



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Doctorado

Estudio teórico-experimental de una chimenea solar
con y sin materiales de cambio de fase

presentada por

MC. Carlos Enrique Torres Aguilar

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

Director de tesis

Dr. Jesús Arce Landa

Codirector de tesis

Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor

Cuernavaca, Morelos, México. Junio de 2023.



Cuernavaca, Mor.,
No. De Oficio:
Asunto:

01/junio/2023
SAC/083/2023
Autorización de
impresión de tesis

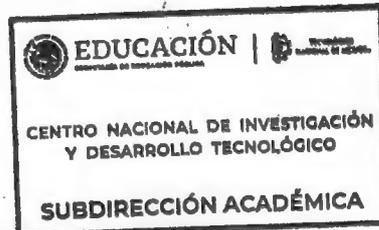
**CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR
CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
P R E S E N T E**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Estudio teórico-experimental de una chimenea solar con y sin materiales de cambio de fase”**; 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

*Excelencia en Educación Tecnológica®
“Conocimiento y tecnología al servicio de México”*



**CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

C. c. p. Departamento de Ingeniería Mecánica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



Cuernavaca, Mor., a 01 de junio de 2023

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

AT'n: DR. JORGE COLÍN OCAMPO
PRESIDENTE DEL CLAUSTRO DOCTORAL
DEL DEPARTAMENTO DE ING. MECÁNICA

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del estudiante **Carlos Enrique Torres Aguilar** manifiestan que después de haber revisado el documento de tesis titulado "**Estudio teórico-experimental de una chimenea solar con y sin materiales de cambio de fase**" realizado bajo la dirección de Dr. Jesús Arce Landa, el trabajo se **ACEPTA** para proceder a su impresión.

ATENTAMENTE



DRA. YVONNE CHÁVEZ CHENA
CENIDET



DR. EFRAÍN SIMÁ MOO
CENIDET



DR. MIGUEL ÁNGEL CHAGOLLA ARANDA
CENIDET



DRA. IVETT ZAVALA GUILLÉN
CICESE



DR. JESÚS ARCE LANDA
CENIDET



DR. EDGAR VICENTE MACÍAS MELO
UJAT

c.c.p: Lic. Silvia del Carmen Ortíz Fuentes Jefa del Departamento de Servicios Escolares
c.c.p: Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza Subdirector Académico
c.c.p: Expediente

Dedicatoria

A Dios, a mi madre Amanda y a la memoria del Dr.

Jesús Xamán

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico y seguro médico otorgado durante mis estudios de posgrado.

Al CENIDET/TecNM por permitirme realizar mis estudios de posgrado y por todo el apoyo de sus diferentes departamentos y áreas que permitieron la culminación satisfactoria de mi última etapa de preparación académica.

Al Dr. Jesús Arce y la Dr. Jesús Xamán por brindarme la oportunidad de trabajar bajo su dirección y por su guía durante todo este tiempo, así como la confianza brindada para el desarrollo de este trabajo.

Al comité revisor: Dra. Yvonne Chávez, Dr. Efraín Simá Moo, Dr. Miguel Angel Chagolla Aranda y Dra. Ivett Zavala Guillén por sus comentarios y acertadas sugerencias en la revisión de este trabajo.

A mis amigos y compañeros en el L-MOTCAM: Pedro Moreno, Miguel Che Pan, Samanta López, Ana Sánchez, Rogelio Vargas, Javier Uriarte, Carlos Miguel Jiménez, Martín, Tania Lima, Edgar Vázquez, Daniel García y Yessenia Olazo por su amistad y confianza.

A la Dra. Karla M. Aguilar, el Dr. Edgar V. Macias, el Dr. Pedro Moreno y el Dr. Xamán por su amistad, confianza y sus consejos brindados cuando más lo necesitaba.

A mis padres Amanda y Timar, y a toda mi familia, quienes siempre me han brindado su amor, cariño y apoyo incondicional.

A todos mis maestros por compartir sus conocimientos, experiencias y consejos que han contribuido en gran medida a mi formación académica.

Agradezco al Creador por mi existencia, las pruebas y las bendiciones que se han presentado en mi vida y son guía en mi camino.

ÍNDICE

Lista de Figuras	iv
Lista de Tablas	ix
Nomenclatura	xi
Resumen	xiii
Abstract	xiv
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. Ubicación del problema.....	1
1.2. Estado del arte.....	5
1.2.1. Conclusiones del estado del arte.....	30
1.3. Objetivo general.....	31
1.4. Objetivos específicos	32
1.5. Alcance	32
1.6. Estructura de la tesis	33
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	35
2.1. Analogía de teoría de circuitos eléctricos a la transferencia de calor	35
2.2. Materiales de cambio de fase (PCM).....	40
2.2.1. Método de C_P efectivo - modelo diferencial	46
CAPÍTULO 3 CHIMENEA SOLAR EXPERIMENTAL	53
3.1. Metodología general	53
3.2. Etapa 1: Diseño	55
3.2.1. Dimensiones y geometría general.....	55
3.3. Etapa 2: Construcción.....	56
3.3.1. Estructura o base.....	56
3.3.2. Elementos envolventes y placa absorbente	58
3.3.3. Instrumentación y sistema de adquisición de datos.....	62
3.4. Etapa 3: Evaluación	81
3.4.1. Pruebas de encendido y detección de anomalías	81
3.4.2. Análisis de propagación de error	81
3.4.3. Configuraciones evaluadas con prototipo experimental.....	85

CAPÍTULO 4 MODELO DE LA CHSO-OC Y CHSO-TC POR BALANCES DE ENERGÍA	87
4.1. Modelo físico y matemático de una ChSo-OC incorporando un material masivo	87
4.2. Modelo físico y matemático de una ChSo-TC incorporando un PCM.....	95
4.3. Metodología de solución.....	103
4.4. Implementación de la solución numérica	106
4.4.1. Parámetros generales para la implementación de los modelos matemáticos	106
CAPÍTULO 5 VALIDACIÓN DE MODELOS DE BALANCES GLOBALES	113
5.1. Familiarización y verificación de modelo de chimenea solar de Ong (2003)	113
5.2. Verificación de la transferencia de calor por conducción en materiales de cambio de fase	117
5.3. Validación de modelos de chimenea solar.....	120
CAPÍTULO 6 RESULTADOS ESTUDIO EXPERIMENTAL	129
6.1. Evaluación experimental.....	129
6.2. Constantes de tiempo y calor removido.....	130
6.3. Placa absorbente.....	136
6.4. Temperatura del aire al centro del canal (TACE)	139
6.5. Temperatura del aire al centro del canal a lo largo del eje y.....	142
6.6. Velocidad del aire a la entrada del canal	145
6.7. Flujo másico y flujo volumétrico.....	146
6.8. Humedad relativa y presión atmosférica.....	149
CAPÍTULO 7 RESULTADOS ESTUDIO TEÓRICO	153
7.1. Estudio paramétrico	153
7.2. Independencia temporal	156
7.3. Análisis de la condición inicial	160
7.4. Independencia de malla del elemento masivo.....	163
7.5. Resultados de estudio paramétrico.....	165
7.5.1. Hermosillo, Sonora.....	165
7.6. Resultados de análisis de emisión de contaminantes, consumo eléctrico y tiempo de recuperación de inversión	171
7.6.1. Hermosillo, Sonora.....	171
CONCLUSIONES	181
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	187

ANEXO A DATOS Y PROPIEDADES DE MATERIALES	209
ANEXO B DATOS CLIMÁTICOS DE CIUDADES EVALUADAS	211
ANEXO C RESULTADOS DE ESTUDIO PARAMÉTRICOS: OTRAS CIUDADES	217
C.1. Monterrey, Nuevo León	217
C.2. Ciudad de México	221
C.3. Toluca, Edo. de México	226
C.4. Villahermosa, Tabasco	230
C.5. Mérida, Yucatán	235
ANEXO D REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE	239
ANEXO E METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES, COSTO ELÉCTRICO Y TIEMPO DE RECUPERACIÓN..	257
ANEXO F RESULTADOS ESTIMACIÓN DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES, COSTO ELÉCTRICO Y TIEMPO DE RECUPERACIÓN: OTRAS CIUDADES ..	267
F.1. Monterrey, Nuevo León.....	267
F.2. Ciudad de México.....	274
F.3. Toluca, Edo. de México.....	282
F.4. Villahermosa, Tabasco	289
F.5. Mérida, Yucatán	296
ANEXO G CAPA LÍMITE.....	305
ANEXO H PRODUCTOS Y BENEFICIOS ESPERADOS.....	309

Lista de Figuras

1.1	Clasificación general del estado del arte.....	6
1.2	Clasificación de chimeneas solares.....	19
2.1	Circuito eléctrico.....	36
2.2	Analogía de circuito eléctrico.....	37
2.3	Analogía de las relaciones de flux de calor en teoría de circuitos eléctricos....	38
2.4	Análisis de corriente.....	39
2.5	Calor sensible.....	41
2.6	Calor latente.....	41
2.7	Diagrama de PCM.....	42
2.8	Clasificación de PCM.....	43
2.9	Curva de la entalpía mostrando histéresis de la temperatura.....	45
2.10	Diagrama de PCM para materiales reales.....	51
3.1	Metodología general.....	54
3.2	Esquema general de prototipos de chimenea solar: a) chimenea solar de doble canal anterior, b) nueva ChSo-OC.....	56
3.3	Extensiones de zancas.....	57
3.4	Estructura final.....	57
3.5	Dimensiones placas de poliestireno expandido y madera OSB: a) fotografía de construcción, b) dibujo asistido por computadora.....	58
3.6	Aislantes en los costados: a) corte de madera, b) poliestireno expandido.....	60
3.7	Montaje de placa absorbente.....	61
3.8	Armado de la chimenea solar con envolventes desarrolladas.....	61
3.9	Sensores empleados: a) extensión termopar tipo “T”, b) anemómetro de hilo caliente, c) BMP180, d) AMT1001.....	62
3.10	Esquema general de sensores implementados en el prototipo experimental....	64
3.11	Efecto Seebeck o termoeléctrico.....	66
3.12	Conexión y distribución de puntas para el transductor de flujo de calor.....	67
3.13	Arreglo de termopila en cubierta de vidrio y placas OSB.....	69
3.14	Arreglos de termopilas en placa absorbente.....	70
3.15	Distribución de la resistencia eléctrica en la placa absorbente.....	72
3.16	Distribución de elementos instrumentados.....	73
3.17	Configuración de instrumentación en canal de aire para diferentes espesores del canal.....	75
3.18	Ubicación de sensor de velocidad de aire.....	76
3.19	Vistas del armado de la chimenea con instrumentación: a) lateral derecho, b) superior, c) lateral izquierdo	77
3.20	Esquema general del prototipo experimental de ChSo-OC y conexión de dispositivos y sensores al sistema de adquisición de datos.....	79
3.21	Prototipo de ChSo-OC finalizado: a) sistema completo, b) sistema completo lateral derecho, b) sistema completo lateral izquierdo	80
3.22	Distribución normal.....	82
4.1	Modelo físico de ChSo-OC con PCM.....	87
4.2	Modelo físico de ChSo-TC con PCM.....	95
4.3	Diagrama de flujo de la solución numérica.....	103

5.1	Modelo físico de la ChSo-OC.....	113
5.2	Efecto de la altura de la chimenea solar: a) temperaturas en el sistema, b) flujo másico y eficiencia.....	114
5.3	Efecto de la radiación solar: a) Temperaturas en el sistema, b) flujo másico y eficiencia.....	116
5.4	Modelo físico para problema de verificación.....	118
5.5	Perfil de temperatura: a) modelo diferencial, b) modelo de balances de energía.....	119
5.6	Modelo físico de prototipo de ChSo-OC en estado permanente.....	120
5.7	Temperatura al interior de placa absorbente: a) 100Wm^{-2} , b) 300Wm^{-2} , c) 500Wm^{-2}	123
5.8	Temperatura al interior del canal de aire: a) 100Wm^{-2} , b) 300Wm^{-2} , c) 500Wm^{-2}	124
5.9	Flujo másico solución transitorio $d = 0.15$ m: a) 100Wm^{-2} , b) 300Wm^{-2} , c) 500Wm^{-2}	126
6.1	Constantes de tiempo a partir de mediciones de temperatura puntual: a) $d = 0.10$ m, b) $d = 0.15$ m, c) $d = 0.20$ m.....	130
6.2	Constantes de tiempo a partir de mediciones de temperatura promedio: a) $d = 0.10$ m, b) $d = 0.15$ m, c) $d = 0.20$ m.....	132
6.3	Flujo de calor removido por el aire del canal.....	136
6.4	Temperaturas al interior de placa absorbente (medición puntual).....	137
6.5	Temperaturas al interior de placa absorbente (medición promedio).....	138
6.6	Temperatura del aire al centro del canal (TACE): a) $d = 0.10$ m, b) $d = 0.15$ m, c) $d = 0.20$ m.....	140
6.7	Temperatura del aire a diferentes alturas al centro del canal: a) $d = 0.10$ m, b) $d = 0.15$ m, c) $d = 0.20$ m.....	142
6.8	Velocidad del fluido a la entrada del canal.....	145
6.9	Flujo volumétrico y másico.....	147
6.10	Humedad relativa.....	149
6.11	Presión atmosférica.....	150
7.1	Modelo físico chimenea solar y condiciones base de estudio paramétrico: a) un canal, b) dos canales.....	154
7.2	Climas de la República Mexicana.....	155
7.3	Flujo másico caso en ChSo-OC: a) Hermosillo, b) Mérida, c) Toluca.....	157
7.4	Flujo másico caso en ChSo-TC: a) Hermosillo, b) Mérida, c) Toluca.....	159
7.5	Comportamiento de extensión de tiempo (ChSo-OC): a) temperaturas, b) flujo másico.....	161
7.6	Variación de nodos en muro absorbente (PCM-RT42) en ChSo-OC: a) temperatura al centro del muro, b) flujo másico.....	163
7.7	Flujo volumétrico-Espesor del canal-Hermosillo: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Oeste-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC.....	167
7.8	Flujo volumétrico-material de pared absorbente-Hermosillo: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Oeste-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC.....	168
7.9	Equivalencia de kgCO_2 en chimenea solar variando espesor del canal	

