaturas Promedio al Interior del Block para un día Cálido

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B2-CA-L-G tiene una temperatura promedio interior de 29.6°C una disminución de 1.1°C con respecto a la configuración estándar debido a la capa de aislamiento que se utiliza. Sin embargo, con respecto al uso de película y aislante, la configuración B2-CA-L-B presenta una temperatura promedio interior de 30.6°C, que a pesar de absorber gran parte de la energía del exterior, no existe un aumento significativo de la

temperatura en la superficie interior del block gracias al uso del aislante, manteniéndose así prácticamente igual que la configuración estándar. En cuanto a la configuración B2-CA-L-W, presenta un promedio en la temperatura interior de 27.4°C, esto es gracias a que rechaza la mayor parte de la energía proveniente del exterior, además del beneficio al usar aislamiento brinda una temperatura de mayor confort al interior con respecto a las otras configuraciones con una disminución de 3.3°C con respecto a la configuración estándar.

En las Tablas 4.8 y 4.9 se muestran los resultados de las temperaturas a las distintas horas para las configuraciones sin y con aislante, respectivamente, así como las diferencias porcentuales con respecto a la configuración estándar. Como se observa la configuración B2-SA-L-G alcanza una temperatura máxima de 38.56°C a las 13:00hrs, en la configuración B2-SA-L-B debido al uso de película negra con respecto a la configuración estándar presenta un cambio de 3.7°C con una temperatura máxima de 42.2°C a la misma hora y una diferencia porcentual de 9.5%, sin embargo en la configuración B2-SA-L-W la película blanca tiene una disminución de la temperatura más significativa de 4.8°C con una máxima de 31.2°C y una diferencia porcentual de 19%.

Tabla 4.8. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas al Interior de un Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Cálido

Tiempo (Hrs)	B2-SA-L-G (°C)	B2-SA-L-B (°C)	%	B2-SA-L-W (°C)	%
01:00	25.2	25.2	0	25.2	0
02:00	25.3	25.3	0	25.2	0
03:00	25.3	25.3	0	25.3	0
04:00	25.3	25.3	0	25.3	0
05:00	24.9	24.9	0	24.9	0
06:00	25.0	25.0	0	24.9	0
07:00	27.1	27.7	2.5	25.8	4.8
08:00	30.5	32.3	5.9	27.0	11.6
09:00	33.3	35.8	7.6	28.3	15.1
10:00	35.2	38.1	8.4	29.3	16.7

11:00	36.8	40.2	9.1	30.1	18.2
12:00	37.4	40.8	9.1	30.7	18.0
13:00	38.6	42.2	9.5	31.2	19.0
14:00	38.5	42.1	9.3	31.4	18.5
15:00	38.3	41.7	8.9	31.4	17.9
16:00	37.0	39.9	8.0	31.1	15.8
17:00	34.8	37.0	6.3	30.6	12.2
18:00	32.9	34.5	4.9	29.8	9.5
19:00	30.0	30.6	2.1	28.8	4.0
20:00	27.9	28.0	0	27.9	0
21:00	27.5	27.5	0	27.5	0
22:00	27.2	27.2	0	27.2	0
23:00	26.8	26.8	0	26.8	0
24:00	26.3	26.3	0	26.3	0

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B2-CA-L-G tiene una disminución de temperatura de 2.8°C en comparación con la configuración de referencia al presentar una temperatura máxima de 35.8°C y una diferencia porcentual de 7.2%; con respecto a la configuración B2-CA-L-B la diferencia de temperatura con la configuración estándar es de 0.13°C con una máxima de 38.7°C; mientras que la configuración B2-CA-L-W tiene una disminución de la temperatura de 8.6°C con un valor máximo de 29.95°C y una diferencia porcentual de 22.3%.

Tabla 4.9. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas al Interior de un Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Cálido

Tiempo (Hrs)	B2-CA-L-G (°C)	%	B2-CA-L-B (°C)	%	B2-CA-L-W (°C)	%
01:00	25.2	0	25.2	0	25.2	0
02:00	25.2	0	25.2	0	25.2	0

03:00	25.2	0	25.2	0	25.2	0
04:00	25.3	0	25.2	0	25.2	0
05:00	24.9	0	24.9	0	24.9	0
06:00	25.0	0	25.0	0	24.9	0
07:00	26.7	1.5	27.2	0.5	25.6	5.4
08:00	29.5	3.5	30.9	1.2	26.6	12.9
09:00	31.6	5.0	33.7	1.1	27.6	17.0
10:00	33.1	5.9	35.5	0.8	28.4	19.2
11:00	34.4	6.5	37.1	0.7	29.1	21.0
12:00	34.9	6.8	37.6	0.4	29.5	21.1
13:00	35.8	7.2	38.7	0.3	30.0	22.3
14:00	35.8	7.2	38.6	0.1	30.1	21.9
15:00	35.6	7.1	38.3	0.0	30.1	21.3
16:00	34.5	6.6	36.9	0.3	29.9	19.1
17:00	32.8	5.7	34.6	0.7	29.4	15.5
18:00	31.3	4.8	32.6	0.9	28.8	12.4
19:00	29.0	3.3	29.5	1.6	28.0	6.5
20:00	27.4	2.1	27.4	2.1	27.4	2.1
21:00	27.0	1.8	27.0	1.8	27.0	1.8
22:00	26.8	1.6	26.8	1.6	26.8	1.6
23:00	26.5	1.3	26.5	1.3	26.5	1.3
24:00	26.1	1.0	26.1	1.0	26.1	1.0

Con respecto a la temperatura promedio alcanzada en la superficie exterior del block, en la Figura 4.6 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio al exterior del block de dos huecos en el día cálido. Se aprecia que la configuración estándar B2-SA-L-G alcanzó una temperatura máxima de 74.7°C. Con respecto al uso de películas reflectivas en contraste a la

configuración estándar, se observa que la configuración B2-SA-L-B alcanzó una temperatura máxima de 88.2°C, este aumento en la temperatura se debe a las propiedades de la película negra; por el contrario la configuración B2-SA-L-W obtuvo 48.6°C como temperatura máxima, esto se debe a la alta reflectancia que tiene esta película, rechazando así gran cantidad de energía y disminuyendo la temperatura al interior del block.

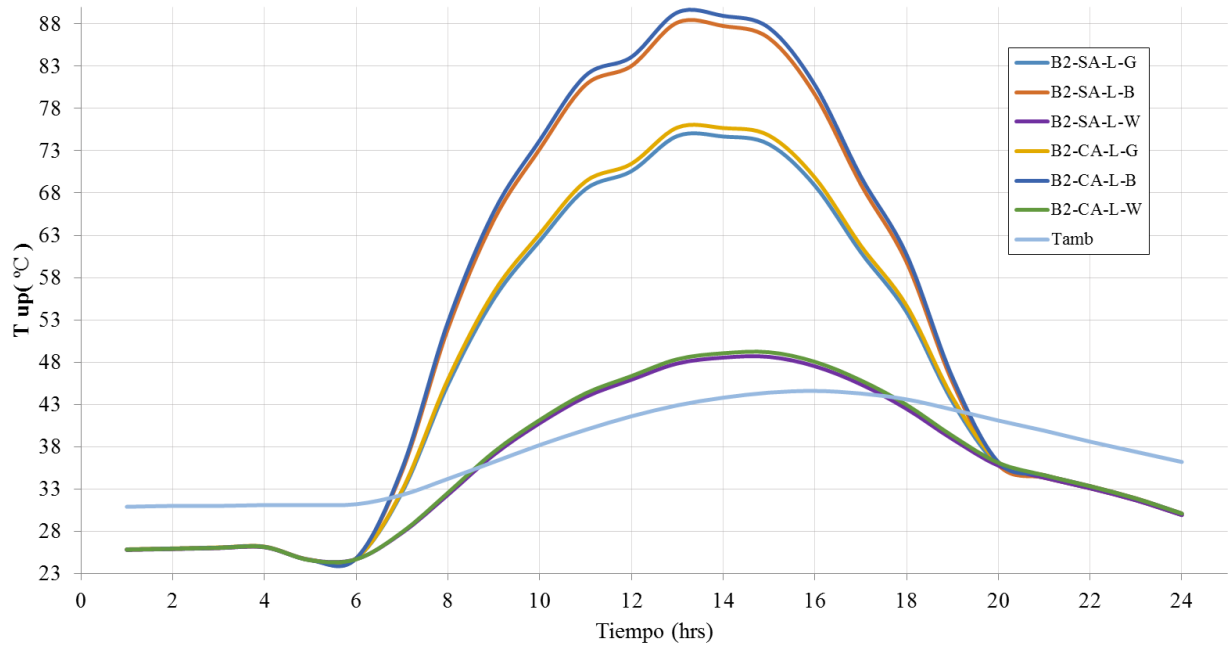


Figura 4.6. Comportamiento de las Temperaturas Promedio al Exterior del Block para un día Cálido

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B2-CA-L-G tiene una temperatura máxima exterior de 75.7°C un aumento de 1°C con respecto a la configuración de referencia debido a la capa de aislamiento que se utiliza. Sin embargo con respecto al uso de película y aislante, la configuración B2-CA-L-B presenta una temperatura máxima de 89.4°C, además de las propiedades de la película negra, el aislante en el exterior funciona como resistencia al flujo de calor al interior, reteniendo así mayor cantidad de energía en la superficie exterior que se refleja en un aumento en la temperatura sobre la misma. Y en cuanto a la configuración B2-CA-L-W, presenta una temperatura máxima exterior de 49.2°C, esto debido a que rechaza la mayor parte de la energía.