	(Hermosillo): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	172
7.10	Equivalencia de kgCO ₂ en chimenea solar variando material de pared absorbente (Hermosillo): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	173
7.11	Consumo energético equivalente variando espesor del canal (Hermosillo): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	174
7.12	Consumo energético equivalente variando pared absorbente (Hermosillo): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	175
7.13	Años de recuperación de inversión (Hermosillo): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	178
B.1	Condiciones climáticas anuales de Hermosillo, Sonora: a) Radiación solar y temperatura ambiente, b) velocidad del viento, c) humedad relativa y presión atmosférica.....	211
B.2	Condiciones climáticas anuales de Monterrey, Nuevo León: a) Radiación solar y temperatura ambiente, b) velocidad del viento, c) humedad relativa y presión atmosférica.....	212
B.3	Condiciones climáticas anuales de Ciudad de México: a) Radiación solar y temperatura ambiente, b) velocidad del viento, c) humedad relativa y presión atmosférica.....	213
B.4	Condiciones climáticas anuales de Toluca, Edo. De México: a) Radiación solar y temperatura ambiente, b) velocidad del viento, c) humedad relativa y presión atmosférica.....	214
B.5	Condiciones climáticas anuales de Villahermosa, Tabasco: a) Radiación solar y temperatura ambiente, b) velocidad del viento, c) humedad relativa y presión atmosférica.....	215
B.6	Condiciones climáticas anuales de Mérida, Yucatán: a) Radiación solar y temperatura ambiente, b) velocidad del viento, c) humedad relativa y presión atmosférica.....	216
C.1	Flujo volumétrico-Espesor del canal-Monterrey: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Oeste-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC.....	218
C.2	Flujo volumétrico-material de pared absorbente-Monterrey: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Sur-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC.....	220
C.3	Flujo volumétrico-Espesor del canal-Ciudad de México: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Oeste-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC.....	222
C.4	Flujo volumétrico-material de pared absorbente-Ciudad de México: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Sur-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC.....	224
C.5	Flujo volumétrico-Espesor del canal-Toluca: a) orientación Oeste-día cálido	227

	ChSo-OC; b) orientación Oeste-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC.....	
C.6	Flujo volumétrico-material de pared absorbente-Toluca: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Sur-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC.....	229
C.7	Flujo volumétrico-Espesor del canal-Villahermosa: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Oeste-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC.....	231
C.8	Flujo volumétrico-material de pared absorbente-Villahermosa: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Sur-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC.....	233
C.9	Flujo volumétrico-Espesor del canal-Mérida: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Oeste-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC.....	235
C.10	Flujo volumétrico-material de pared absorbente-Mérida: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Sur-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC.....	237
D.1	Diferencia entre modelo de regresión lineal con la medición.....	241
D.2	Diagrama general.....	243
E.1	Integración de la potencia del ventilador equivalente en el día de modelación...	258
E.2	Tarifas de CFE para uso doméstico en consumo excedente.....	260
F.1	Equivalencia de kgCO ₂ en chimenea solar variando espesor del canal (Monterrey): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	267
F.2	Equivalencia de kgCO ₂ en chimenea solar variando material de pared absorbente (Monterrey): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	268
F.3	Consumo energético equivalente variando espesor del canal (Monterrey): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	270
F.4	Consumo energético equivalente variando pared absorbente (Hermosillo): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	271
F.5	Años de recuperación de inversión (Monterrey): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	273
F.6	Equivalencia de kgCO ₂ en chimenea solar variando espesor del canal (CDMX): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	275
F.7	Equivalencia de kgCO ₂ en chimenea solar variando material de pared absorbente (CDMX): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	276
F.8	Consumo energético equivalente variando espesor del canal (CDMX): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	277
F.9	Consumo energético equivalente variando pared absorbente (CDMX): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	278
F.10	Años de recuperación de inversión (CDMX): a) ChSo-OC orientación Oeste	280

	b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	
F.11	Equivalencia de kgCO ₂ en chimenea solar variando espesor del canal (Toluca): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	282
F.12	Equivalencia de kgCO ₂ en chimenea solar variando material de pared absorbente (Toluca): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	283
F.13	Consumo energético equivalente variando espesor del canal (Toluca): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	284
F.14	Consumo energético equivalente variando pared absorbente (Toluca): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	285
F.15	Años de recuperación de inversión (Toluca): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	288
F.16	Equivalencia de kgCO ₂ en chimenea solar variando espesor del canal (Villahermosa): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	289
F.17	Equivalencia de kgCO ₂ en chimenea solar variando material de pared absorbente (Villahermosa): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	290
F.18	Consumo energético equivalente variando espesor del canal (Villahermosa): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	292
F.19	Consumo energético equivalente variando pared absorbente (Villahermosa): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	293
F.20	Años de recuperación de inversión (Villahermosa): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	295
F.21	Equivalencia de kgCO ₂ en chimenea solar variando espesor del canal (Mérida): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	297
F.22	Equivalencia de kgCO ₂ en chimenea solar variando material de pared absorbente (Mérida): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	298
F.23	Consumo energético equivalente variando espesor del canal (Mérida): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	299
F.24	Consumo energético equivalente variando pared absorbente (Mérida): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	300
F.25	Años de recuperación de inversión (Mérida): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste.....	302
G.1	Temperatura de aire del canal: a) d=0.10m 100Wm ⁻² , b) d=0.10m 200Wm ⁻² , c) d=0.10m 300Wm ⁻² , d) d=0.10m 400Wm ⁻² , e) d=0.10m 500Wm ⁻² , f) d=0.15m 100Wm ⁻² , g) d=0.15m 200Wm ⁻² , h) d=0.15m 300Wm ⁻² , i) d=0.15m 400Wm ⁻² , j) d=0.15m 500Wm ⁻² , k) d=0.20m 100Wm ⁻² , l) d=0.20m 200Wm ⁻² , m) d=0.20m 300Wm ⁻² , n) d=0.20m 400Wm ⁻² , o) d=0.20m 500Wm ⁻²	305

Lista de Tablas

1.1	Línea del tiempo de trabajos teóricos.....	7
1.2	Línea del tiempo de trabajos experimentales.....	13
1.3	Línea del tiempo de estudios de canales verticales.....	25
2.1	Propiedades del sistema para cada fase.....	52
4.1	Parámetros para el estudio de la ChSo-OC en estado transitorio.....	106
5.1	Comparación de los estudios de chimenea solar de un canal a una radiación constante.....	115
5.2	Comparación de los estudios de chimenea solar de un canal a radiación solar variable.....	117
5.3	Propiedades del PCM.....	118
5.4	Propiedades del sistema.....	121
6.1	Constantes de tiempo de placa absorbente.....	135
6.2	Flujos máxicos y volumétricos.....	148
6.3	Humedad relativa y presión atmosférica.....	151
7.1	Parámetros de estudio.....	155
7.2	Diferencias porcentuales entre los días de modelación en la ChSo-OC.....	162
7.3	Casos evaluados de acuerdo con ANSI/ASHRAE 62.2-2019.....	165
7.4	Costo anual del consumo energético equivalente para las configuraciones de chimenea solar (Hermosillo).....	177
A.1	Propiedades del sistema.....	209
A.2	Propiedades de los PCM.....	210
D.1	Parámetros empleados para regresión lineal múltiple.....	242
D.2	Funciones para flujo volumétrico en ChSo-OC (Hermosillo, Sonora): Orientación Oeste.....	244
D.3	Funciones para flujo volumétrico en ChSo-OC (Monterrey, Nuevo León): Orientación Oeste.....	245
D.4	Funciones para flujo volumétrico en ChSo-OC (CDMX): Orientación Oeste...	246
D.5	Funciones para flujo volumétrico en ChSo-OC (Toluca, Edo de México): Orientación Oeste.....	247
D.6	Funciones para flujo volumétrico en ChSo-OC (Villahermosa, Tabasco): Orientación Oeste.....	248
D.7	Funciones para flujo volumétrico en ChSo-OC (Mérida, Yucatán): Orientación Oeste.....	249
D.8	Funciones para flujo volumétrico en ChSo-TC (Hermosillo, Sonora): Orientación Este-Oeste.....	250
D.9	Funciones para flujo volumétrico en ChSo-TC (Monterrey, Nuevo León): Orientación Este-Oeste.....	251
D.10	Funciones para flujo volumétrico en ChSo-TC (CDMX): Orientación Este-Oeste.....	252
D.11	Funciones para flujo volumétrico en ChSo-TC (Toluca, Edo de México): Orientación Este-Oeste.....	253
D.12	Funciones para flujo volumétrico en ChSo-TC (Villahermosa, Tabasco):	254

	Orientación Este-Oeste.....	
D.13	Funciones para flujo volumétrico en ChSo-TC (Mérida, Yucatán): Orientación Este-Oeste.....	255
E.1	Costo de materiales empleado para construcción de la ChSo-OC y ChSo-TC...	261
E.2	Gasto total de construcción de ChSo-OC y ChSo-TC.....	262
F.1	Costo anual del consumo energético equivalente para las configuraciones de chimenea solar (Monterrey).....	272
F.2	Costo anual del consumo energético equivalente para las configuraciones de chimenea solar (CDMX).....	279
F.3	Costo anual del consumo energético equivalente para las configuraciones de chimenea solar (Toluca).....	287
F.4	Costo anual del consumo energético equivalente para las configuraciones de chimenea solar (Villahermosa).....	294
F.5	Costo anual del consumo energético equivalente para las configuraciones de chimenea solar (Mérida).....	301

NOMENCLATURA

A	Área [m ²]
ACH	Cambios de aire por hora [h ⁻¹]
$C_P, C_{P-efect}$	Calor específico, calor específico efectivo [J (kgK) ⁻¹]
d	Espesor [m]
f	Fracción líquida [-]
G_{solar}	Radiación solar [W m ⁻²]
$h_{conv-ext}$	Coefficiente convectivo exterior [W m ⁻² K ⁻¹]
$h_{conv-int}$	Coefficiente convectivo interior [W m ⁻² K ⁻¹]
h_{ls}	Entalpía de cambio de fase [J kg ⁻¹]
H_x	Distancia sobre eje x [m]
H_y	Distancia sobre eje y [m]
H_z	Distancia sobre eje z [m]
$kgCO_2$	Kilogramos de CO ₂ emitidos [kg]
\dot{m}	Flujo másico [kg s ⁻¹]
N_x, N_y	Número de nodos [-]
q	Flux de calor [W m ⁻²]
T	Temperatura [°C]
$TACE$	Temperatura Aire Centro [°C]
$TAEN$	Temperatura Aire Entrada [°C]
$TAIN$	Temperatura Aire Inferior [°C]
$TASA$	Temperatura Aire Salida [°C]
$TASU$	Temperatura Aire Superior [°C]
t	Tiempo [s]
\dot{V}	Flujo volumétrico [m ³ h ⁻¹]
x	Eje x [m]; variable [-]
y	Eje y [m]
z	Eje z [m]

Griegas

α^*	Absortancia [-]
α	Coefficiente de relajación [-]
β	Coefficiente de función [-]
γ	Factor de promedio [-]
Δ	Diferencia [-]
δ	Criterio de convergencia [-]
ε	Emisividad [-]
λ	Conductividad térmica [W (mK) ⁻¹]
η	Eficiencia [-]
ρ	Densidad [kg m ⁻³]
τ^*	Transmitancia [-]
ϖ	Potencia del ventilador equivalente [kW]
Ω	Consumo eléctrico equivalente [kWh]

Subíndices y superíndices

<i>conv</i>	Convectivo
<i>cond</i>	Conductivo
<i>ext</i>	Exterior
<i>f</i>	Fluido
<i>fan</i>	Ventilador
<i>i,j</i>	Nodo en x y y
<i>in</i>	Interior
<i>Int</i>	Entrada
<i>liq</i>	Líquido
<i>m</i>	Iteración
<i>N_x</i>	Número de nodos
<i>P,E,W,N</i>	Ubicación de nodos central, este, oeste, norte y sur
<i>S</i>	
<i>Out</i>	Salida
<i>rad</i>	Radiativo
<i>Sol</i>	Sólido
<i>sky</i>	Cielo
<i>s</i>	Estático
<i>wind</i>	Viento

RESUMEN

En el área de la eficiencia energética en edificaciones ha crecido el uso de los sistemas pasivos como una forma de sustitución de los sistemas activos de ventilación y refrigeración, los cuales se caracterizan por ser altos consumidores de energía. En este estudio se presenta el análisis de un prototipo de chimenea solar experimental ($1.76 \times 0.465 \times 0.20$ m) y el estudio de modelos de chimenea solar propuestos en balance de energía, con el fin de realizar un estudio paramétrico con y sin materiales masivos como los materiales de cambio de fase, bajo las condiciones de la República Mexicana. La validación de los modelos teóricos con la información de la evaluación experimental permitió reducir el RMSD (Root-Mean-Square Deviation) entre 11.79 y 5.04%. Los resultados del estudio paramétrico revelaron que el desempeño de la chimenea solar de dos canales fue superior al de la chimenea solar de un canal al incrementar en más del 70% el flujo de aire para ventilación, incluso duplicarlo. El uso de chimeneas solares con mayores alturas y espesores del canal provocó que se obtuvieran los flujos de aire más altos en todas las configuraciones evaluadas. Todas las evaluaciones permitieron cubrir la demanda de ventilación para edificaciones residenciales de 9m^2 de área ($30.06\text{ m}^3\text{h}^{-1}$) mientras que las mejores configuraciones fueron capaces de proveer suficiente ventilación para un espacio de 108m^2 ($222.12\text{ m}^3\text{h}^{-1}$). En cuanto al desempeño de los materiales masivos se evaluaron los materiales: concreto, ladrillo, RT25HC, RT28HC, RT35HC, RT42, MG49 y la parafina 46-50; se obtuvo que la chimenea solar de un canal presentó mejores resultados con ladrillo y concreto mientras que en la chimenea solar de dos canales los PCM (Phase Change Material) fueron aquellos con mejor desempeño. Entre los PCM mejor evaluados se encuentran el RT25H, RT35HC y el MG-49. El análisis de emisión de contaminantes mostró que la chimenea solar de un canal y la chimenea solar de dos canales permitieron reducir la emisión de contaminantes al medio ambiente hasta en 131.73 y 241 kgCO_{2e} , respectivamente. Finalmente, la implementación de una chimenea solar en edificaciones con fines de ventilación bajo las condiciones de la República Mexicana resulta ser una opción viable para reducir el uso de sistemas activos y aprovechar el potencial energético de fuentes renovables de energía.

ABSTRACT

In the building energy efficiency area, passive systems have been raised to substitute the use of cooling and ventilation active systems since they consume high energy amounts. In this study, the analysis of experimental solar chimney prototype (1.76×0.465×0.20 m) and theoretical solar chimney models are presented to perform a parametric study with and without massive materials like phase change materials under the República Mexicana weather conditions. The validation of theoretical models with the experimental data permitted the reduction of RMSD (Root-Mean-Square Deviation) values between 11.79 and 5.04%. The parametric study results revealed that the dual-channel solar chimney performance was superior to the one-channel solar chimney since the airflow was increased by up to 70% and even duplicated the ventilation. The highest airflows were generated using solar chimney configurations with the highest height and air gaps studied. All configurations satisfied the ventilation demand for an area of 9 m² (30.06 m³h⁻¹), while the best configurations achieved the ventilation demand for an area of 108 m² ((222.12 m³h⁻¹). The evaluated massive materials were concrete, brick, RT25HC, RT28HC, RT35HC, RT42, MG49 and 46-50 paraffin; results showed that the one-channel solar chimney achieved the highest performance with brick and concrete. In contrast, the performance of dual-channel solar chimneys with phase change materials was higher than the same solar chimney with masonry materials. The best phase change materials for the solar chimneys evaluated were RT25 HC, RT35 HC, and MG-49. Furthermore, the pollutant emission analysis revealed that both solar chimney designs permitted emissions reduction to 131.73 and 241 kgCO_{2e}. Finally, implementing solar chimneys in buildings for ventilation under República Mexicana weather conditions is a feasible option to reduce the use of active systems and exploit renewable energy sources.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta la problemática actual sobre la necesidad de ventilación en edificaciones y las alternativas de solución a través del aprovechamiento de energías renovables. Se expone una breve descripción y discusión de los trabajos publicados en la literatura sobre chimenea solares y canales verticales que han atendido la necesidad de proveer ventilación natural. Finalmente, se presenta el objetivo y alcance de la presente tesis de doctorado.

1.1. Ubicación del problema

En los últimos años, los avances tecnológicos han mejorado la calidad de vida de los seres humanos en los aspectos de salud, alimentación y vivienda. Sin embargo, el crecimiento acelerado de la población ha provocado cambios drásticos en el sector de la construcción con el de satisfacer las demandas de vivienda a tal grado de acoger a los más de 7 mil millones de habitantes en el planeta. Entre los principales cambios se encuentra la construcción de complejos habitacionales, edificios departamentales y de oficinas que se caracterizan por sus espacios reducidos, donde se ofrecen los servicios básicos. En la mayoría de los casos estos espacios carecen de las características y aspectos esenciales para el bienestar humano tal como la ventilación. La ventilación es necesaria para el bienestar de los ocupantes ya que permite la remoción de contaminantes y facilita alcanzar un estado de confort térmico al introducir o extraer energía térmica. Por ello, gran parte de la población recurre al uso de sistemas activos como aires acondicionados y ventiladores mecánicos. Sin embargo, la adquisición e implementación de estos sistemas activos, entre otros factores, han generado un creciente incremento en el consumo energético a nivel mundial, ya que solo para el sector residencial y de construcción se ha cuantificado el 36% del consumo energético para el año 2018 (**International Energy Agency, 2019**). Mientras que en México el porcentaje de consumo energético para el sector residencial, comercial y público es de 17.2% (**Coldwell, 2017**), la tendencia de incremento es considerable sobre todo en los últimos años lo cual representa un consumo desmedido de los recursos naturales para suplir la demanda.

Ante tal situación, en los últimos años se han buscado alternativas para atender la necesidad de ventilación en las edificaciones como el uso de sistemas pasivos. Los sistemas pasivos para la ventilación se basan en la implementación de la ventilación natural la cual puede clasificarse en tres categorías: ventilación simple, ventilación cruzada y ventilación por tiro inducido (**Awbi, 2003**). La ventilación por tiro inducido consiste en el movimiento y desplazamiento del fluido debido al efecto de las fuerzas de flotación, esto a consecuencia de los cambios de densidad del aire, originado por los incrementos de temperatura. Algunos ejemplos de sistemas pasivos que actúan bajo este efecto son: torres de viento, muros Trombe, fachadas dobles y chimeneas solares. Las chimeneas solares son sistemas conformados por una cubierta de vidrio y una pared absorbente, los cuales forman un canal de aire, que, al colocarse en dirección al sol, la energía recibida sobre la cubierta semitransparente es transmitida a la placa absorbente, y finalmente transferida al fluido del canal que se encuentra en contacto directo. La diferencia de temperaturas en el fluido a lo largo del canal genera un cambio de densidad del aire al presentar una mayor energía cinética en el fluido, ocasionando un desplazamiento hacia el exterior de la chimenea, a su vez este desplazamiento genera un efecto de succión el cual es aprovechado para extraer el aire de una habitación mejorando la calidad del aire y el confort térmico al interior.

La correcta implementación de una chimenea solar con fines de ventilación en edificaciones requiere de un análisis de los mecanismos de transferencia de calor que interactúan en el sistema (conducción, convección y radiación). El análisis de los procesos físicos que ocurren en una chimenea solar permite optimizar los parámetros para amplificar el flujo másico deseado y, por lo tanto, aumentar el efecto de la ventilación natural en una edificación (**Barra y Carratelli, 1979; Abdeen et al. 2019**). Algunos de los parámetros estudiados son la relación entre el espesor del canal y la altura de la chimenea, área de entrada y salida del canal, así como las condiciones climáticas del medio donde se desea implementar. Aunque las necesidades de ventilación logren coincidir para diferentes aplicaciones, el clima y las características de la edificación donde se desea implementar convierten el problema en un caso único. Es aquí donde la necesidad de adaptarse al problema induce la búsqueda de proponer diferentes diseños de chimeneas solares, así como alternativas de solución. La mayoría de las propuestas aún mantienen como base el uso de chimeneas solares de un solo canal, tal como algunos de los trabajos pioneros en el

estudio de chimeneas solares como el trabajo de **Bansal et al. (1993, 1994)** y **Hirunlabh et al. (1999)**. Sin embargo, algunos diseños se han enfocado en mejorar la eficiencia del sistema como el trabajo de **Arce et al. (2008)** de una chimenea solar de doble canal con el propósito de aumentar el flujo másico por medio de un mejor aprovechamiento de la energía captada por el sistema. Sin embargo, las aplicaciones y análisis en diferentes climas cálidos y húmedos son obstáculos por vencer debido a que los horarios en los que se requiere ventilación se extienden hasta horarios nocturnos, mientras que en su mayoría el funcionamiento de las chimeneas solares se limita únicamente a horarios con presencia de radiación solar (**Su y Li, 2012**).

Con el objetivo de proponer un diseño de chimenea solar con la capacidad de almacenar la cantidad de energía térmica suficiente, se reportaron propuestas de materiales masivos en donde la pared absorbente se compone de materiales como concreto, ladrillo, entre otros (**Martí-Herrero et al., 2007**), materiales que aumentan la inercia térmica y aumentan el tiempo de operación de las chimeneas solares. Sin embargo, estos materiales presentan un inconveniente el cual es el volumen o espacio requerido para su implementación, ya que, si este sistema se desea agregar a una edificación existente, la falta de espacio, así como problemas estructurales y de resistencia hacen que esta opción no sea tan viable en cualquier situación. Una alternativa ante el uso de materiales masivos como concreto y ladrillo son los materiales de cambio de fase (PCM) los cuales presentan características adecuadas para almacenar una gran cantidad de energía térmica ya sea en forma de calor sensible, y principalmente, en forma de calor latente, aumentando la inercia térmica del sistema para prolongar el tiempo de operación y así inducir la ventilación necesaria en horarios nocturnos (**Kaneko et al. 2006**).

Ante los beneficios reportados de implementar PCM en chimeneas solares de un solo canal, como prolongación de tiempo de operación y estabilidad en la temperatura promedio del aire (**Frutos-Dordelly et al., 2019**), surge una desventaja que consiste en que el sistema debe de captar la energía suficiente para fundir el PCM en su totalidad aprovechando al máximo la capacidad de almacenar energía en forma de calor latente y así transferirla al fluido del canal en horarios sin radiación solar (**Li y Liu, 2014a; Li y Liu, 2014b**). La necesidad de encontrar una configuración óptima entre los diferentes parámetros de las

chimeneas solares al utilizar o no PCM, ha provocado el uso de diferentes metodologías tanto teóricas como experimentales. Sin embargo, la cantidad de trabajos enfocados al análisis energético, confort térmico y calidad del aire en edificaciones de forma teórica sobre pasa poco más del 70% de los estudios actuales (**Yu et al. 2020**). Entre las razones de las preferencias de estudios teóricos se encuentra la versatilidad de analizar una gran cantidad de parámetros y configuraciones sin la necesidad de llevar a cabo la construcción de algún prototipo donde además del tiempo requerido, se necesita una considerable cantidad de recursos para analizar un número limitado de casos. Sin embargo, los modelos teóricos desarrollados requieren de una validación con datos experimentales que permita establecer que el modelo teórico desarrollado modele el fenómeno con cierto nivel de precisión.

Entre los estudios teóricos de chimeneas solares desarrollados se encuentran aquellos que emplean métodos de *Dinámica de Fluidos Computacional* (CFD por sus siglas en inglés) y aquellos desde el punto de vista termodinámico empleando *Balances de Energía* (BE). Un ejemplo de estudios de chimenea solar empleando CFD es el trabajo de **Zavala-Guillén et al. (2018)** en donde presentaron el estudio teórico de una chimenea solar de doble canal para determinar la configuración óptima que maximiza el flujo másico bajo las condiciones climáticas de tres ciudades de la República Mexicana.

En cuanto a trabajos de chimeneas solares con PCM usando BE se encuentra **Li et al. y Lu et al. (2017)** en donde se analizaron diferentes condiciones climáticas reales y casos ideales para conocer el desempeño térmico de las chimeneas solares. Los métodos basados en BE presentan un menor grado de exactitud con respecto a los métodos de CFD, sin embargo, son más versátiles al momento de implementarse en cualquier sistema, además que demandan menos recursos de cómputo para realizar un estudio tan amplio como una evaluación anual del sistema empleando datos climatológicos reales, así como su adaptación al estudio de PCM. Aunque a pesar de la facilidad de implementación, estos modelos matemáticos deben someterse a un ejercicio de validación con datos experimentales reportados en la literatura o a partir de un experimento propio con el propósito de establecer que el modelo matemático propuesto es adecuado para la modelación del fenómeno físico.

Es por ello, que se pretende realizar la construcción e instrumentación de un prototipo de chimenea solar, con el propósito de validar modelos matemáticos de chimeneas solares a partir de BE y de esta manera, realizar un estudio paramétrico de una chimenea solar de uno y dos canales, variando los materiales de la placa absorbente (metal, muro masivo y PCM) bajo condiciones climáticas de la República Mexicana. A continuación, se presenta un análisis de la revisión del estado del arte.

1.2. Estado del arte

El estudio de las chimeneas solares se ha extendido a diversas líneas de investigación, además de energía en edificaciones, sus aplicaciones también se han dirigido a la generación de energía por medio de la transformación del movimiento del fluido o trabajo mecánico en electricidad. Por lo tanto, limitando los trabajos a aplicaciones en ahorro de energía en edificaciones, se han revisado a la fecha 94 trabajos que comprenden diferentes técnicas y metodologías para la realización de estudios paramétricos y de optimización, así como la propuesta de nuevos diseños de chimeneas solares. Poco más del 56% de los trabajos son teóricos (53 trabajos) mientras que al menos el 43% son experimentales (41 trabajos). Esto sin contar los 17 trabajos revisados sobre el estudio de canales verticales de forma experimental como base para la validación de modelos teóricos.

La variedad de los trabajos y sus diferentes enfoques sobre las chimeneas solares ha permitido realizar una clasificación general jerárquica que se presenta a continuación:

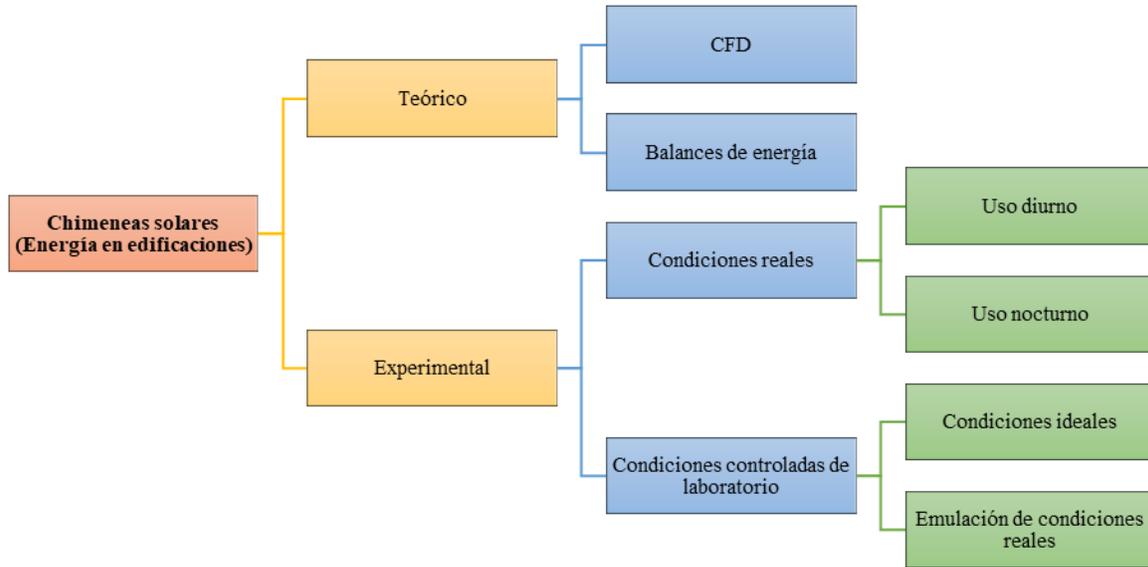
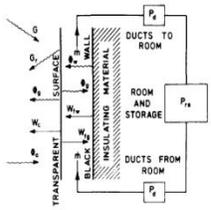
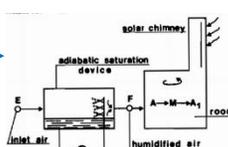
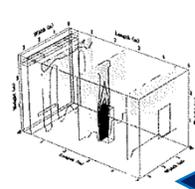
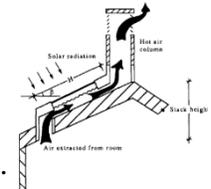
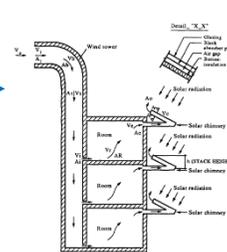
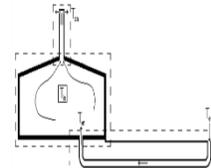
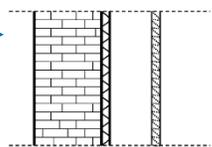
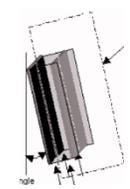


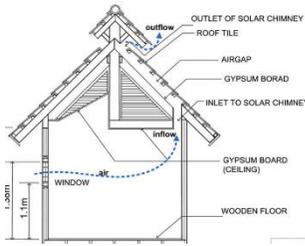
Figura 1.1. Clasificación general del estado del arte

Aunque no se presenta dentro de la clasificación general mostrada en la Fig. 1.1, en la literatura revisada se encuentran trabajos teóricos-experimentales de chimeneas solares, sin embargo, el trabajo realizado comúnmente se encuentra orientado principalmente a un rubro en particular y debido a la baja cantidad de trabajos experimentales desarrollados, estos trabajos fueron orientados en preferencia a la clasificación de trabajos experimentales.