4.2.2.2 Fluxes de Calor

La Figura 4.7 muestra el comportamiento de los fluxes de calor promedio al interior de un block de dos huecos en un día cálido y las distintas configuraciones analizadas. El flux de calor máximo se observa entre las 12:00 y las 14:00 hrs. Mediante una integración numérica por la regla del trapecio se puede observar que la configuración estándar B2-SA-L-G tiene una ganancia en el flux de 468.5 Wh/m^2 . Con respecto a la configuración B2-SA-L-B, esta tiene una ganancia de 604.7 Wh/m^2 , este aumento en el flux de calor con respecto a la configuración de referencia se debe a que la reflectancia de la película negra es baja, absorbiendo así la mayor parte de la energía proveniente del exterior, por el contrario en la configuración B2-SA-L-W se observa una ganancia en el flux de 197.7 Wh/m^2 , en la cual se observa una disminución significativa, demostrando así el beneficio del uso de la película blanca al rechazar la mayor parte de la energía del exterior.

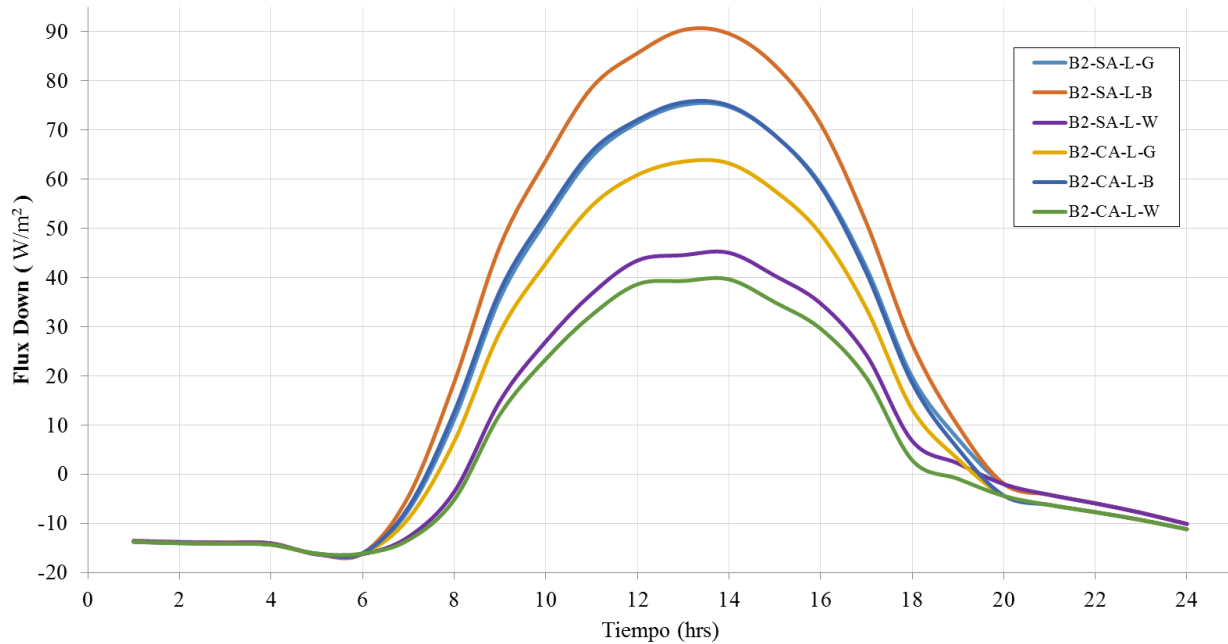


Figura 4.7. Comportamiento del Flux de Calor Promedio en la Superficie Interior del Block para un día Cálido

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B2-CA-L-G tiene una ganancia en el flux de calor de 353.9 Wh/m², ya que el aislante funciona como resistencia al flujo de calor, presentando así un mejor comportamiento con respecto a la configuración de referencia. En la configuración B2-CA-L-B se observa una ganancia en el flux de 462.1 Wh/m², muy similar a la configuración de referencia y con respecto a la configuración B2-CA-L-W, esta tiene una ganancia en el flux de calor de 138.3 Wh/m².

En las Tablas 4.10 y 4.11 se muestran los resultados de los fluxes de calor para las distintas horas para las configuraciones sin y con aislante, respectivamente, así como su respectiva diferencia porcentual con respecto a la configuración estándar. También, se presenta el valor del flux de calor promedio para cada caso. Como se observa la configuración B2-SA-L-G permite un flux máximo de 75.1 W/m² a las 13:00hrs, en la configuración B2-SA-L-B el uso de película negra con respecto a la configuración estándar presenta una diferencia de 15.34W/m² con un flux máximo de 90.3W/m² a la misma hora y una diferencia porcentual de 20.3%, sin embargo, en la configuración B2-SA-L-W, la película blanca muestra una diferencia de 30.45W/m² con respecto a la configuración estándar con un flux máximo de 44.6W/m² y una diferencia porcentual de 40.7%.

Tabla 4.10. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor Promedio al Interior de un Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Cálido

Tiempo (Hrs)	B2-SA-L-G (W/m²)	B2-SA-L-B (W/m²)	%	B2-SA-L-W (W/m²)	%
01:00	-13.5	-13.5	0	-13.6	0
02:00	-13.8	-13.8	0	-13.8	0
03:00	-13.9	-13.9	0	-13.9	0
04:00	-14.0	-14.0	0	-14.1	0
05:00	-16.2	-16.2	0	-16.3	0
06:00	-16.1	-16.1	0	-16.2	0
07:00	-7.3	-4.5	-38.4	-12.7	-74.0
08:00	11.2	18.7	67.2	-3.6	132.0

09:00	35.8	46.4	29.5	14.9	58.4
10:00	51.4	63.8	24.0	27.0	47.5
11:00	64.6	78.6	21.7	36.7	43.2
12:00	71.5	85.6	19.8	43.5	39.2
13:00	75.1	90.3	20.3	44.6	40.7
14:00	74.7	89.6	19.9	45.0	39.7
15:00	68.9	83.2	20.7	40.4	41.4
16:00	59.0	71.2	20.8	34.7	41.1
17:00	42.0	51.2	21.7	24.3	42.2
18:00	19.8	26.5	33.9	6.8	65.6
19:00	7.2	9.9	36.6	2.2	69.4
20:00	-1.9	-1.9	0	-2.0	0
21:00	-4.2	-4.2	0	-4.2	0
22:00	-5.9	-5.9	0	-5.9	0
23:00	-7.8	-7.8	0	-7.8	0
24:00	-10.1	-10.1	0	-10.1	0
q(t)	468.5 Wh/m ²	604.7 Wh/m ²		197.7 Wh/m ²	

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B2-CA-L-G tiene una diferencia de 11.4W/m^2 con un flux de calor máximo de 63.6W/m^2 y una diferencia porcentual de 15.3%; con respecto a la configuración B2-CA-L-B no existe cambio significativo con respecto a la configuración estándar con una diferencia de 0.53W/m^2 en el flux de calor, con un valor máximo de 75.6W/m^2 y una diferencia porcentual de 0.7%; mientras que la configuración B2-CA-L-W tiene una disminución del flux de calor de 35.7W/m^2 con un flux de calor máximo de 39.3W/m^2 y una diferencia porcentual de 47.7%.

Tabla 4.11. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor Promedio al Interior de un Block de Dos Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Cálido

Tiempo (Hrs)	B2-CA-L-G (W/m²)	%	B2-CA-L-B (W/m²)	%	B2-CA-L-W (W/m²)	%
01:00	-13.7	-1.4	-13.7	-1.6	-13.7	-1.8
02:00	-14.0	-1.5	-14.0	-1.7	-14.0	-1.9
03:00	-14.1	-1.7	-14.1	-1.9	-14.1	-2.1
04:00	-14.3	-1.9	-14.3	-2.0	-14.3	-2.2
05:00	-16.1	-0.7	-16.1	-0.5	-16.1	-0.3
06:00	-16.0	-0.4	-16.0	-0.4	-16.1	-0.3
07:00	-9.0	-22.8	-6.7	-8.0	-13.4	-82.4
08:00	6.7	40.3	12.7	13.4	-5.2	146.4
09:00	28.9	19.3	37.3	4.2	12.2	65.9
10:00	42.9	16.7	52.7	2.4	23.4	54.5
11:00	54.5	15.5	65.6	1.6	32.4	49.9
12:00	60.9	14.8	72.0	0.8	38.6	45.9
13:00	63.6	15.3	75.6	0.7	39.3	47.7
14:00	63.2	15.4	75.0	0.3	39.6	47.0
15:00	57.7	16.3	69.0	0.1	35.0	49.3
16:00	48.9	17.1	58.6	0.7	29.6	49.8
17:00	33.7	19.7	41.0	2.5	19.6	53.3
18:00	13.2	33.0	18.6	6.0	2.9	85.5
19:00	3.1	57.0	5.2	27.8	-0.9	112.6
20:00	-4.3	-123.5	-4.3	-122.9	-4.4	-126.3
21:00	-6.2	-49.7	-6.2	-49.9	-6.2	-50.2
22:00	-7.7	-30.5	-7.7	-30.7	-7.7	-30.9
23:00	-9.3	-18.9	-9.3	-19.1	-9.3	-19.3
24:00	-11.1	-10.7	-11.2	-10.8	-11.2	-11.0

q(t)	353.9	462.1	138.3
	Wh/m ²	Wh/m ²	Wh/m ²

4.3 COMPORTAMIENTO TERMICO DEL BLOCK CON TRES HUECOS

En esta sección se presentan los resultados del comportamiento térmico del block con tres huecos para un día frío y un día cálido durante 24 hrs, según las condiciones climáticas presentadas en la Tabla 4.3.