Con el fin de observar cómo ha sido la ruta del desarrollo del conocimiento sobre las chimeneas solares de acuerdo con la clasificación general de la Fig. 1.1, a continuación, se muestra una línea del tiempo general con los trabajos revisados a la fecha. Además, como parte del objetivo de la tesis doctoral, se remarcan con * y en color rojo aquellos trabajos que involucran la implementación de PCM en las chimeneas solares, mientras que los trabajos encerrados en un recuadro rojo son para indicar aquellos estudios que se han realizado en el TecNM/CENIDET y que son enfocados en su mayoría con chimeneas solares de dos canales.

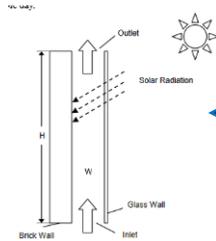
Tabla 1.1. Línea del tiempo de trabajos teóricos

CFD	Año	Modelos de balance de energía
	1979	<p>Barra y Carratelli Chimenea solar vertical-tipo fachada.</p> 
	1985	<p>Barbera et al. Chimenea solar vertical en edificación con sistema de humidificación.</p> 
<p>Awbi y Gan Chimenea solar y muro Trombe acoplados a habitación.</p> 	1992	
	1993	<p>Bansal et al. Chimenea solar de un solo canal con habitación.</p> 
	1994	<p>Bansal et al. Chimenea solar y torre le viento en edificación de tres plantas.</p> 
	2001	<p>Correira da Silva et al. Chimenea solar acoplado a una habitación tipo granja.</p> 
	2002	<p>Balocco Chimenea solar tipo fachada bajo condiciones de Florencia, Italia.</p>  <p>Halldorsson et al. Chimenea solar inclinada bajo condiciones ideales.</p> 



Chungloo y Limmeechokchai
Chimenea solar tipo techo con aspersores de agua.

Su y Li
Chimenea solar vertical bajo condiciones de Texas (EUA).

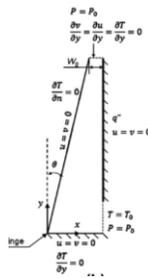


***Amori y Mohammed**
Chimenea solar inclinada y vertical bajo condiciones de Iraq.

Khanal y Lei
Chimenea solar con vidrio inclinado para uso diurno.

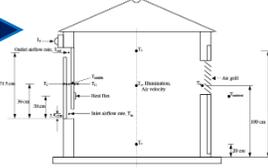
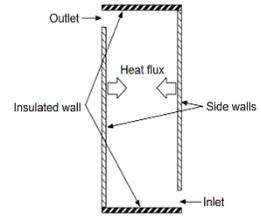


Cirilo et al.
Chimenea solar con vidrio inclinado.



2006

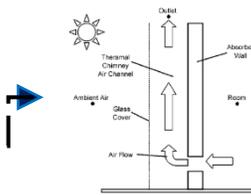
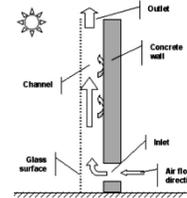
Miyazaki et al.
Chimenea solar tipo fachada acoplada a una edificación.



Chantawong et al.
Chimenea solar de paredes vidriadas en clima cálido húmedo.

2007

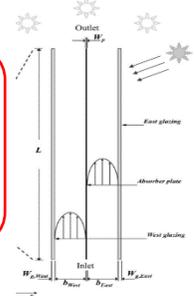
Martí-Herrero et al.
Chimenea solar tipo fachada con muro masivo en clima del mediterráneo.



Lee y Strand
Chimenea solar de un solo canal en tres diferentes ciudades.

2009

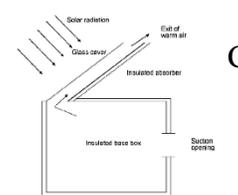
Tlatelpa-Becerra
Chimenea solar de doble canal de uso diurno sin habitación.



2011

2012

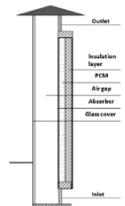
2013



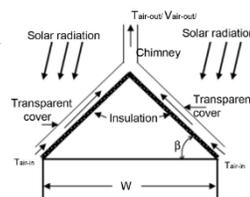
Jianliu y Weihua
Chimenea solar tipo techo con habitación bajo condiciones de Nanjing (China).

2014

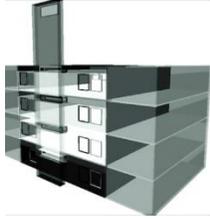
***Li y Liu**
Chimenea solar vertical de un solo canal acoplado a una habitación de uso diurno.



2015

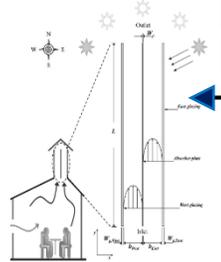


Al-Kayiem et al.
Chimenea solar tipo techo con doble área de captación.

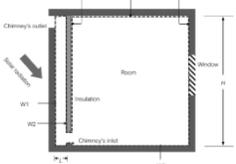


Kalkan y Dagtekin
Chimenea solar tipo fachada acoplada a habitación.

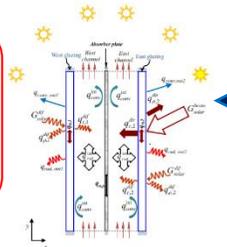
Zavala Guillén et al.
Chimenea solar doble canal sin habitación para uso diurno, evaluando tres ciudades de México.



Sudprasert y Luukkanen
Chimenea solar tipo fachada acoplada a una habitación considerando el efecto de la humedad.

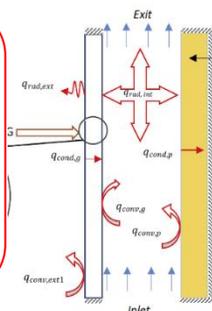


Zavala Guillén et al.
Chimenea solar de doble canal bajo condiciones ideales



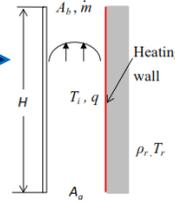
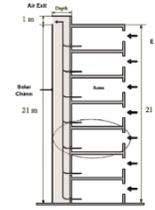
Khosravi et al.
Chimenea solar vertical tipo fachada acoplada a una edificación de tres plantas.

***Xamán et al.**
Chimenea solar de un solo canal vertical bajo condiciones de Madrid (España).



2016

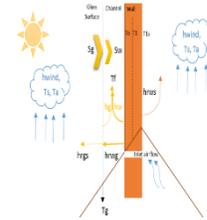
Asadi et al.
Chimenea solar vertical en edificación de siete niveles en siete ubicaciones.



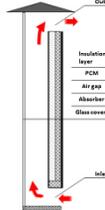
He et al.
Chimenea solar vertical analizado con modelo de pluma.

2017

Godoy-Vaca et al.
Chimenea solar vertical de un solo canal con muro masivo, en un clima cálido húmedo.

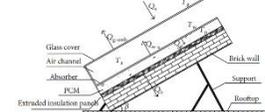
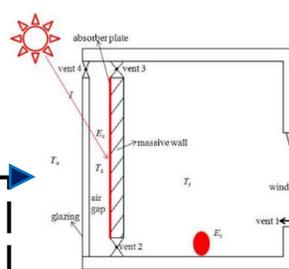


***Li et al.**
Chimenea solar vertical de un solo canal bajo condiciones ideales.



2018

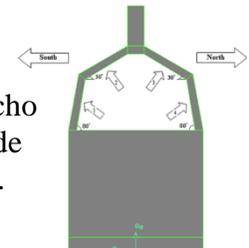
***Lu et al.**
Chimenea solar de un solo canal de uso diurno y nocturno, bajo condiciones de Chongqing (China).



2019

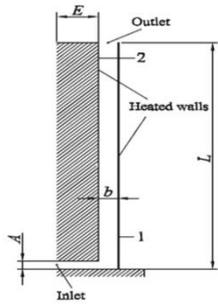
Duan
Chimenea solar tipo fachada acoplada a una habitación.

Rabani
Chimenea solar tipo techo acoplado a un sistema de dispersión de humedad.



Abraham y Ming

Chimenea solar tipo fachada acoplada a un edificio de ocho niveles.

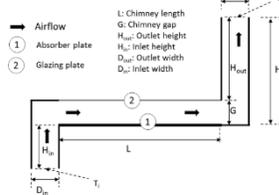


Dash y Mohanty
Chimenea solar tipo fachada bajo condiciones ideales.

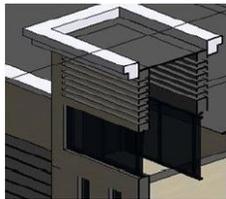


Nguyen y Wells

Chimenea solar tipo techo horizontal con entrada y salida verticales.

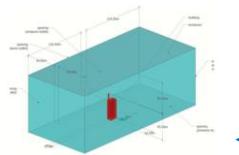


Abdulhamid y Tukur
Chimenea solar tipo fachada aplicado a un hospital en condiciones de clima cálido.

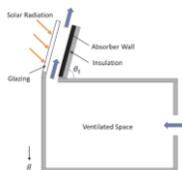


Bachrum et al.

Chimenea solar tipo fachada aplicado a un edificio de ocho niveles en clima cálido húmedo.



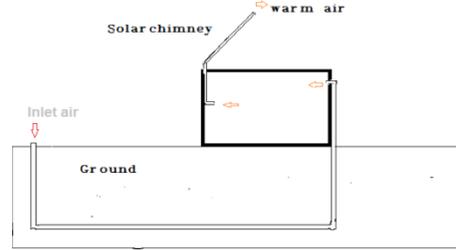
Kong et al.
Chimenea solar inclinada en condiciones de clima cálido.



2019

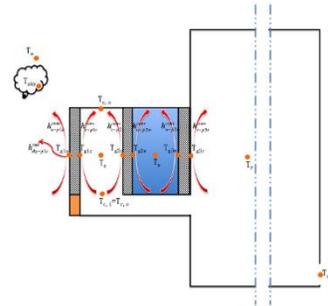
Mohammed et al.

Chimenea solar y un intercambiador de calor tierra-aire acoplados a una habitación.



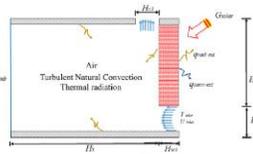
Wang y Lei

Chimenea solar vertical tipo fachada con sistema de muro de agua bajo condiciones climáticas de invierno de Sídney (Australia).



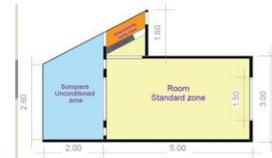
Jiménez-Xamán et al.

Chimenea solar tipo vertical por balance de energía, y cavidad analizada mediante CFD.



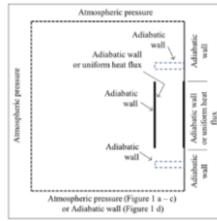
Taghdisi et al.

Chimenea solar y tipo techo para mejorar condiciones térmicas de verano e invierno en clima templado.

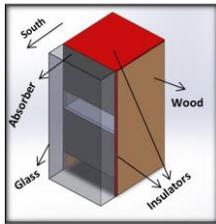


2020

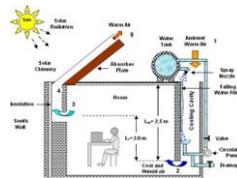
Nguyen y Wells
 Chimenea solar tipo fachada vertical bajo condiciones ideales. Evaluada para variar el efecto de paredes adyacentes.



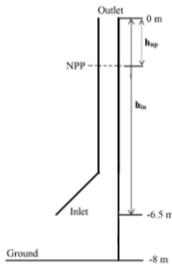
Shi et al.
 Chimenea solar aplicado en edificación con propósito de seguridad contra incendios.



Mohammed et al.
 Chimenea solar tipo fachada de diferentes configuraciones de entrada de aire para un edificio de seis niveles en clima cálido.



Samsudin et al.
 Chimenea solar inclinada en techo acoplada a una cavidad y a la entrada con un aspersor de agua en clima tropical.



Babin et al.
 Chimenea solar tipo fachada vertical, bajo condiciones ideales de clima templado y frío para estudiar el flujo invertido.

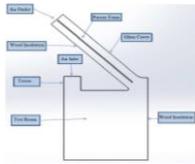
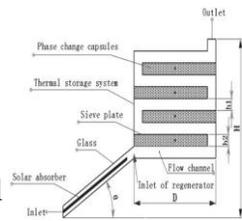
2020

Serageldin et al.
 Chimenea solar y tipo acoplada a cavidad con intercambiador tierra aire en clima seco.



*** Chen**

Chimenea solar inclinada con almacenes porosos para mejorar el almacenamiento de energía térmica en el PCM. Condiciones ideales.

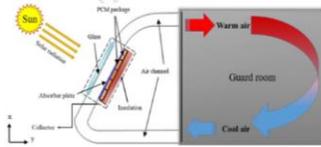


Shbailat et al.
Chimenea solar inclinada con placa absorbente formada de espuma metálica en condiciones ideales.

2020

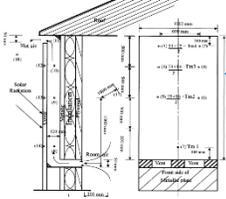
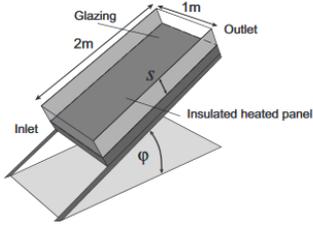
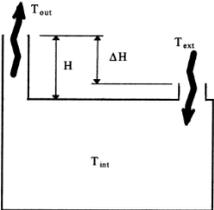
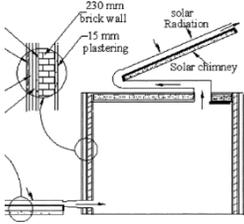
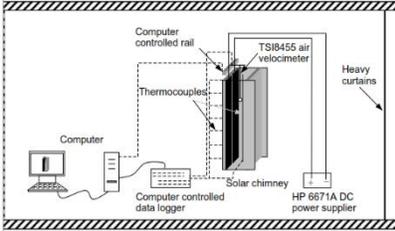
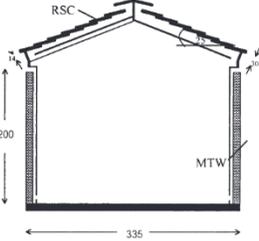
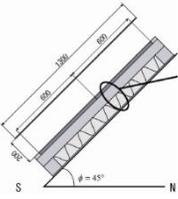
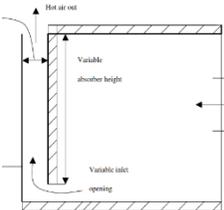
*** Tiji et al.**

Chimenea solar inclinada acoplada a una cavidad bajo condiciones de clima cálido.



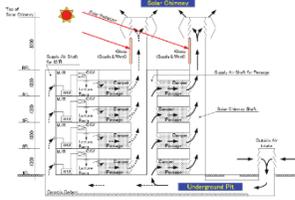
Continuando con la clasificación mostrada en la Fig. 1.1, en la Tabla 1.2 se enlistan los trabajos experimentales correspondientes al diseño, implementación y estudio de las chimeneas solares. Los trabajos mostrados en la línea del tiempo con un * y en color rojo indican el uso de PCM en las chimeneas solares.

Tabla 1.2. Línea del tiempo de trabajos experimentales

Condiciones reales	Año	Condiciones controladas de laboratorio
<p>Hirunlabh et al. Chimenea solar de un solo canal (uso diurno) bajo condiciones climáticas de Tailandia en verano (clima cálido-húmedo).</p> 	1999	
<p>Afonso y Oliveira Chimenea solar de un solo canal tipo fachada (uso diurno) bajo condiciones de Lisboa (Portugal) (clima cálido).</p> 	2000	
<p>Raman et al. Chimenea solar inclinada tipo techo (uso diurno) en clima cálido-húmedo de Nueva Deli (India).</p> 	2001	<p>Adam et al. Chimenea solar de un solo canal sometido a flux de calor constante en la placa absorbente y diferentes ángulos de inclinación.</p> <p>Chen et al. Chimenea solar de un solo canal sometido a flux de calor constante en la placa absorbente, diferentes ángulos de inclinación, altura y espesor del canal.</p> 
<p>Khedari et al. Chimenea solar de un solo canal tipo techo (uso diurno) acoplado a una habitación en Tailandia.</p> 	2002	
<p>*Kaneko et al. Chimenea solar inclinada (uso diurno y nocturno) en Osaka, Japón (clima cálido húmedo).</p> 	2003	
<p>Mathur et al. Chimenea solar de un solo canal tipo techo (uso diurno) acoplado a una habitación en Tailandia.</p> 	2006	

Chungloo y Limmechokchai

Chimenea solar inclinada de un solo canal (uso diurno) con sistema de aspersión de agua bajo condiciones climáticas de Tailandia.

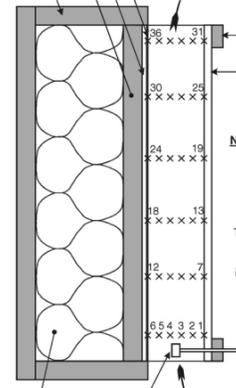


Shinada et al.
Chimenea solar vertical acoplada con pozo subterráneo en la Universidad Kitakyushu, Japón.

2007

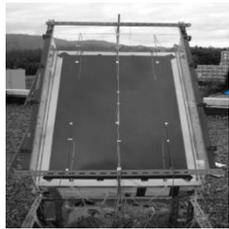
Burek y Habeb

Chimenea solar de un solo canal sometido a flux de calor constante en placa absorbente.



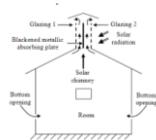
***Sharma et al.**

Chimenea solar inclinada (uso diurno y nocturno) en Osaka, Japón.

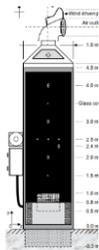


Arce et al.

Propuesta de chimenea solar de doble canal.



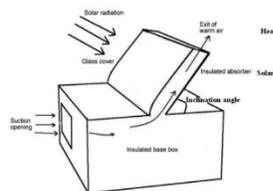
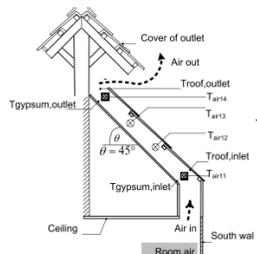
2008



Arce et al.
Chimenea solar vertical con muro masivo sin habitación expuesta a clima subdesértico.

2009

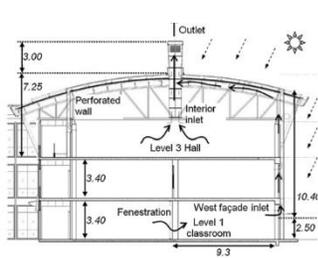
Chungloo y Limmechokchai
Chimenea solar tipo techo (uso diurno) acoplada a una habitación.



Reddy et al.
Chimenea solar inclinada tipo techo (uso diurno) acoplada a una habitación.

2012

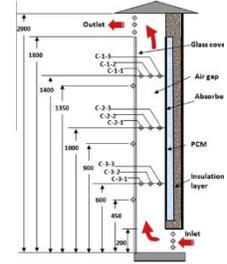
Tan y Wong
Chimenea solar inclinada tipo techo (uso diurno) acoplada a un edificio “cero” energía, en clima cálido húmedo.



2012

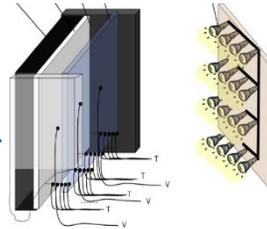
***Li y Liu**

Chimenea solar de un solo canal con control de aperturas y flux de calor en placa absorbente.



Imran et al.
Chimenea solar inclinada tipo techo (uso diurno) acoplada a una habitación a escala en clima cálido.

2014

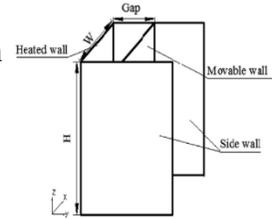


Liu y Li
Chimenea solar de pared doble híbrida, implementando un sistema de lámparas para simular la radiación solar.

2015

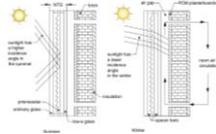
Jing et al.

Chimenea solar de un solo canal con flux de calor constante en pared absorbente, y espesor y altura del canal variables.

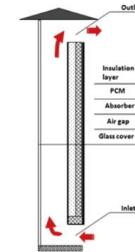


***Kara**

Chimenea solar vertical tipo fachada con un arreglo de ventana tipo persiana para la cubierta de vidrio.



2016



***Liu y Li**
Chimenea solar tipo fachada, con aperturas controladas con fines de calefacción.

Zha et al.

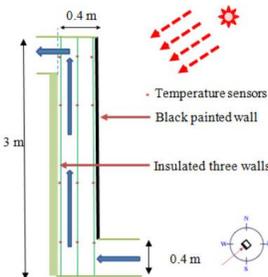
Chimenea solar tipo fachada acoplada a un edificio de tres plantas.



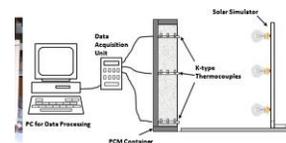
2017

***Zhou y Pang**

Chimenea solar vertical bajo condiciones controladas para evaluar la mejora en el almacenamiento térmico.



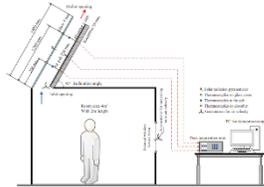
Rattanongphisat et al.
Chimenea solar vertical acoplada a una edificación bajo condiciones de clima cálido húmedo.



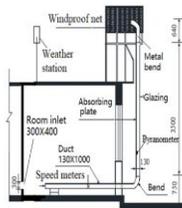
***Li et al.**
Chimenea solar vertical, bajo condiciones controladas.



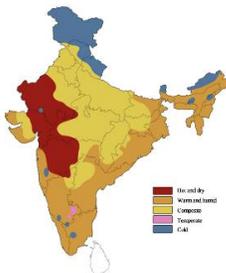
Abdeen et al.
Chimenea solar inclinada tipo techo acoplada a una edificación bajo condiciones de clima cálido húmedo.



Hong et al.
Chimenea solar de un canal acoplado a una vivienda, junto a un sistema de flujo de refrigerante variable bajo condiciones de Hangzhou (China).

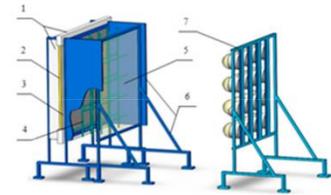


Manu et al.
Se emplearon diferentes sistemas pasivos incluyendo chimeneas solares en seis edificaciones, ubicadas en diferentes ciudades de la India representativos de cada clima.



2017

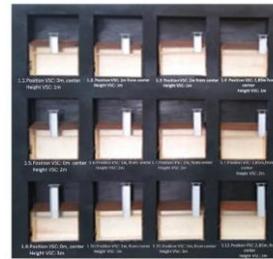
***Bin et al.**
Chimenea solar vertical con simulador solar.



Hou et al.
Chimenea solar vertical de un solo canal con flux de calor uniforme en placa absorbente.



Sugini y Mufida
Chimenea solar vertical para ventilación y enfriamiento.



2019

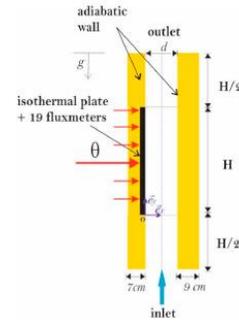
***Frutos-Dordelly et al.**
Chimenea solar vertical acoplado a cavidad en el que se evaluó el desempeño del PCM.



Hamood y Nima
Chimenea solar de un canal inclinado con espuma metálica como pared absorbente en clima cálido.

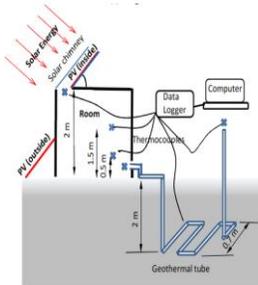


Cherif et al.
Chimenea solar vertical con extensiones de entrada y salida aisladas.



Elghamry y Hassan

Chimenea solar inclinada acoplada a cavidad con una especie de intercambiador de calor tierra-aire bajo condiciones de clima semi-arido.

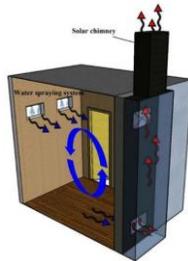


Elghamry y Hassan
Chimenea solar inclinada acoplada a cavidad con una especie de intercambiador de calor tierra-aire.



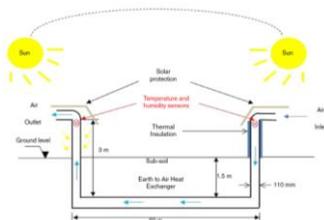
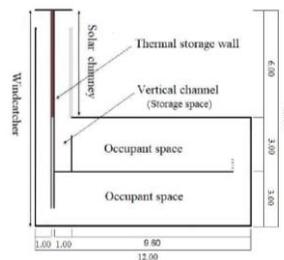
2020

Rabani et al.
Chimenea solar vertical tipo fachada acoplado a cavidad bajo condiciones de clima cálido seco.



Moosavi et al.
Chimenea solar vertical con un captador de aire para aumentar condiciones de confort.

Sakhri et al.
Chimenea solar vertical acoplado a un intercambiador tierra-aire en clima árido.



Los primeros estudios de las chimeneas solares con enfoque hacia las edificaciones vieron la luz a finales de los 70's. Durante esta época y durante al menos una década, la forma de analizar este tipo de sistemas pasivos fue mediante un enfoque de BE. **Barra y Carratelli (1979)** y **Barbera et al. (1985)** fueron de los primeros en tratar chimeneas solares de tipo vertical en climas cálidos con fines de ventilación y ahorro de energía de sistemas activos. **Barbera et al. (1985)** fueron de los primeros en analizar sistemas combinados de humidificación para mejorar las condiciones de confort al interior de una edificación. Posteriormente, con el advenimiento del desarrollo tecnológico y las técnicas de CFD se dio el inicio al estudio de sistemas individuales y acoplados como el trabajo de **Awbi y Gan (1992)**, donde realizaron el estudio de una chimenea solar y un muro Trombe acoplados a una habitación en 3D. Sin embargo, a pesar de contar con la precisión y robustez de una solución numérica mediante CFD, el uso de BE fue más atractivo al requerir menos recursos de cómputo para modelar el fenómeno físico detrás de las chimeneas solares. De esta manera, trabajos como el de **Bansal et al. (1993 y 1994)** sentaron las bases para futuros modelos de BE que fueron validados mediante los primeros estudios experimentales de chimenea solar como **Hirunlabh et al. (1999)**, en donde se implementó una chimenea solar bajo condiciones climáticas de Tailandia (clima cálido húmedo), y **Afonso et al. (2000)** en donde se implementó una chimenea solar tipo fachada bajo las condiciones climáticas de Lisboa, Portugal (clima cálido).