4.3.1 Día Frío

4.3.1.1 Temperatura

En la Figura 4.8 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio de la superficie interior de un block de tres huecos y las distintas configuraciones establecidas en la tesis. Se considera como modelo de referencia a comparar la configuración B3-SA-L-G, la cual no cuenta con película reflectiva ni recubrimiento haciendo referencia a un techo común utilizado en las viviendas, alcanzando una temperatura promedio de 22.3°C. Con respecto al uso de películas reflectivas en contraste a la configuración de referencia, se observa que la configuración B3-SA-L-B alcanzó una temperatura promedio de 23.2°C, muy similar a la configuración estándar con una diferencia menor a 1°C, mientras que la configuración B3-SA-L-W obtuvo en promedio 21.5°C, esto se debe a la alta reflectancia que tiene esta película, rechazando así cierta cantidad de energía.

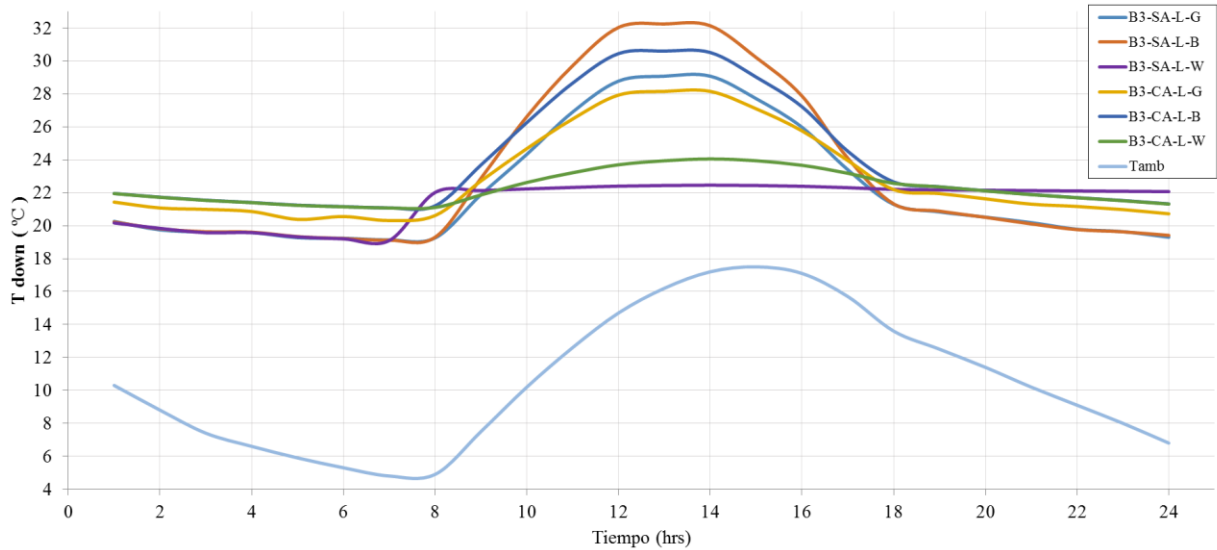


Figura 4.8. Comportamiento de las Temperaturas Promedio al Interior del Block para un día Frío

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B3-CA-L-G tiene una temperatura promedio de 23°C prácticamente tiene el mismo comportamiento que la configuración B3-SA-L-B, esto debido a que los valores de radiación son pequeños y no se observa cambio significativo. Sin embargo con respecto al uso de película y aislante, la configuración B3-CA-L-B al absorber la energía del exterior, su temperatura interior aumenta a un promedio de 24°C. Y en cuanto a la configuración B3-CA-L-W, esta presenta un promedio en la temperatura de 22.3°C, esto debido a que a pesar de que rechaza la mayor parte de la energía proveniente del exterior, su aislamiento le sirve para retener la temperatura al interior del block.

En las Tablas 4.12 y 4.13 se muestran los resultados de las temperaturas promedio al interior del block durante las 24 hrs modeladas para las configuraciones sin y con aislante, respectivamente, así como su diferencia porcentual con respecto a la configuración estándar. Como se observa la configuración B3-SA-L-G alcanza una temperatura máxima de 29.1°C a las 13:00hrs, en la configuración B3-SA-L-B, debido al uso de película negra con respecto a la configuración estándar presenta un cambio de 3.17°C con una temperatura máxima de 32.2°C a la misma hora y una diferencia porcentual de 10.9%, sin embargo en la configuración B3-SA-L-W la película blanca tiene una disminución de la temperatura más significativa de 6.63°C con una máxima de 22.4°C y una diferencia porcentual de 22.8%.

Tabla 4.12. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas Promedio al Interior de un Block de Tres Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Frío

Tiempo (Hrs)	B3-SA-L-G (°C)	B3-SA-L-B (°C)	%	B3-SA-L-W (°C)	%
01:00	20.3	20.2	0	20.2	0
02:00	19.7	19.8	0	19.8	0
03:00	19.6	19.6	0	19.6	0
04:00	19.6	19.6	0	19.6	0
05:00	19.3	19.3	0	19.3	0
06:00	19.2	19.2	0	19.2	0
07:00	19.1	19.1	0	19.1	0
08:00	19.3	19.3	0	22.0	-14.3
09:00	21.9	22.9	4.6	22.1	-1.1
10:00	24.3	26.6	9.4	22.2	8.6
11:00	26.9	29.7	10.5	22.3	17.0
12:00	28.8	32.0	11.3	22.4	22.2
13:00	29.1	32.2	10.9	22.4	22.8
14:00	29.1	32.1	10.5	22.5	22.8
15:00	27.7	30.2	9.0	22.4	19.0
16:00	26.0	27.9	7.3	22.4	13.8
17:00	23.4	24.1	3.0	22.3	4.7
18:00	21.3	21.3	0	22.2	0
19:00	20.8	20.9	0	22.2	0
20:00	20.5	20.5	0	22.2	0
21:00	20.2	20.1	0	22.1	0
22:00	19.8	19.8	0	22.1	0
23:00	19.6	19.6	0	22.1	0
24:00	19.3	19.4	0	22.1	0

Con respecto a las configuraciones que utilizan material aislante en comparación a la configuración estándar, se observa que la configuración B3-CA-L-G tiene una disminución de temperatura pequeña de 0.92°C, la cual representa una diferencia porcentual de 3.2%; con respecto a la configuración B3-CA-L-B la diferencia de temperatura con la configuración estándar es de 1.53°C y un valor máximo de 30.6°C, la cual representa una diferencia porcentual de 5.2%; mientras que la configuración B3-CA-L-W tiene una disminución de la temperatura de 2.13°C con un valor máximo de 23.9°C y una diferencia porcentual de 17.7%.

Tabla 4.13. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas Promedio al Interior de un Block de Tres Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Frío

Tiempo (Hrs)	B3-CA-L-G (°C)	%	B3-CA-L-B (°C)	%	B3-CA-L-W (°C)	%
01:00	21.4	5.8	22.0	8.4	21.9	8.3
02:00	21.1	6.7	21.7	10.1	21.7	10.0
03:00	21.0	7.0	21.5	9.9	21.5	9.8
04:00	20.9	6.5	21.4	9.3	21.4	9.3
05:00	20.4	5.8	21.2	10.2	21.2	10.2
06:00	20.6	6.9	21.2	10.0	21.1	9.9
07:00	20.3	6.1	21.1	10.2	21.1	10.1
08:00	20.6	7.0	21.2	10.1	21.1	9.6
09:00	22.7	3.8	23.7	8.2	21.9	0.1
10:00	24.7	1.4	26.3	7.9	22.6	7.0
11:00	26.5	1.6	28.7	6.5	23.2	13.7
12:00	27.9	2.9	30.4	5.8	23.7	17.7
13:00	28.2	3.2	30.6	5.2	23.9	17.7
14:00	28.2	3.2	30.5	4.9	24.1	17.3
15:00	27.1	2.2	29.0	4.7	23.9	13.6
16:00	25.8	0.9	27.2	4.8	23.7	8.9
17:00	24.0	2.4	24.5	4.8	23.2	0.9

18:00	22.2	4.2	22.7	6.4	22.6	6.0
19:00	21.9	5.3	22.4	7.3	22.4	7.3
20:00	21.6	5.4	22.1	7.8	22.1	7.8
21:00	21.3	5.6	21.9	8.5	21.9	8.4
22:00	21.2	7.0	21.7	9.7	21.7	9.7
23:00	21.0	6.8	21.5	9.6	21.5	9.6
24:00	20.7	7.4	21.3	10.5	21.3	10.4

Con respecto a la temperatura al exterior del block, en la Figura 4.9 se muestra el comportamiento de las temperaturas promedio al exterior del block de tres huecos y sus distintas configuraciones. La configuración de referencia a comparar es la configuración B3-SA-L-G, la cual no cuenta con película reflectiva ni aislante, esta configuración alcanza una temperatura máxima exterior durante el día de 37.4°C. Con respecto al uso de películas reflectivas en contraste a la configuración estándar, se observa que la configuración B3-SA-L-B alcanzó una temperatura máxima de 47°C, mientras que la configuración B3-SA-L-W obtuvo 19.1°C como temperatura máxima, esto se debe a la alta reflectancia que tiene esta película, rechazando así gran cantidad de energía.