Durante algunos años, los estudios de chimeneas solares consistían en evaluar configuraciones del tipo vertical y fachada. Posteriormente, comenzaron a experimentarse variantes como chimeneas solares de tipo techo, verticales e inclinadas para dos aguas (**Correira da Silva et al., 2001; Raman et al., 2001; Chungloo y Limmeechokchai, 2009**). Todas estas evaluaciones fueron desarrolladas para chimeneas solares de un solo canal, no fue hasta el trabajo de **Arce et al. (2008)** en donde se propuso un modelo de chimenea solar de doble canal mediante un estudio por BE. Este diseño fue estudiado bajo algunas condiciones climáticas de la República Mexicana por **Tlatelpa-Becerra (2011)** mediante BE y más tarde por **Zavala Guillén et al. (2018)** mediante un modelo CFD para tres ciudades de la República Mexicana obteniéndose flujos máxicos de hasta 0.2 kg/s en condiciones de clima cálido, los cuales fueron superiores a los flujos máxicos obtenidos bajo configuraciones de chimenea solar de un solo canal.

Para comprender los tipos de chimeneas solares de uso diurno existentes, en la Fig. 1.2 se muestra un diagrama con una clasificación elaborada a partir de los trabajos revisados a la fecha.

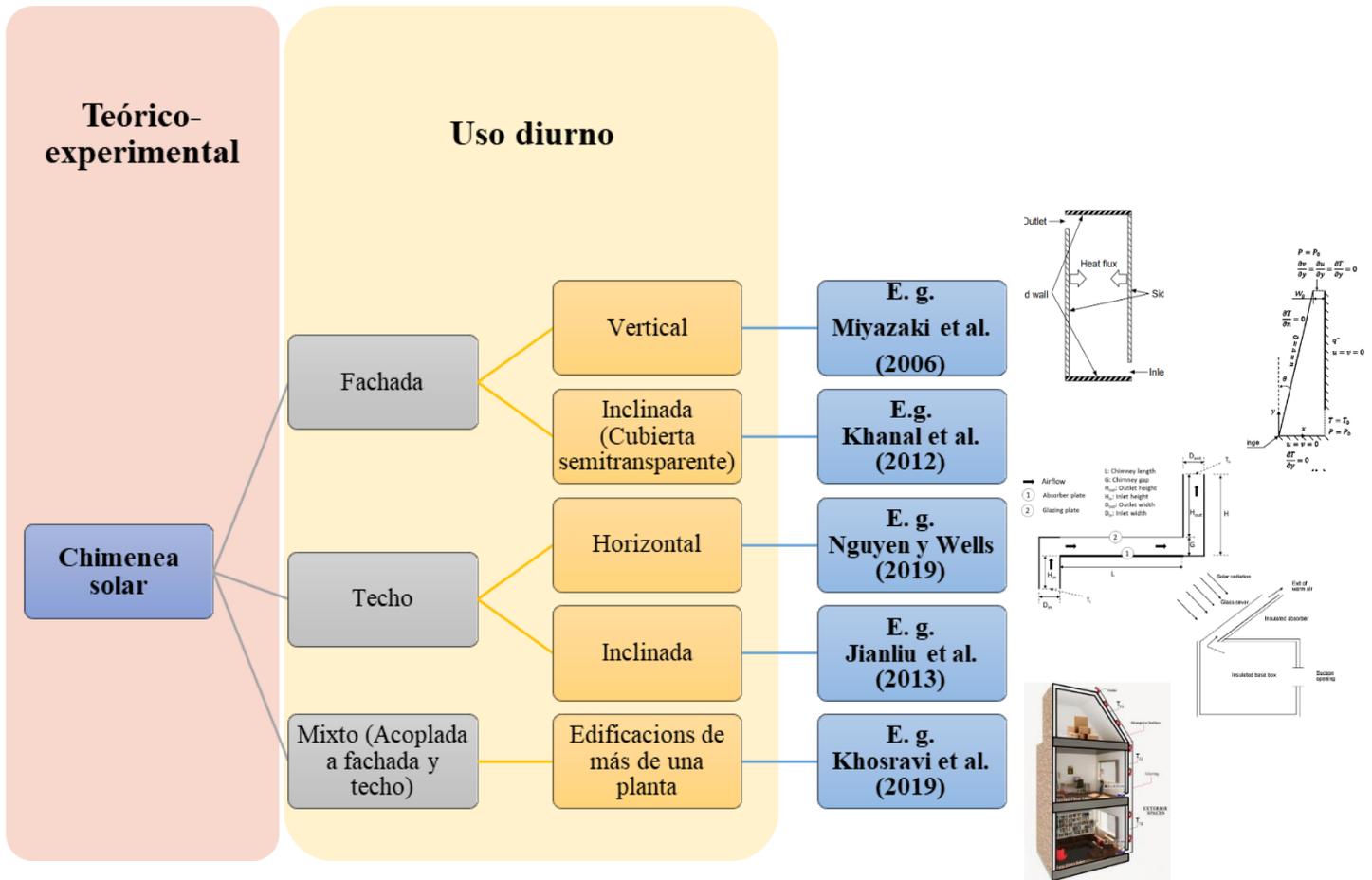


Figura 1.2. Clasificación de chimeneas solares de uso diurno

Los estudios teóricos y experimentales buscan optimizar el efecto de la ventilación natural al variar parámetros como el espesor del canal, altura, área de captación de la placa absorbidora e inclinación del canal. Como requisito de funcionalidad, estos diseños permiten obtener el mínimo de 1.3 cambios de aire por hora en una edificación de acuerdo

con la estándar **ASHRAE 62.2 (2013)**. Sin embargo, el hecho de aseverar que existe solo un diseño óptimo o que cualquier diseño se puede trasladar, aplicar y obtener así los mismos beneficios en cualquier edificación es incorrecto, ya que las condiciones del edificio y, principalmente, las condiciones climáticas del lugar juegan un papel muy importante en el desempeño de las chimeneas solares. Esto se puede observar en estudios donde las condiciones climáticas tropicales (**Chungloo y Limmechokchai, 2007, Samsudin et al., 2020**) han obligado a los investigadores a incorporar nuevos sistemas en los diseños originales de chimeneas solares, por ejemplo, la inclusión de sistemas de aspersión de agua que mejoran el confort térmico. En estos estudios se busca reducir el impacto que tiene la temperatura del aire que entra a la habitación sobre las condiciones de confort de esta. Además, una conclusión en estos estudios es que las características del lugar hacen necesario extender el tiempo de operación de las chimeneas solares en horarios nocturnos. Sin embargo, tal como se muestra en la Fig. 1.2, la mayoría de los estudios existentes se han realizado para aplicaciones de horario diurno, donde una característica peculiar de estos sistemas es implementar placas delgadas de metal u otros materiales como paredes absorbentes, caracterizándose por su baja inercia térmica. En este punto, surgieron estudios como el de **Martí-Herrero et al. (2007)** donde presentan un estudio teórico por medio de BE de una chimenea solar vertical con pared absorbente de muro masivo o muros de materiales como concreto y ladrillo. Estas características permitieron al sistema mantenerse operativos un mayor tiempo en horarios sin radiación solar y con flujos máxicos estables entre 0.01 y 0.012 kg s^{-1} . En el trabajo de **Kaneko et al. (2006)** se presenta el uso de PCM (sulfato de sodio decahidratado, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) en las paredes absorbentes como un sustituto a los muros masivos de concreto u otros materiales de mampostería, extendiendo así el tiempo de operación de las chimeneas solares con flujos volumétricos de 100 a $400 \text{ m}^3/\text{h}$. Ellos construyeron un prototipo de chimenea solar inclinado con el PCM para validar el modelo de BE desarrollado. De esta manera inició una nueva etapa para el estudio de las chimeneas solares con fines de extender el tiempo de operación en lugares donde se requieren condiciones de ventilación natural en horarios sin radiación. Estos trabajos pueden clasificarse como chimeneas solares de uso nocturno.

En comparación a la clasificación de chimeneas solares para uso diurno, los estudios reportados con uso de PCM en las paredes absorbentes se han limitado a prototipos, o

módulos, para la evaluación individual de la chimenea solar. Donde solo el módulo se expone a condiciones climáticas reales tal es el caso del trabajo de **Sharma et al. (2007)**, en donde el módulo de la chimenea solar se evaluó a tres ángulos de inclinación (45, 60 y 75°), o el trabajo de **Amori et al. (2012)** en el que se evaluó una chimenea solar inclinada bajo condiciones climáticas de Iraq (clima cálido). Sin embargo, debido a las experiencias reportadas, se han realizado evaluaciones de modelos de chimenea solar bajo condiciones controladas de laboratorio tal como los trabajos de **Li y Liu (2014)**, en el que se analizó el control de las aperturas y el flux de calor en la placa absorbente para aumentar el tiempo de almacenamiento de energía térmica al igual que el trabajo de **Liu et al. (2015)**. Otro de los trabajos reportados sobre un prototipo de chimenea solar bajo condiciones controladas de laboratorio usando PCM es el trabajo de **Li et al. (2016)**, en el que se presentan siete puntos para la selección del PCM adecuado para una chimenea solar. Estos puntos consisten en: 1) la temperatura máxima de fusión del PCM debe ser menor que la temperatura de la superficie de la placa absorbente que puede alcanzar, 2) el PCM debe poseer un alto calor latente de fusión, 3) la conductividad térmica debe ser alta para una mayor velocidad de transferencia de energía durante la carga y descarga, 4) que el PCM presente una estabilidad térmica y no presente una degradación repetitiva en el ciclo de fundición-salificación, 5) que el contenedor del PCM sea pequeño para un menor volumen de PCM concentrado, 6) no debe presentar efectos de super enfriamiento para evitar cualquier efecto de nucleación y 7) el PCM a usar debe ser económico y ambientalmente amigable.

Los estudios experimentales de chimenea solar desarrollados a la fecha emplean el método de lámparas simuladoras de radiación solar para los estudios bajo condiciones controladas de laboratorio tal como el trabajo de **Zhou y Pang (2015)**. Entre las razones se encuentra el hecho de reducir los factores o agentes que afectan la observación del fenómeno al momento de estudiar los efectos de un PCM en la placa absorbente. De esta manera se han logrado develar ventajas y desventajas de su implementación. Por ejemplo, se ha determinado que el PCM debe fundirse por completo para obtener un mejor desempeño del sistema en general, a esta conclusión se llegó en el trabajo realizado por **Frutos-Dordelly et al. (2019)** en el que se evaluaron sistemas de chimenea solar con y sin PCM incorporados a una cavidad bajo condiciones controladas de laboratorio. Entre los resultados obtenidos se determinó que el uso de PCM reduce las pérdidas de energía por las

secciones transversales de la chimenea solar, además que la temperatura del aire se mantiene estable y hasta en un 33% más alta que un sistema sin PCM. En cuanto al tiempo de operación, se reportó un funcionamiento continuó de 6 horas posterior al ciclo en el que el sistema recibía energía, lo cual demuestra los beneficios de un sistema con alta capacidad de almacenar energía. Por lo tanto, aún deben realizarse diversos estudios para evaluar el impacto del PCM en sistemas pasivos como las chimeneas solares.

Los trabajos experimentales de chimeneas solares de uso diurno y nocturno han permitido observar el comportamiento de las chimeneas solares bajo condiciones climáticas reales, emuladas o controladas en laboratorio, sin embargo, la cantidad de pruebas realizadas es limitada comparada a las configuraciones analizadas en los estudios teóricos ya sea mediante CFD o BE. Por lo que, debido a la diferencia en uso de recursos de cómputo entre estas metodologías, los estudios que involucran análisis bajo condiciones reales de días representativos de cada mes o año usando CFD se limitan a analizar el sistema solo en ciertas horas específicas del día tal como los trabajos de **Zavala Guillén et al. (2016)**, o el trabajo de **Jiménez-Xamán et al. (2020)** donde el modelo de la cavidad acoplada es resuelta mediante el método de volumen finito (CFD) mientras que la chimenea solar es tratada mediante BE. Una forma de estudiar el desempeño de una chimenea solar sin necesidad de realizar un estudio en estado transitorio es bajo diferentes valores de intensidad radiativa como el trabajo de **Kong et al. (2020)** en el que se variaron diferentes ángulos de inclinación de la chimenea solar con diferentes valores de flux de energía, generando así una evaluación anual y realizando un análisis con los datos de un periodo de tiempo de las 08:00 a las 16:00 horas. Esto en contraste con trabajos como el de **Taghdisi et al. (2020)** en el que empleando un paquete comercial basado en BE (Energy Plus) se realizó el estudio de una chimenea solar tipo techo bajo condiciones climáticas de una región rural de Irán (clima templado) por medio de un análisis en estado transitorio durante todo el periodo de verano e invierno, además de realizar la modelación considerando a los ocupantes y un análisis de tiempo de recuperación de la inversión inicial para la implementación de la chimenea solar.

Los estudios de chimeneas solares que involucran PCM priorizan la búsqueda de una configuración, bajo las condiciones evaluadas, que permita captar y aprovechar al máximo

la energía incidente en la chimenea solar. Ya que desde la aplicación de estos materiales se ha estudiado incluso hasta la forma del contenedor del PCM tal como el trabajo de **Huang et al. (2020)** en donde para un PCM RT42 se recomienda usar contenedores individuales o seccionados ya que usar una sola pieza rectangular alargada afecta el desempeño del PCM. Este estudio se realizó para un flux de calor constante de 500 W/m^2 para contenedores de altura variable desde los 12, 24, 36 y 48 cm en donde los tiempos de fundición bajo estas condiciones fueron de 240, 300, 330 y 460 minutos. De esta manera, los beneficios de implementar una chimenea solar en cuanto a los efectos de ventilación inducida con PCM pueden incrementarse considerablemente en aplicaciones reales, ya que se ha registrado aumentos de la temperatura en el sistema de hasta 33% aumentando el flujo másico en comparación a configuraciones de chimenea solar sin PCM (**Frutos-Dordelly et al., 2019**).