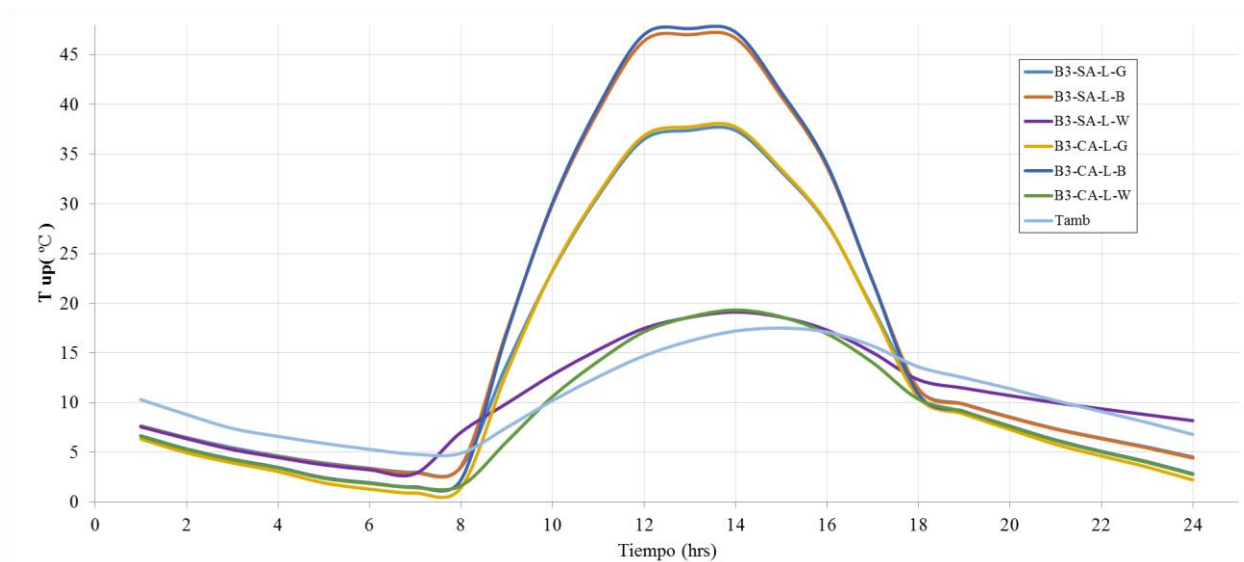


Figura 4.9. Comportamiento de las Temperaturas Promedio al Exterior del Block para un día Frío

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B3-CA-L-G tiene una temperatura máxima exterior de 37.7°C prácticamente tiene el mismo comportamiento que la configuración B3-SA-L-G, esto debido a que los valores de radiación son muy pequeños no se observa cambio significativo. Sin embargo, con respecto al uso de película y aislante, la configuración B3-CA-L-B al absorber gran parte de la energía, esta aumenta su temperatura a 47.6°C. Y en cuanto a la configuración B3-CA-L-W, esta presenta una temperatura máxima exterior de 19.3°C, esto debido a que a pesar de que rechaza la mayor parte de la energía proveniente del exterior, su aislamiento le sirve para retener la temperatura al interior del block.

4.3.1.2 Fluxes de Calor

La Figura 4.10 muestra el comportamiento de los fluxes de calor al interior de un block de tres huecos en un día frío y las distintas configuraciones analizadas durante 24 hrs. El flujo de calor máximo se observa entre las 11:00 y las 13:00 hrs. Mediante una integración numérica por la regla del trapecio se puede observar que la configuración estándar B3-SA-L-G tiene una pérdida de flux de calor de -610.3Wh/m^2 . Con respecto a la configuración B3-SA-L-B esta pierde -474.4Wh/m^2 , por el contrario en la configuración B3-SA-L-W el flux de calor que pierde es de -752.6Wh/m^2 , en la cual se observa una disminución significativa, demostrando así el beneficio del uso de la película blanca al rechazar la mayor parte de la energía del exterior.

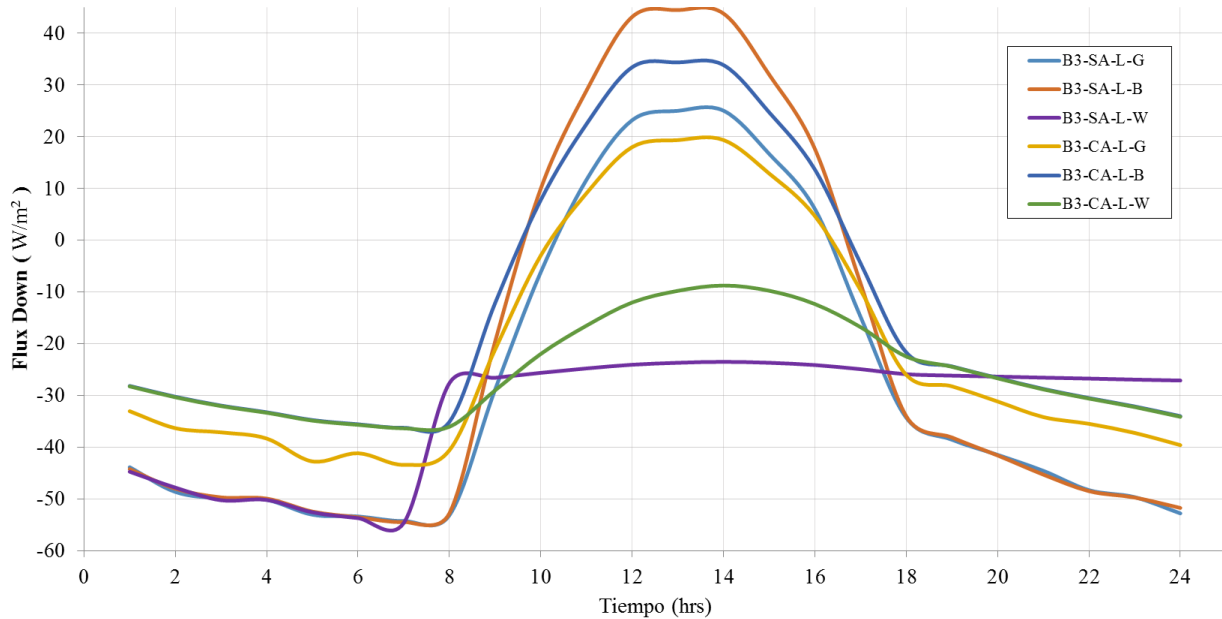


Figura 4.10. Comportamiento del Flujo de Calor al Interior del Block para un día Frío

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B3-CA-L-G tiene una pérdida de flux de calor de -459.1 Wh/m^2 , ya que el aislante funciona como resistencia al flujo de calor, presentando así un mejor comportamiento con respecto a la configuración estándar. La configuración B3-CA-L-B tiene una pérdida de flux de -279.1 Wh/m^2 , un flux de calor mayor debido al uso de película reflectiva negra; con respecto a la configuración B3-CA-L-W, esta pierde -572.5 Wh/m^2 .

En las Tablas 4.14 y 4.15 se muestran los resultados del fluxes de calor promedio al interior del block en las 24 hrs modeladas para las configuraciones sin y con aislante, respectivamente, así como su diferencia porcentual con respecto a la configuración estándar. También, se presenta el valor del flux de calor promedio para cada caso. Como se observa la configuración B3-SA-L-G presenta un flux de calor máximo de 25 W/m^2 a las 13:00hrs, en la configuración B3-SA-L-B el uso de película negra con respecto a la configuración estándar presenta una diferencia de 19.42 W/m^2 con un flux de calor máximo de 44.4 W/m^2 a la misma hora y una diferencia porcentual de 77.9%, sin embargo en la configuración B3-SA-L-W, la película blanca muestra

una diferencia de 48.7 W/m² con respecto a la configuración estándar con un flux de calor máximo de -23.70W/m² y una diferencia porcentual de 194.9%.

Tabla 4.14. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor Promedio al Interior de un Block de Tres Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Frío

Tiempo (Hrs)	B3-SA-L-G (W/m²)	B3-SA-L-B (W/m²)	%	B3-SA-L-W (W/m²)	%
01:00	-43.9	-44.2	0	-44.7	0
02:00	-48.6	-48.0	0	-47.8	0
03:00	-49.9	-49.7	0	-50.3	0
04:00	-50.2	-49.9	0	-50.2	0
05:00	-53.1	-52.4	0	-52.6	0
06:00	-53.4	-53.5	0	-53.7	0
07:00	-54.3	-54.5	0	-54.6	0
08:00	-53.2	-52.8	0	-27.6	48.0
09:00	-28.9	-19.6	-32.1	-26.6	7.9
10:00	-6.2	10.0	-260.8	-25.6	-314.4
11:00	11.7	28.9	147.8	-24.8	312.6
12:00	23.2	43.1	86.1	-24.1	203.9
13:00	25.0	44.4	77.9	-23.7	194.9
14:00	25.0	43.8	75.0	-23.5	194.1
15:00	16.6	32.0	92.0	-23.7	242.4
16:00	6.0	17.6	193.6	-24.1	502.2
17:00	-14.8	-8.4	-43.6	-24.9	-68.2
18:00	-34.3	-34.0	0	-25.9	0
19:00	-38.6	-38.1	0	-26.2	0
20:00	-41.5	-41.6	0	-26.4	0
21:00	-44.6	-45.3	0	-26.6	0

22:00	-48.3	-48.5	0	-26.8	0
23:00	-49.7	-49.7	0	-27.0	0
24:00	-52.8	-51.7	0	-27.1	0
q(t)	-610.3 Wh/m ²	-474.4 Wh/m ²		-752.6 Wh/m ²	

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B3-CA-L-G tiene una diferencia de 5.6W/m^2 al presentar un flux de calor máximo de 19.31W/m^2 y una diferencia porcentual de 22.7%; con respecto a la configuración B3-CA-L-B no existe cambio significativo con respecto a la configuración estándar con una diferencia de 9.34W/m^2 en el flux de calor, con un valor máximo de 34.3W/m^2 y una diferencia porcentual de 37.4%; mientras que la configuración B3-CA-L-W tiene una disminución del flux de calor de 34.7W/m^2 con un flujo de calor máximo de -9.8W/m^2 y una diferencia porcentual de 139.2%.

Tabla 4.15. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor Promedio al Interior de un Block de tres Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Frío

Tiempo (Hrs)	B3-CA-L-G (W/m²)	%	B3-CA-L-B (W/m²)	%	B3-CA-L-W (W/m²)	%
01:00	-33.1	-24.7	-28.2	-35.8	-28.3	-35.6
02:00	-36.3	-25.3	-30.3	-37.8	-30.4	-37.6
03:00	-37.1	-25.5	-32.0	-35.9	-32.1	-35.7
04:00	-38.3	-23.6	-33.3	-33.7	-33.4	-33.5
05:00	-42.8	-19.4	-34.8	-34.5	-34.9	-34.3
06:00	-41.2	-22.9	-35.6	-33.3	-35.7	-33.1
07:00	-43.4	-20.0	-36.3	-33.2	-36.4	-33.0
08:00	-40.6	-23.6	-35.1	-34.0	-36.1	-32.2
09:00	-21.1	-26.7	-12.2	-57.9	-29.0	-0.5
10:00	-3.0	-52.0	7.7	-225.1	-22.0	-255.4
11:00	9.1	22.3	22.4	92.3	-16.5	241.7
12:00	18.0	22.4	33.4	44.2	-12.0	152.0

13:00	19.3	22.7	34.3	37.4	-9.8	139.2
14:00	19.3	22.7	33.8	35.2	-8.8	135.1
15:00	12.9	22.7	24.7	48.2	-9.8	158.8
16:00	4.6	22.6	13.6	127.1	-12.4	305.8
17:00	-9.7	-34.8	-4.5	-69.8	-16.8	-13.4
18:00	-26.0	-24.1	-21.7	-36.8	-22.5	-34.4
19:00	-28.3	-26.7	-24.4	-36.7	-24.5	-36.5
20:00	-31.2	-24.8	-26.6	-35.8	-26.7	-35.6
21:00	-34.2	-23.3	-28.8	-35.5	-28.9	-35.3
22:00	-35.5	-26.5	-30.5	-36.8	-30.6	-36.6
23:00	-37.3	-25.0	-32.1	-35.3	-32.2	-35.1
24:00	-39.6	-25.0	-34.0	-35.6	-34.1	-35.3
q(t)	-459.1		-273.1		-572.5	

4.3.2 Día Cálido

4.3.2.1 Temperatura

En cuanto a la temperatura promedio de la superficie interior de un block de tres huecos en un día cálido y las distintas configuraciones establecidas en la tesis, se considera como modelo de referencia a la configuración B3-SA-L-G, la cual no cuenta con película reflectiva ni recubrimiento, alcanzando una temperatura promedio de 31.76°C. Con respecto al uso de películas reflectivas en contraste a la configuración estándar, la configuración B3-SA-L-B alcanzó una temperatura promedio de 33.4°C, 1.64°C por arriba de la configuración estándar, este aumento se debe a las propiedades de la película negra; por el contrario la configuración B3-SA-L-W obtuvo en promedio 28.55°C, esto se debe a la alta reflectancia que tiene esta película, rechazando más energía en comparación con la película negra y disminuyendo la temperatura al interior del block.

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B3-CA-L-G tiene una temperatura promedio de 30.2°C una disminución de 1.6°C con respecto a la configuración estándar debido a la capa de aislamiento que se utiliza. Sin embargo con respecto al uso de película y aislante, la configuración B3-CA-L-B presenta una temperatura promedio de 31.5°C, que a pesar de absorber gran parte de la energía del exterior, no existe un aumento significativo de la temperatura al interior del block gracias al uso del aislante, manteniéndose así prácticamente igual que la configuración estándar. En cuanto a la configuración B3-CA-L-W, presenta un promedio en la temperatura de 27.8°C, esto es gracias a que rechaza la mayor parte de la energía proveniente del exterior, además del beneficio al usar aislamiento brinda una temperatura de mayor confort al interior con respecto a las otras configuraciones con una disminución de 4°C con respecto a la configuración estándar.

En las Tablas 4.16 y 4.17 se muestran los resultados de las temperaturas promedio al interior del block durante las 24 hrs modeladas para las configuraciones sin y con aislante, respectivamente, así como su diferencia porcentual con respecto a la configuración estándar. Como se observa la configuración B3-SA-L-G alcanza una temperatura máxima de 41.1°C a las 13:00hrs, en la configuración B3-SA-L-B, debido al uso de película negra con respecto a la configuración estándar presenta un cambio de 4.36°C con una temperatura máxima de 45.4°C a la misma hora y una diferencia porcentual de 10.6%, sin embargo en la configuración B3-SA-L-W la película blanca tiene una disminución de la temperatura más significativa de 8.7°C con una máxima de 32.4°C y una diferencia porcentual de 21.2%.

Tabla 4.16. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas Promedio al Interior de un Block de Tres Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Cálido

Tiempo (Hrs)	B3-SA-L-G (°C)	B3-SA-L-B (°C)	%	B3-SA-L-W (°C)	%
01:00	25.3	25.3	0	25.3	0
02:00	25.3	25.3	0	25.3	0
03:00	25.3	25.3	0	25.3	0
04:00	25.4	25.4	0	25.4	0

05:00	24.9	24.9	0	24.9	0
06:00	25.0	25.0	0	24.9	0
07:00	27.4	28.2	2.9	25.9	5.6
08:00	31.5	33.6	6.7	27.3	13.2
09:00	34.8	37.8	8.6	28.9	17.1
10:00	37.0	40.6	9.5	30.1	18.8
11:00	39.0	43.0	10.3	31.1	20.4
12:00	39.7	43.8	10.2	31.8	20.1
13:00	41.1	45.4	10.6	32.4	21.2
14:00	41.1	45.3	10.3	32.6	20.6
15:00	40.7	44.8	10.0	32.6	20.0
16:00	39.2	42.7	8.9	32.3	17.6
17:00	36.6	39.2	7.1	31.6	13.8
18:00	34.3	36.2	5.6	30.6	10.7
19:00	30.9	31.6	2.4	29.5	4.6
20:00	28.5	28.5	0	28.4	0
21:00	28.0	28.0	0	28.0	0
22:00	27.6	27.6	0	27.6	0
23:00	27.1	27.1	0	27.1	0
24:00	26.6	26.6	0	26.6	0

Con respecto al uso de aislante en comparación a la configuración estándar, se observa que la configuración B3-CA-L-G tiene una disminución de temperatura de 3.7°C al presentar una temperatura máxima de 37.4°C y una diferencia porcentual de 8.9%; con respecto a la configuración B3-CA-L-B la diferencia de temperatura con la configuración estándar es de 0.3°C con una máxima de 40.8°C; mientras que la configuración B3-CA-L-W tiene una disminución de la temperatura de 10.4°C con un valor máximo de 30.7°C y una diferencia porcentual de 25.3%.

Tabla 4.17. Resumen de la Evaluación de las Temperaturas Promedio al Interior de un Block de Tres Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Cálido

Tiempo (Hrs)	B3-CA-L-G (°C)	%	B3-CA-L-B (°C)	%	B3-CA-L-W (°C)	%
01:00	25.2	0	25.2	0	25.2	0
02:00	25.2	0	25.2	0	25.2	0
03:00	25.3	0	25.3	0	25.3	0
04:00	25.3	0	25.3	0	25.3	0
05:00	24.9	0	24.9	0	24.9	0
06:00	25.0	0	25.0	0	24.9	0
07:00	26.9	1.9	27.5	0	25.7	6.3
08:00	30.1	4.5	31.7	0.4	26.8	14.8
09:00	32.6	6.3	34.9	0.8	28.0	19.5
10:00	34.3	7.3	37.0	0.4	28.9	21.9
11:00	35.8	8.2	38.9	0.0	29.7	23.9
12:00	36.4	8.5	39.5	0.3	30.2	24.0
13:00	37.4	8.9	40.8	0.7	30.7	25.3
14:00	37.4	8.9	40.7	0.8	30.9	24.8
15:00	37.2	8.8	40.3	1.0	30.9	24.2
16:00	35.9	8.2	38.6	1.1	30.6	21.8
17:00	34.0	7.2	36.0	1.3	30.1	17.8
18:00	32.2	6.0	33.7	1.7	29.4	14.3
19:00	29.6	4.2	30.2	1.7	28.5	7.8
20:00	27.7	2.6	27.7	2.3	27.7	2.7
21:00	27.3	2.3	27.3	2.6	27.3	2.3
22:00	27.0	2.0	27.0	2.3	27.0	2.1
23:00	26.7	1.7	26.7	2.0	26.7	1.7
24:00	26.2	1.3	26.2	1.7	26.2	1.3

En cuanto a las temperaturas en la superficie exterior del block, en la Figura 4.11 se muestra el comportamiento de la temperatura promedio al exterior de un block de tres huecos en un día cálido y las distintas configuraciones establecidas en la tesis. La configuración de referencia B3-SA-L-G alcanza una temperatura máxima de 73.8°C. Con respecto al uso de películas reflectivas en contraste a la configuración de referencia, se observa que la configuración B3-SA-L-B alcanzó una temperatura máxima de 87°C, mientras que la configuración B3-SA-L-W obtuvo 48.1°C como temperatura máxima, esto se debe a la alta reflectancia que tiene esta película, rechazando así gran cantidad de energía y disminuyendo la temperatura en la superficie interior del block.