La tendencia en los nuevos estudios de chimeneas solares desde un enfoque teórico va de la mano con el desarrollo de experimentos para la validación de los modelos matemáticos. En cuanto a las diferencias entre los estudios teóricos y experimentales, las desviaciones se encuentran entre el 14.7 y el 23% para los modelos de balance de energía (**Mathur et al., 2006; Duan, 2019**), por ello, la necesidad de realizar el proceso de validación de los modelos teóricos y más aún donde los nuevos estudios incluyen el uso de PCM, ya que el modelo matemático se convierte en un problema de propiedades variables y por lo tanto se agrega un efecto de no linealidad a la solución numérica en los modelos de chimeneas solares (**Vargas-López et al., 2019**).

Sin embargo, en los últimos años (2020-2022) el enfoque en los estudios de chimeneas solares ha evolucionado considerablemente debido a la necesidad básica de proveer y mejorar las condiciones de ventilación en edificios residenciales y no residenciales. Entre los cambios más notables se encuentra la implementación de paneles fotovoltaicos en conjunto con placas de PCM tal como el estudio desarrollado por **Ashouri y Hakkaki-Fard (2021)** quienes han combinado el uso de estos dispositivos con aletas para mejorar la transferencia del calor almacenado por el PCM, obteniéndose así mejoras entre 7.7 y 17.6% en capacidad de ventilación y hasta 22 horas y 30 minutos de tiempo de operación. Otros estudios como el de **Ke et al. (2022)** emplearon la misma combinación de paneles

fotovoltaicos y PCM en una chimenea solar tipo fachada con fines de proveer condiciones de confort térmico durante las estaciones de verano e invierno.

Acerca de las condiciones de confort, se han reportado diferentes estudios de combinaciones de chimeneas solares con intercambiadores de calor tierra-aire con fines de enfriamiento de las edificaciones además de la ventilación. Estudios como el de **Long et al. (2021, 2022(a), 2022(b))** y **Bai et al. (2022)** han mostrado la efectividad de estos sistemas acoplados para inducir ventilación, reducir la temperatura de la habitación y prolongar el tiempo de operación hasta las 24 horas de operación continua con el uso de PCM (**Long et al., 2022(b)**).

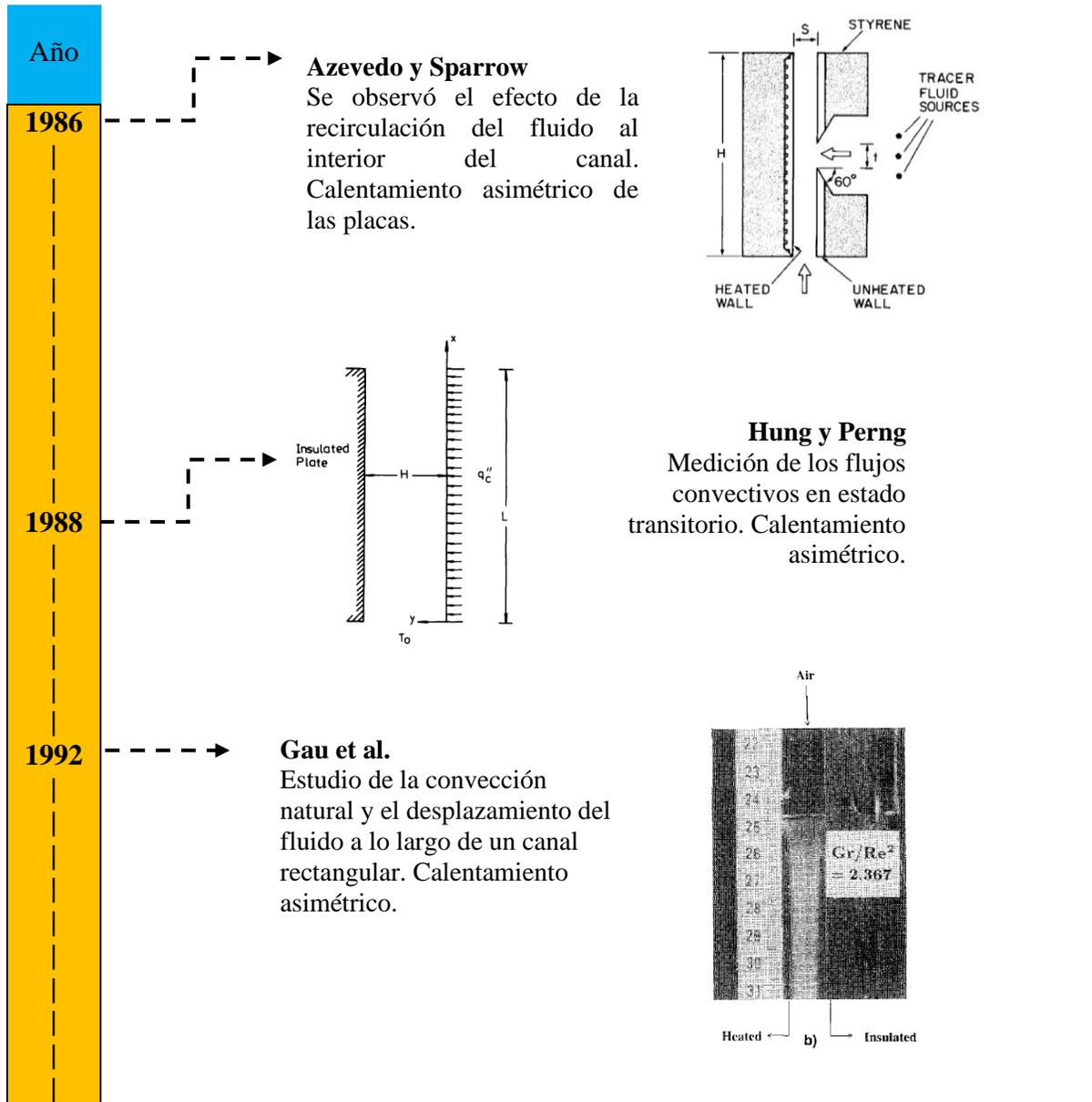
Los estudios paramétricos de chimeneas solares han sido una de las principales constantes a lo largo de los años a través de modelos de balance de energía y modelos diferenciales, sin embargo, estudios como el de **Rasikh et al (2022)** y **Tlatelpa-Becerro et al. (2022)** han intentado reducir el tiempo de cómputo y el número de configuraciones a evaluar a través de la implementación de redes neuronales entrenadas para la predicción del flujo de aire inducido y el comportamiento térmico de las chimeneas solares. Sin embargo, algunos aspectos considerables a denotar en estos estudios es la consideración de modelos en estado cuasi transitorio o con simplificaciones de los fenómenos físicos considerados en los modelos matemáticos.

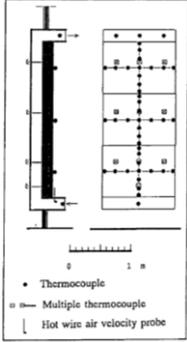
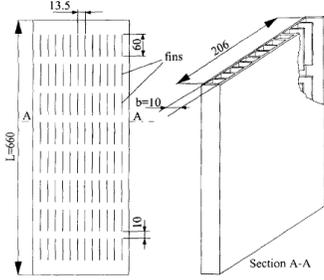
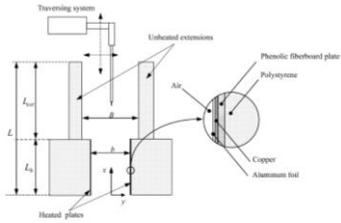
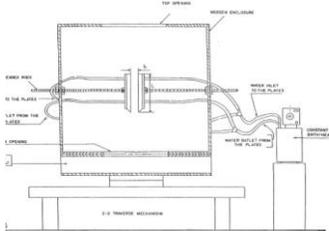
De forma adicional a la revisión de los trabajos reportados en la literatura sobre chimeneas solares y el desarrollo de prototipos experimentales para la validación de modelos teóricos, a continuación, se presentan los resultados de una búsqueda sobre trabajos que involucran el desarrollo de prototipos de canales verticales calentados de forma simétrica y asimétrica, los cuales analizan en principio los mismos fenómenos de transferencia de calor y que han sido las bases para la validación de diferentes modelos teóricos tanto diferenciales como de balances.

El estudio de los canales verticales con paredes calentadas se ha erigido con el propósito de estudiar el efecto de la convección natural al interior del canal, así como el desplazamiento del fluido a partir de las diferentes configuraciones como longitud y amplitud del canal, potencia suministrada e incluso variando el fluido de estudio en cuestión. Para tener un

panorama más claro antes de mencionar algunas de las características peculiares de los trabajos revisados sobre canales verticales, se presenta una línea del tiempo sobre los trabajos revisados para el desarrollo de este trabajo.

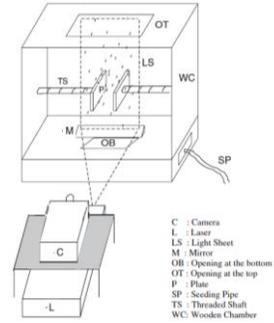
Tabla 1.3. Línea del tiempo de estudios de canales verticales



1993	→	<p>La Pica et al. Se presentan correlaciones empíricas para determinar números adimensionales como el Nusselt. Calentamiento asimétrico.</p>	
1995	→		<p>Huang et al. Estudio de convección mixta en un canal convergente. Calentamiento asimétrico.</p>
1999	→	<p>Daloglu y Ayhan Estudio de la convección natural en canal vertical seccionado. El uso de aletas redujo la convección natural. Calentamiento asimétrico.</p>	 <p style="text-align: center;">FIG. 1 Schematic view of the finned channel</p>
2002	→		<p>Auletta y Manca Estudio de convección natural en canal vertical con extensiones aisladas a la salida. Calentamiento simétrico</p>
2002	→	<p>Habib et al. Estudio de un canal vertical embebido en una cámara controlada abierta. Calentamiento simétrico y asimétrico.</p>	

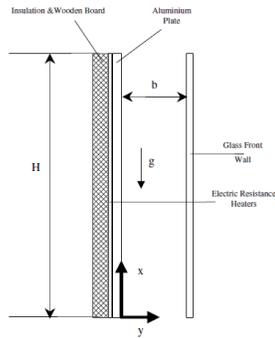
2006

Ayinde et al.
Estudio de la velocidad del fluido al interior del canal.
Calentamiento simétrico.



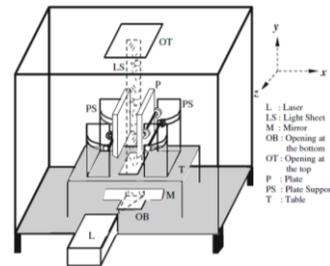
2007

Yilmaz y Fraser
Estudio de convección natural en régimen turbulento.
Calentamiento asimétrico



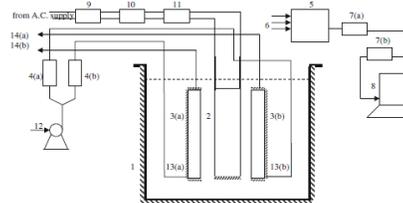
2008

Ayinde et al.
Comparación de resultados de un calentamiento simétrico y asimétrico. Calentamiento asimétrico.

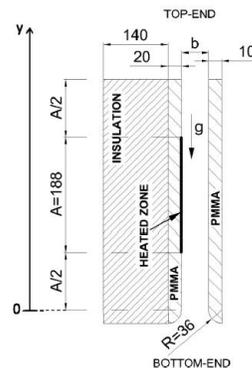


2012

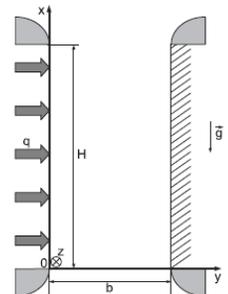
Ospir et al.
Estudio de canal vertical con extensión a la entrada y salida, incluso redondeando la entrada.
Calentamiento asimétrico.



Mitra et al.
Estudio de convección natural usando tres placas espaciadas simétricamente. Calentamiento en placa central

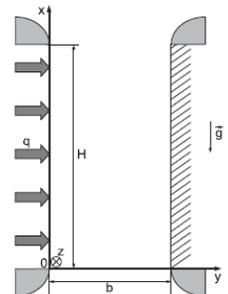


2013

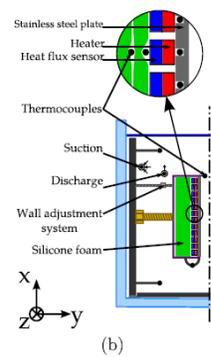


Frédéric et al.
Estudio del flujo reversible. La entrada y salida se redondearon. Calentamiento asimétrico.

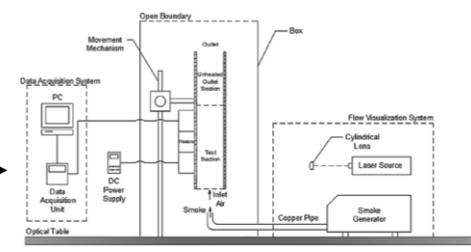
2017



Daverat et al.
Estudio de la transición de flujo laminar a turbulento. Calentamiento asimétrico.

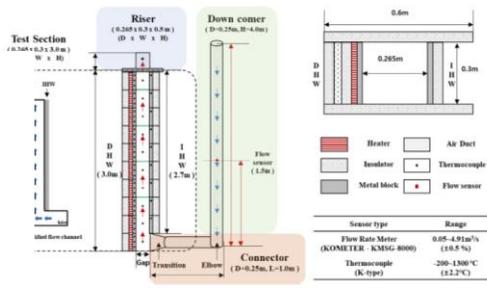


2018



Sarper et al.
Estudio de la recirculación alrededor de protuberancias adyacentes a la placa caliente. Calentamiento asimétrico.

2020



Kim et al.
Estudio de la convección natural y estudio de la recirculación de aire debido al calentamiento de las superficies. Calentamiento asimétrico.

La estructura general de un prototipo de canal vertical consiste en dos placas paralelas, en su mayoría, cuya separación genera un canal con aperturas en la parte superior e inferior de las placas. A partir de este punto se pueden definir dos variaciones para el tipo de calentamiento de las placas. Como se detalló en la Tabla 1.3 el calentamiento de las placas puede ser simétrico o asimétrico. Un calentamiento simétrico consiste en que ambas placas sean condicionadas con un sistema de calentamiento por igual ya sea mediante resistencia térmica o conectado a un baño térmico de tal forma que la temperatura en ambos elementos

28

sea la misma superando por igual la temperatura del aire en el canal. Un calentamiento asimétrico, o diferencial, implica que una de las placas es calentada debido al efecto de un agente externo como una resistencia térmica o a un baño térmico, mientras que la segunda placa es simplemente colocada de forma paralela sin ningún sistema de calentamiento o en su defecto con un sistema de enfriamiento para generar un gradiente de temperatura entre ambos elementos. La selección del tipo de calentamiento dependerá del propósito del estudio.