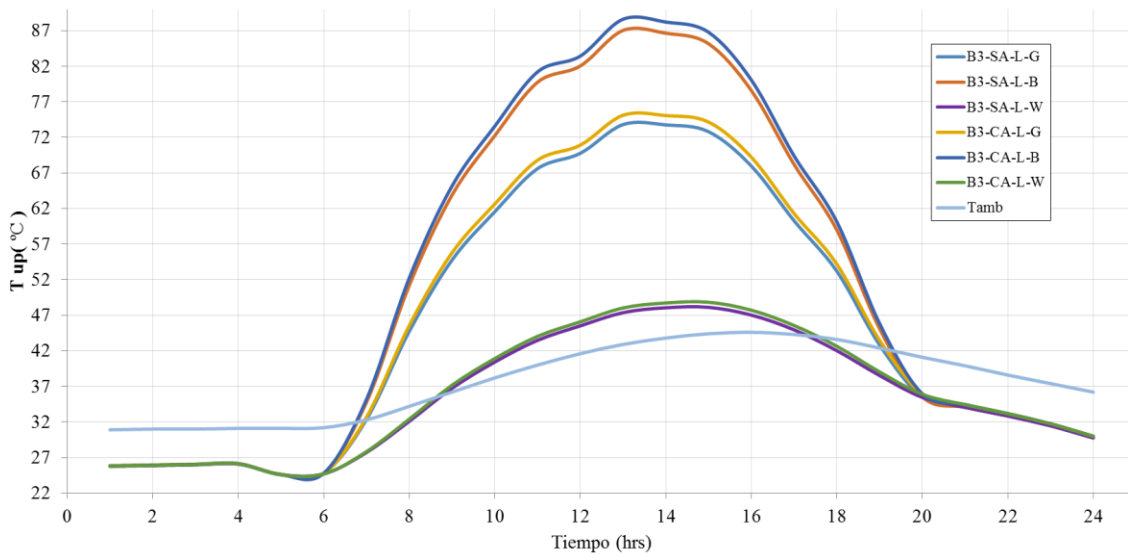


Figura 4.11. Comportamiento de las Temperaturas Promedio al Exterior del Block para un día Cálido

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B3-CA-L-G tiene una temperatura máxima exterior de 75.1°C un aumento de 1.3°C con respecto a la configuración estándar debido a la capa de aislamiento que se utiliza. Sin embargo con respecto al uso de película y aislante, la configuración B3-CA-L-B presenta una temperatura máxima de 88.6°C, además de las propiedades de la película negra, el aislante en el exterior funciona como resistencia al flujo de calor al interior, reteniendo así mayor cantidad de energía en la superficie exterior que se refleja en un aumento en la temperatura sobre la misma. Y en cuanto a la configuración B3-CA-L-W, presenta una temperatura máxima exterior de 48.8°C, esto es gracias a que rechaza la mayor parte de la energía.

4.3.2.2 Fluxes de Calor

Respecto a los fluxes de calor promedio al interior de un block de tres huecos en un día cálido y las distintas configuraciones analizadas, se observa que el flux máximo se alcanza entre las 12:00 y las 14:00 hrs. Mediante una integración numérica por la regla del trapecio se puede observar que la configuración estándar B3-SA-L-G tiene una ganancia de flux de calor promedio de 988.4Wh/m^2 . Con respecto a la configuración B3-SA-L-B presenta una ganancia de 1226.8Wh/m^2 , este aumento en el flux respecto a la configuración estándar se debe a que la reflectancia de la película negra es muy baja, absorbiendo así la mayor parte de la energía, por el contrario en la configuración B3-SA-L-W que presenta una ganancia 516Wh/m^2 se observa una disminución significativa del flux de calor, demostrando así el beneficio del uso de la película blanca al rechazar la mayor parte de la energía del exterior.

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B3-CA-L-G permite tener una ganancia de flux de calor de 765.9Wh/m^2 , ya que el aislante funciona como resistencia al flujo de calor, presentando así un mejor comportamiento con respecto a la configuración estándar. La configuración B3-CA-L-B muestra una ganancia de 949.3Wh/m^2 , muy similar a la configuración estándar, un comportamiento que ya se había comentado para esta configuración en la sección de las temperaturas; en cuanto a la configuración B3-CA-L-W, esta presenta una ganancia de flux de calor de 400.9Wh/m^2 .

En las Tablas 4.18 y 4.19 se muestran los resultados de los fluxes de calor promedio al interior del block en las 24 hrs modeladas para las configuraciones sin y con aislante, respectivamente, así como su diferencia porcentual con respecto a la configuración estándar. También, se presenta el valor del flux de calor promedio para cada caso. Como se observa la configuración B3-SA-L-G presenta un flux de calor máximo de 98.5W/m^2 a las 13:00hrs, en la configuración B3-SA-L-B el uso de película negra con respecto a la configuración estándar presenta una diferencia de 26.8W/m^2 con un flux de calor máximo de 125.3W/m^2 a la misma hora y una diferencia porcentual de 27.1%, sin embargo en la configuración B3-SA-L-W, la película blanca muestra

una diferencia de 53.4W/m^2 con respecto a la configuración estándar con un flux de calor máximo de 45.1W/m^2 y una diferencia porcentual de 54.2%.

Tabla 4.18. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor al Interior de un Block de Tres Huecos para las distintas Configuraciones sin Aislante en un día Cálido

Tiempo (Hrs)	B3-SA-L-G (W/m²)	B3-SA-L-B (W/m²)	%	B3-SA-L-W (W/m²)	%
01:00	1.7	1.6	3.2	1.6	6.3
02:00	1.9	1.8	2.8	1.8	5.6
03:00	2.1	2.0	2.5	2.0	5.0
04:00	2.3	2.2	2.3	2.2	4.6
05:00	-0.8	-0.9	-7.3	-0.9	-14.5
06:00	-0.5	-0.5	-0.2	-0.7	-49.7
07:00	14.9	19.7	32.7	5.5	63.1
08:00	39.8	52.9	32.7	14.3	64.1
09:00	60.1	78.5	30.7	23.7	60.6
10:00	73.8	95.4	29.3	31.1	57.8
11:00	86.0	110.5	28.5	37.3	56.7
12:00	90.4	115.2	27.4	41.4	54.2
13:00	98.5	125.3	27.1	45.1	54.2
14:00	98.4	124.5	26.5	46.5	52.7
15:00	96.5	121.5	25.9	46.6	51.7
16:00	86.8	108.2	24.7	44.4	48.8
17:00	71.2	87.2	22.4	40.3	43.5
18:00	56.9	68.6	20.5	34.3	39.6
19:00	36.0	40.6	12.8	27.3	24.2
20:00	21.2	21.2	0.2	21.1	0.5
21:00	18.3	18.3	0.1	18.3	0.2

22:00	15.9	15.8	0.1	15.8	0.3
23:00	13.1	13.1	0.2	13.0	0.4
24:00	9.6	9.6	0.3	9.6	0.6
q(t)	988.4 Wh/m ²	1226.8 Wh/m ²		516 Wh/m ²	

Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B3-CA-L-G tiene una diferencia de 22.4W/m² presentando un flujo de calor máximo de 76.1W/m² y una diferencia porcentual de 22.8%; con respecto a la configuración B3-CA-L-B no existe cambio significativo con respecto a la configuración estándar con una diferencia de 1.9W/m² en el flujo de calor, con un valor máximo de 96.6W/m²; mientras que la configuración B3-CA-L-W tiene una disminución del flujo de calor de 63.6W/m² con un flujo de calor máximo de 34.9W/m² y una diferencia porcentual de 64.5%.

Tabla 4.19. Resumen de la Evaluación del Flujo de Calor Promedio al Interior de un Block de Tres Huecos para las distintas Configuraciones con Aislante en un día Cálido

Tiempo (Hrs)	B3-CA-L-G (W/m²)	%	B3-CA-L-B (W/m²)	%	B3-CA-L-W (W/m²)	%
01:00	1.3	22.0	1.3	24.5	1.2	27.0
02:00	1.5	22.0	1.4	24.2	1.4	26.4
03:00	1.6	22.1	1.6	24.1	1.5	26.0
04:00	1.8	22.1	1.7	23.9	1.7	25.7
05:00	-0.6	-23.6	-0.7	-18.1	-0.7	-12.6
06:00	-0.3	-23.3	-0.3	-23.2	-0.5	-14.4
07:00	11.6	21.6	15.4	4.0	4.3	71.0
08:00	31.2	21.7	41.3	3.7	11.2	71.8
09:00	46.7	22.2	60.9	1.5	18.5	69.3
10:00	57.1	22.6	73.7	0.1	24.1	67.3
11:00	66.5	22.7	85.3	0.8	28.9	66.4
12:00	69.7	22.9	88.7	1.9	32.0	64.6

13:00	76.1	22.8	96.6	2.0	34.9	64.5
14:00	76.0	22.8	95.9	2.5	36.0	63.4
15:00	74.6	22.7	93.8	2.8	36.2	62.5
16:00	67.1	22.7	83.6	3.7	34.5	60.3
17:00	55.1	22.7	67.4	5.4	31.2	56.2
18:00	44.3	22.2	53.3	6.3	26.8	53.0
19:00	28.1	22.0	31.6	12.1	21.3	40.8
20:00	16.6	21.7	16.6	21.6	16.5	22.1
21:00	14.3	21.6	14.3	21.7	14.3	21.8
22:00	12.4	21.7	12.4	21.8	12.4	21.9
23:00	10.3	21.6	10.2	21.8	10.2	21.9
24:00	7.6	21.3	7.6	21.5	7.5	21.8
q(t)	765.9 Wh/m ²		949.3 Wh/m ²		400.9 Wh/m ²	

4.4 RESUMEN COMPARATIVO DE TODAS LAS CONFIGURACIONES

En esta sección se realiza una comparación del flux de calor promedio total de las distintas configuraciones, comparando los resultados de un día frío para dos y tres huecos, como para el día cálido para dos y tres huecos.

El flux de calor promedio total se obtiene mediante una integración numérica de los fluxes obtenidos durante las 24hrs. utilizando la regla del trapecio (Ec. 78) en cada hora durante todo el día.

$$\int_{1:00}^{24:00} q(t) dt = \frac{\Delta t}{2} [q_{t=1:00} + \sum_{t=2:00}^{t=23:00} 2 * q(t) + q(t = 24:00)] \quad \text{Ec. 78}$$

En las Tablas 4.20 y 4.21 se muestran los resultados de los flux de promedio, así como las diferencias y porcentaje con respecto al block de referencia en cada caso.

4.4.1 Block de Dos Huecos

En la Tabla 4.20 se pueden apreciar los resultados de los fluxes de calor promedio de todas las configuraciones con respecto a la configuración estándar B2-SA-L-G para el día frío y cálido. Para el día frío se puede observar que la configuración estándar presenta una pérdida de flux de calor promedio total de -525.4 Wh/m^2 , esta pérdida es el efecto de la diferencia de temperaturas del interior con respecto al exterior, en donde para el día frío la temperatura interior es mayor que la temperatura ambiente. Respecto al uso de película reflectiva, la configuración B2-SA-L-B presenta un promedio de -450.9 Wh/m^2 , esta disminución de pérdida de flux de calor con respecto a la configuración estándar se debe a que gracias a las propiedades de la película negra logra absorber mayor cantidad de energía del exterior, lo que implica que la pérdida de calor del interior al exterior sea menor con respecto a la configuración de referencia en 14.2%. Sin embargo, la configuración B2-SA-L-W presenta una pérdida de flux de -708.8 Wh/m^2 , lo cual representa una pérdida de flux de calor mayor con respecto a la configuración de referencia en 34.9%. En cuanto a las configuraciones con uso de aislante, la configuración B2-CA-L-G alcanza un flux promedio de energía de -415.6 Wh/m^2 , lo que representa una ganancia del 20.9% de flux de calor. La configuración B2-CA-L-B muestra un flux de calor promedio de -357 Wh/m^2 con una ganancia del 32% de flux de calor proveniente del exterior. El uso de película blanca y aislamiento en la configuración B2-CA-L-W presenta una pérdida de calor menor con respecto a la configuración estándar en comparación a la configuración B2-SA-L-W al alcanzar un promedio de -553.3 Wh/m^2 , es decir, presenta una pérdida del 5.3%, esta reducción en la pérdida se debe a que al igual que el aislamiento funciona como resistencia al flujo del exterior al interior, tiene el mismo comportamiento del interior al exterior.

Al igual que los resultados para el día frío, en el caso del día cálido se toma como referencia la configuración B2-SA-L-G. La configuración de referencia presenta un flux de calor promedio de 468.5 Wh/m^2 . En cuanto al uso de películas reflectivas, la configuración B2-SA-L-B presenta un flux de calor de 604.7 Wh/m^2 , es decir, tuvo una ganancia de energía de 29.1% con respecto a la configuración de referencia debido a las propiedades de la película negra que absorben la mayor parte de la energía, mientras que la configuración B2-SA-L-W presentó un flux promedio de

197.7 Wh/m², lo cual representa una reducción del 57.8% en el flux de calor con respecto a la configuración de referencia al rechazar energía del exterior. Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B2-CA-L-G alcanzó un flux promedio de 353.9 Wh/m², con una reducción del 24.4% en ganancia de energía con respecto a la configuración de referencia. Por otra parte, la configuración B2-CA-L-B tuvo un flux promedio de 462.1 Wh/m², reduciendo solamente 1.4% de energía con respecto a la configuración estándar, a pesar de contar con película negra el uso del material aislante ayuda a disminuir el flux hacía el interior del block. Mientras tanto la configuración B2-CA-L-W muestra mejores resultados con un flux promedio de 138.3 Wh/m², es decir, tuvo una reducción del 70.5% de la ganancia de energía con respecto a la configuración de referencia.

En las dos últimas columnas de la Tabla 4.20, se muestran las cargas de calentamiento y enfriamiento para cada configuración. Estas cargas se determinaron con base al balance entre los valores de la condición del día frío y cálido. Se observa que la configuración B2-SA-L-G es la que menor carga de calentamiento requiere y la configuración B2-CA-L-B requiere la menor carga de enfriamiento.

4.4.2 Block de Tres Huecos

En la Tabla 4.21 se pueden apreciar los resultados de los fluxes de calor promedio de todas las configuraciones con respecto a la configuración estándar B3-SA-L-G en el día frío y cálido. En el caso de la condición del día frío, la configuración estándar presenta una pérdida de flux de calor promedio total de -610.3Wh/m², esta pérdida es el efecto de la diferencia de temperaturas del interior con respecto al exterior, en donde para el día frío la temperatura interior es mayor que la temperatura ambiente. Respecto al uso de película reflectiva, la configuración B3-SA-L-B presenta un promedio de -474.4Wh/m², esta disminución de pérdida de flux de calor con respecto a la configuración estándar se debe a las propiedades de la película negra logra absorber mayor cantidad de energía del exterior, lo que implica que la pérdida de calor del interior al exterior sea menor con respecto a la configuración de referencia en 22.3%. Sin embargo, la configuración B3-SA-L-W presenta una pérdida de flux de -752.6 Wh/m², lo cual representa un aumento en la pérdida de flux de calor mayor con respecto a la configuración de referencia en 23.3%. En

cuanto a las configuraciones con uso de aislante, la configuración B3-CA-L-G alcanza un flux promedio de energía de -459.1 Wh/m^2 , lo que representa una ganancia del 24.8% de flux de calor. La configuración B3-CA-L-B muestra un flux de calor promedio de -279.1 Wh/m^2 con una ganancia del 54.3% de flux de calor proveniente del exterior. El uso de película blanca y aislamiento en la configuración B3-CA-L-W presenta una pérdida de calor menor con respecto a la configuración estándar en comparación a la configuración B3-SA-L-W al alcanzar un promedio de -572.5 Wh/m^2 , es decir, presenta una pérdida del 6.2%, esta reducción en la pérdida se debe a que al igual que el aislamiento funciona como resistencia al flujo del exterior al interior, tiene el mismo comportamiento del interior al exterior.

Para el caso de la condición de día cálido, se usa la configuración de referencia B3-SA-L-G, la cual presenta un flux de calor promedio de 988.4 Wh/m^2 . En cuanto al uso de películas reflectivas, la configuración B3-SA-L-B presenta un flux de calor de 1226.8 Wh/m^2 , es decir, tuvo una ganancia mayor de energía con 24.1% con respecto a la configuración de referencia, mientras que la configuración B3-SA-L-W presentó un flux promedio de 516 Wh/m^2 , lo cual representa una pérdida del 47.8% con respecto a la configuración de referencia al rechazar energía del exterior. Con respecto al uso de aislamiento, la configuración B3-CA-L-G alcanzó un flux promedio de 765.9 Wh/m^2 , con una reducción de la ganancia de calor del 22.5% con respecto a la configuración de referencia. Por otra parte, la configuración B3-CA-L-B tuvo un flux promedio de 949.3 Wh/m^2 , lo cual representa una reducción del 4% de ganancia de energía con respecto a la configuración estándar. Finalmente, la configuración B3-CA-L-W muestra mejores resultados con un flux promedio de 400.9 Wh/m^2 , es decir, tuvo una reducción de 59.4% de la ganancia de energía con respecto a la configuración de referencia.

Las dos últimas columnas de la Tabla 4.21 muestran los valores correspondientes de las cargas de calentamiento y enfriamiento. En general se puede decir que la configuración B3-CA-L-W es la que menor carga térmica necesita con un valor de -171.6 Wh/m^2 , mientras que la configuración B3-SA-L-B es la que más carga térmica necesita con un valor de 752.4 Wh/m^2 .

Tabla 4.20. Flux de Calor Promedio para las Configuraciones de un Block de Dos Huecos

Configuración	FRÍO	PÉRDIDA DE ENERGÍA	CÁLIDO	GANANCIA DE ENERGÍA	Carga Térmica	
	q_{int} (t) (Wh/m ²)	Dif. (%)	q_{int} (t) (Wh/m ²)	Dif. (%)	Calentamiento	Enfriamiento
B2-SA-L-G	-525.4		468.5		-56.9	----
B2-SA-L-B	-450.9	↓14.2	604.7	↑29.1	----	153.8
B2-SA-L-W	-708.8	↑34.9	197.7	↓57.8	-511.1	----
B2-CA-L-G	-415.6	↓20.9	353.9	↓24.4	-61.7	----
B2-CA-L-B	-357	↓32	462.1	↓1.4	----	105.1
B2-CA-L-W	-553.3	↑5.3	138.3	↓70.5	-415	----

Tabla 4.21. Flux de Calor Promedio para las Configuraciones de un Block de Tres Huecos

Configuración	FRÍO	PÉRDIDA DE ENERGÍA	CÁLIDO	GANANCIA DE ENERGÍA	Carga Térmica	
	q_{int} (t) (Wh/m ²)	Dif. (%)	q_{int} (t) (Wh/m ²)	Dif. (%)	Calentamiento	Enfriamiento
B3-SA-L-G	-610.3		988.4		----	378.1
B3-SA-L-B	-474.4	↓22.3	1226.8	↑24.1	----	752.4
B3-SA-L-W	-752.6	↑23.3	516	↓47.8	-236.6	----
B3-CA-L-G	-459.1	↓24.8	765.9	↓22.5	----	306.8
B3-CA-L-B	-279.1	↓54.3	949.3	↓4	----	670.2
B3-CA-L-W	-572.5	↓6.2	400.9	↓59.4	-171.6	----

CAPITULO V

CONCLUSIONES

En este Capítulo se presentan las conclusiones obtenidas después de analizar e interpretar los resultados mostrados en el Capítulo IV, así como las recomendaciones para trabajos futuros.

5.1 CONCLUSIONES

Se realizó la evaluación pseudo-transitoria del block con dos y tres cavidades para techos con condiciones climáticas de Hermosillo, Sonora del año 2014, considerando condiciones ambientales en la parte superior del block (exterior) y temperatura fija de 25°C al interior del block. En el estudio se analizó convección natural al interior de las cavidades, acoplada con conducción de calor en las regiones sólidas del block.

El modelo físico de estudio consistió en un block de 40x15cm con cavidades de 10x10cm y 10x16cm para dos y tres cavidades, respectivamente. Se consideraron las paredes verticales del block adiabáticas, mientras que en la pared superior (norte) se consideró transferencia de calor por convección y radiación, mientras que en la pared interior (sur) se consideró solamente transferencia de calor por convección. Entre las distintas configuraciones analizadas se encuentran el block sin recubrimiento, el block con recubrimiento negro, block con recubrimiento blanco y, las tres configuraciones anteriores utilizando aislamiento térmico tanto para el block de dos como de tres cavidades.

Durante el desarrollo del código numérico se verificaron los resultados mediante resultados reportados en la literatura, concluyendo así que el código implementado proporciona resultados confiables y satisfactorios.

Después de analizar e interpretar los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

1. El uso de películas reflectivas puede beneficiar o afectar el flux de calor al interior del block incrementando o disminuyendo el mismo, lo cual se ve reflejado directamente en las temperaturas. La película negra utilizada en el día cálido produce una ganancia de energía de hasta 29.1% sin aislante y de hasta 4% con aislante con respecto a la configuración sin aislante ni película reflectiva, mientras que para el día frío la ganancia de energía es de hasta 22.3% sin aislante y de 54.3% con uso de aislamiento. Por su parte la película blanca reduce la ganancia de energía hasta 57.8% para un día cálido sin aislante y hasta 70.5% con aislante, en cuanto al día frío la película blanca reduce la ganancia hasta en 23.3% sin aislante y en 5.3% con uso de aislante.

2. Una buena configuración para el clima frío puede no ser la más adecuada para el clima cálido y viceversa, ya que mientras en el clima frío se busca absorber la mayor cantidad de energía del exterior para tener una mayor ganancia de energía, en el clima cálido se busca lo contrario, rechazar la mayor cantidad de energía del exterior para reducir la ganancia de energía al interior de la superficie interior del block. Este efecto se remarca con el uso de aislamiento térmico, ya que el aislamiento térmico beneficia en gran porcentaje en días cálidos, sin embargo en días fríos tiene el efecto inverso al impedir el flux de calor a través del block.
3. Utilizar una configuración para condiciones climáticas frías y otra para las cálidos, no es posible, entonces se determinan las cargas térmicas con base a la información de ambos climas, de donde la configuración B2-SA-L-G considerada la configuración de referencia presenta una pérdida total de flux de -56.9Wh/m^2 , siendo la menor carga térmica usando un block de dos cavidades, es decir, esa es la carga de energía externa necesaria para brindar la temperatura establecida para condiciones de confort, mientras que la configuración B2-SA-L-W presenta una pérdida total de -511.1Wh/m^2 al ser la configuración con mayor pérdida de energía para dos cavidades.
4. En cuanto a la configuración del block de tres cavidades, la configuración B3-CA-L-W es la que presenta la menor carga térmica con -171.6Wh/m^2 , mientras que la configuración B3-SA-L-B es la que tiene la mayor ganancia de energía con 752.4Wh/m^2 .

5.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

El campo de estudio de blocks utilizados como techos puede ser muy amplio, con el objetivo de analizar a más detalle el problema aquí planteado se brindan algunas recomendaciones para continuar el estudio a futuro, tales como:

1. Realizar el estudio con datos climatológicos de otros estados de la república mexicana.

2. Realizar la evaluación dinámica del sistema.
3. Evaluar el efecto del uso del block como techo en habitaciones.
4. Considerar los efectos de intercambio radiactivo en el interior de las celdas del block.
5. Realizar estudios experimentales con el propósito de validar los resultados obtenidos del estudio numérico.

Referencias

Abdou O., Murali K., “The effect of air cells and mortar joints on the thermal resistance of concrete masonry walls”, *Energy and Buildings*, 21 (1994) 111-119.

Aguayo F., Peralta M., Lama J., Soltero V., “*Ecodiseño: Energía sostenible de la cuna a la cuna (C2C)*”, RC Libros, (2011).

Ait-Taleb T., Abdelbaki A., Zrikem Z., “Simulation of coupled heat transfers in a hollow tile with two vertical and three horizontal uniform rectangular cavities heated from below or above”, *Energy and Buildings*, 84 (2014) 628–632.

Al-Hazmy M., “Analysis of coupled natural convection-conduction effects on the heat transport through hollow building blocks”, *Energy and Buildings*, 38 (2006) 515–521.

Antar M., Baig H., “Conjugate conduction-natural convection heat transfer in a hollow building block”, *Applied Thermal Engineering*, 29 (2009) 3716-3720.

Baig H., Antar M., “Conduction/Natural convection analysis of heat transfer across multi-layer building blocks”, 5th European Thermal-Sciences Conference, (2008).

Caranua C., Grima C., Yousif C., Buhagiar S., Curmi R., “Overview of testing methodologies for thermally improved hollow-core concrete blocks”, *Energy Procedia*, 62 (2014) 180-189.

Córdoba O. “Fuentes renovables y generación de energía limpia su regulación en Honduras”, *Revista de Derecho*, 35 (2014) 93-112.

De Vahl Davis G., “Natural convection of air in a square cavity: A bench mark numerical solution”, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 3 (1983) 249-264.

Del Coz Díaz J., García P., Domínguez J., Suárez A., “Thermal design optimization of lightweight concrete blocks for internal one-way spanning slabs floors by FEM”, *Energy and Buildings*, 41 (2009) 1276-1287.

Del Coz Diaz J., Garcia P., Alvarez F., Alonso M., Domínguez J., Perez J., “The use of response surface methodology to improve the thermal transmittance of lightweight concrete hollow bricks by FEM”, *Construction and Building Materials*, 52 (2014) 331–344.

Ente Vasco de la Energía, “*Atlas de Radiación Solar*”, Ente Vasco de la Energía, (1999).

Guia U., Guia K.N., Shin C.T., “High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes Equations and a Multigrid Method” *Journal of Computational Physics*, 48 (1982) 387-411.

House J.M., Beckermann C., Smith T.F., “Effect of a centered conducting body on natural convection heat transfer in an enclosure”, *Numerical Heat Transfer*, 18 (1990) 213-225.

Kus H., Özkan E., Göcer Ö., Edis E., “Hot box measurements of pumice aggregate concrete hollow block walls”, *Construction and Buildings Materials*, 38 (2013) 837-845.

Li L., Wu Z., He Y., Lauriat G., Tao W., “Optimization of the configuration of 290 x 140 x 90 hollow clay bricks with 3-D numerical simulation by finite volume method”, *Energy and Buildings*, 40 (2008) 1790-1798.

Morales M.P., Juárez M.C., Muñoz P., Gómez J.A., “Study of the geometry of a voided clay brick using non-rectangular perforations to optimize its thermal properties”, *Energy and Buildings*, 43 (2011) 2494-2498.

Oluwole O., Joshua J., Nwagwo H., “Finite Element Modeling of Low Heat Conducting Building Bricks”, *Journal of Minerals and Materials Characterization of Engineering*, 11 (2012) 800-806

Patankar S. “*Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*”, Hemisphere Publishing Co., Mc. Graw Hill Co., New York, (1980).

Patankar S., Spalding D. “A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15 (1972) 1787-1806.

Sharma S.K., Agarwal V., Das A.K., Ghosh S., Das P.K., “Conduction in composite slabs: Reliability of 1-D and 2-D calculations”, *Energy and Buildings*, 65 (2013) 242-247.

Su L., Li N., Zhang X., Sun Y., Qian J., “Heat transfer and cooling characteristics of concrete ceiling radiant cooling panel”, *Applied Thermal Engineering*, 84 (2015) 170-179.

Tang D.L., Li L.P., Song C.F., Tao W.Q., He Y.L., “Numerical thermal analysis of applying insulation material to holes in hollow brick walls by the finite-volume method”, *Numerical Heat Transfer*, 68 (2015) 526- 547.

Vasile C., Lorente S., Perrin B., "Study of convective phenomena inside cavities coupled with heat and mass transfers through porous media – application to vertical hollow bricks – a first Approach", *Electric Power Systems Research*, 45 (1998) 163–171.

Versteeng H., Malalasekera W., "*An introduction to computational fluid dynamics, the finite volume method*", Longman Scientific & Technical, (1995).

Vijaykumar K., Srinivasan P., Dhandapani S., "A performance of hollow clay tile (HCT) laid reinforced cement concrete (RCC) roof for tropical summer climates", *Energy and Buildings*, 39 (2007) 886–892.

Vivancos J., Soto J., Perez I., Ros J., Martínez R., "A new model based on experimental results for the thermal characterization of bricks", *Building and Environmental*, 44 (2009) 1047-1052.

Zhang Y., Du K., He J., Yang L., Li Y., Li S., "Impact factors Analysis on the thermal performance of hollow block wall", *Energy and Buildings*, 75 (2014) 330–341.

Zhao F-Y., Liu D., Tang G-F., "Conjugate heat transfer in square enclosures", *Heat Mass Transfer*, 43 (2007) 907-922.

Zukowski M., Haese G., "Experimental and numerical investigation of a hollow brick filled with perlite insulation", *Energy and Buildings*, 42 (2010) 1402-1408.