Un estudio de canal vertical usando calentamiento asimétrico es el trabajo de **Frédéric et al. (2013)** en el que se estudia el efecto del flujo reversible en un canal vertical usando aire como fluido de trabajo. La razón de especificar el tipo de fluido de trabajo se debe a que a la fecha los estudios de canales verticales se dividen en dos tipos de fluidos de trabajo que son aire y agua. Esto se debe a los mecanismos que se desean estudiar y el tipo de correlaciones que se pueden obtener a partir de las mediciones experimentales. Hablando a detalle sobre los tipos de mecanismos a estudiar, una de las razones de emplear agua como fluido de trabajo en el canal se debe a que solo se desea analizar el efecto de la conducción y convección de calor, ya que el agua evita que el efecto radiativo disminuya en gran medida, de tal manera que puede considerarse como despreciable en las mediciones (**Ospir et al., 2012**), ya que al estudiar y cuantificar el efecto del intercambio radiativo resulta complicado el diseñar e implementar un sistema de medición adecuado. Por esta razón trabajos como el de **Mitra et al. (2008)**, **Ospir et al. (2012)** y **Daverat et al. (2017)** realizaron estudios donde el sistema de canal vertical se encuentra embebido en una especie de recipiente contenedor para acondicionar el uso de agua como fluido de trabajo y así estudiar solamente el efecto de la transferencia de calor por conducción y convección.

Un aspecto en el que coinciden gran parte de los trabajos experimentales de canales verticales es el diseñar, construir y evaluar prototipos de pequeña a mediana escala, donde la longitud del canal puede ser desde los 12.5 cm en total (**Habib et al., 2002**), hasta los 45.5 cm (**Gau et al. 1992**), hay sus excepciones como el trabajo de **La Pica et al. (1993)** con un canal vertical de 2.6 m de longitud o el trabajo de **Yilmaz et al. (2007)** y **Kim et al. (2020)** cuyo canal vertical es de 3.0 m de longitud. Estudiar canales de menores dimensiones permite reducir el espacio entre los sensores y así obtener una mayor cobertura

en la medición de las temperaturas, incluso usar trazadores de humo (para el caso de aire) para observar los patrones del fluido en su trayectoria a lo largo del canal.

Una forma de aislar las paredes es mediante el uso de aislante como el poliestireno extruido (Foamular), con el cual se reduce la velocidad de transferencia de calor y por lo tanto la energía emitida por los calentadores es transferida en gran medida al fluido de trabajo. Este tipo de aislamiento es también implementado para extender la entrada y salida del canal de aire como el trabajo de **Auletta et al. (2002)** en donde se colocaron extensiones de aislante a la salida, sin embargo el espaciamiento no fue conservado como el del canal de aire de tal manera que se presentó flujo reversible a la salida debido al cambio súbito de presión, aspecto que fue mejor evaluado por **Ospir et al. (2012)** y **Sarper et al. (2018)** en los que se usaron agua y aire como fluidos de trabajo respectivamente. Sin embargo, esta medida puede ser intercambiada por aquellos trabajos en los que el canal se encontraba embebido en un contenedor de mayor tamaño para proveer una zona de mayor control, tal es el trabajo de **Ayinde et al. (2006)** y **Ayinde et al. (2008)**.

La tendencia en los nuevos estudios de canales verticales se ha dirigido en la medición de los parámetros como la temperatura del aire y el campo de velocidades del fluido con sistema de mediciones menos invasivos, lo cual permite obtener bases de datos recopilados con menor ruido o interferencia debido a los propios mecanismos de medición existentes.

1.2.1. Conclusiones del estado del arte

La importancia de los sistemas pasivos como chimeneas solares en aplicaciones para el ahorro de energía en edificaciones es notable sobre todo en los últimos años. Los estudios paramétricos permiten obtener una mejor comprensión del funcionamiento de las chimeneas solares con el fin de presentar un diseño óptimo para cada caso en particular. Desde el uso de chimeneas solares verticales, inclinadas, para fachada o techo, incluso chimeneas solares de doble canal, es inherente la necesidad de prolongar el tiempo de operación de estos sistemas sobre todo en climas cálidos y húmedos donde la ventilación es requerida en horarios nocturnos y ha sido la causa para el estudio de muros masivos como paredes absorbentes y elementos de almacenamiento de energía térmica. Es aquí donde se presentan los PCMs como alternativas de solución para el almacenamiento de la energía

térmica, sin embargo, aún se desconocen por completos todas las posibilidades y configuraciones de estos materiales en el desempeño de las chimeneas solares. Además, es un hecho la falta de estudios bajo las condiciones climáticas de la República Mexicana de chimeneas solares con PCM, incluso empleando modelos matemáticos derivados de BE que permitan realizar análisis en estado transitorio de periodos de tiempo prolongado. Otro aspecto, es que los casos en los que se ven involucrados estudios de PCM se enfocan únicamente a chimeneas solares de un solo canal mientras que aún no se ha explorado su impacto al implementarse en chimeneas solares de doble canal y sobre todo la falta de un prototipo experimental para la validación de los modelos teóricos reportados.

En cuanto a los prototipos experimentales para la validación de modelos teóricos, en la literatura se presenta también el uso de los datos obtenidos de prototipos de canales verticales. A partir de una revisión en la literatura acerca de esta tendencia, se encontró que el estudio de los canales verticales ha permitido proveer información útil para la validación de modelos diferenciales, a su vez que se proponen diferentes correlaciones para el cálculo de parámetros adimensionales que son esenciales para el estudio de la convección en el canal. Aunque aún se continúan estudiando las causas y efectos de los flujos reversibles, así como el diseño de espacios o ambientes de mayor control para reducir las variables que podrían afectar el proceso de medición y análisis del fenómeno en cuestión. Esta situación ha obligado a que el estudio se limite a una pequeña área de medición con un prototipo que en la mayoría de los casos dista tener las dimensiones de una aplicación real. Esto puede afectar el proceso de validación de los modelos teóricos que son empleados en chimeneas solares en tal forma que la estimación de los valores de temperatura y flujo másico no sean acertadas.

1.3. Objetivo general

Analizar, evaluar y determinar el comportamiento dinámico de una chimenea solar de un canal (ChSo-OC) y doble canal (ChSo-TC) con una pared absorbente de metal, hormigón y material de cambio de fase bajo condiciones de la República Mexicana.

1.4. Objetivos específicos

- Aprender la técnica de balances globales de energía y métodos numéricos para materiales de cambio de fase.
- Formular el modelo de balance global en estado transitorio para una ChSo-TC con pared absorbente de metal, hormigón y material de cambio de fase.
- Desarrollar un código numérico para resolver el modelo de balance global.
- Evaluar y adecuar la funcionalidad de un prototipo de chimenea solar con placa absorbente metálica ubicada en el DIM-CENIDET.
- Instrumentar el prototipo de chimenea solar.
- Realizar las pruebas experimentales del prototipo de chimenea solar con placa absorbente metálica.
- Validar el modelo de balance global propuesto y realizar el estudio paramétrico con el modelo de balance global para el sistema de chimenea solar bajo condiciones de la República Mexicana.

1.5. Alcance

Llevar a cabo un estudio teórico-experimental de una ChSo-TC conformado por: pared semitransparente (cubierta de vidrio) – espacio de aire – pared absorbente – espacio de aire – pared semitransparente. Implementar un modelo matemático de balances globales en estado transitorio con capacidad de modelar la pared absorbente como: pared con material de cambio de fase, pared metálica y pared de hormigón. Construir un prototipo de chimenea solar de un solo canal bajo condiciones controladas de laboratorio para validar el modelo matemático con pared metálica. Posteriormente, realizar un estudio paramétrico con diferentes condiciones climáticas de México. Determinar expresiones matemáticas para el flujo másico y eficiencia del sistema en función del tiempo para las diferentes condiciones climáticas de México. Considerar la plataforma computacional desarrollada en CENIDET, en el modelo numérico de diferentes sistemas térmicos.

1.6. Estructura de la tesis

La tesis se compone de ocho capítulos y un anexo, en los que se describen las actividades realizadas durante el desarrollo de este trabajo. El **Capítulo 2** comprende los fundamentos teóricos sobre los modelos de balance de energía aplicados al estudio de los fenómenos de transferencia de calor que son aplicados a las chimeneas solares. El **Capítulo 3** presenta el modelo físico y experimental de la chimenea solar de un canal desarrollado en el DIM CENIDET. El **Capítulo 4** presenta el modelo de la chimenea solar de uno y doble canal desarrollado a partir de la teoría de modelos de balance de energía, incluyendo el uso de PCM y otros materiales masivos. El **Capítulo 5** muestra el desarrollo de la verificación y la validación de los modelos de chimenea solar desarrollados posterior a las pruebas realizadas con el prototipo de chimenea solar experimental. En los **Capítulos 6 y 7** se presentan los resultados de la evaluación experimental y los obtenidos a partir del análisis de los modelos teóricos de la ChSo-OC y la ChSo-TC bajo las condiciones climáticas de la República Mexicana. Finalmente, en el **Capítulo 8** se muestran las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos para el desarrollo de los modelos de balance de energía de la chimenea solar de uno y doble canal con PCM. Se presenta una introducción a la analogía de los circuitos eléctricos aplicados al estudio de los mecanismos de transferencia de calor y posteriormente una introducción sobre los PCM y el método para la solución de la conducción de calor con PCM.

2.1. Analogía de teoría de circuitos eléctricos a la transferencia de calor

Los métodos teóricos para el análisis de la transferencia de calor se clasifican en: soluciones analíticas y soluciones numéricas. Las soluciones analíticas, parten de la implementación de un método definido para obtener la expresión matemática que representa la solución de la ecuación gobernante del fenómeno de estudio. Sin embargo, cuanto mayor sea la complejidad del fenómeno, las alternativas de solución se reducen hasta encontrarse con la imposibilidad de obtener una solución exacta al problema. Esto pasa constantemente al estudiar los fenómenos de transferencia de calor en sus diferentes aplicaciones como energía en edificaciones, para lo cual, es necesario realizar el análisis de los mecanismos de transferencia de calor conjugados, además de la inclusión de otros fenómenos como la transferencia de masa. Es aquí, donde son importantes las soluciones numéricas, en las cuales, mediante métodos iterativos, los efectos de la no linealidad son tratados para obtener una solución satisfactoria al problema.

En las soluciones numéricas surgen dos vertientes importantes para el estudio de la transferencia de calor, los cuales son el análisis mediante técnicas de CFD y mediante BE. De los métodos de CFD algunos de los métodos consolidados son el método de elemento finito (MEF), el método de diferencias finitas (MDF) y el método de volumen finito (MVF). Estos métodos son útiles para analizar los fenómenos de transferencia de calor desde un enfoque diferencial. Se caracterizan por ofrecer una solución cercana a la solución exacta de las ecuaciones gobernantes, con el inconveniente de requerir una considerable cantidad de

recursos computacionales además del tiempo de cómputo necesario. Es en este punto donde sobresalen y aventajan las soluciones mediante los modelos de BE. Los cuales se caracterizan por requerir una menor cantidad de espacio y recursos de cómputo además de demandar un tiempo de cómputo considerablemente menor a los métodos de CFD, sin embargo, el inconveniente recae en la necesidad de emplear correlaciones empíricas para el estudio del fenómeno correspondiente del cual se desea obtener una solución correcta o satisfactoria.

Los BE o balances termodinámicos permiten estudiar diferentes elementos y acoplar diferentes fenómenos que se caracterizan por realizar un intercambio energético. Para comprender más a detalle en qué consisten los BE y como se desarrolla un modelo matemático a partir del planteamiento de un modelo físico teórico es necesario definir algunos conceptos que se presentan a continuación.

Los BE pueden verse desde la analogía de los circuitos eléctricos, ya que los sistemas se interconectan representando el paso o flujo energético. Para ello se emplean los conceptos de tensión, corriente y resistencia. Considere el circuito eléctrico que se presenta en la Fig. 2.1, en el que se muestran algunos elementos básicos necesarios para la analogía.

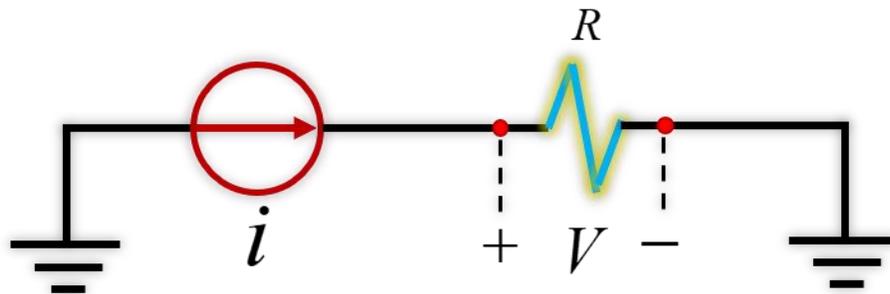


Figura 2.1. Circuito eléctrico

La corriente eléctrica implica una transferencia de carga (energía) o carga en movimiento. De esta forma se puede establecer que al igual que el flujo de calor, ambas tienen una dirección asociada y un valor numérico con el cual cuantifican el flujo de energía a través de uno o varios elementos. Como se muestra en la Fig. 2.1, seguido de la fuente de corriente, una resistencia de valor R conectada en serie se opone al flujo de energía, lo cual es la causa de la existencia de una tensión eléctrica o una diferencia de potencial entre ambas terminales del elemento resistivo. En este caso la tensión eléctrica representa una medida del trabajo que se requiere para mover la carga a través del elemento (Hayt et al. 2012). Realizando la

analogía de la resistencia eléctrica a la transferencia de calor, todos los materiales anteponen una resistencia al flujo de calor la cual puede determinarse a partir de sus propiedades por medio de una relación basada en una expresión matemática previamente definida. En este caso la diferencia de potencial es asociada con la diferencia de temperatura a los extremos del elemento resistivo, para el caso de la transferencia de calor. Al agregar estos elementos de la analogía de la Fig. 2.1 se obtiene:

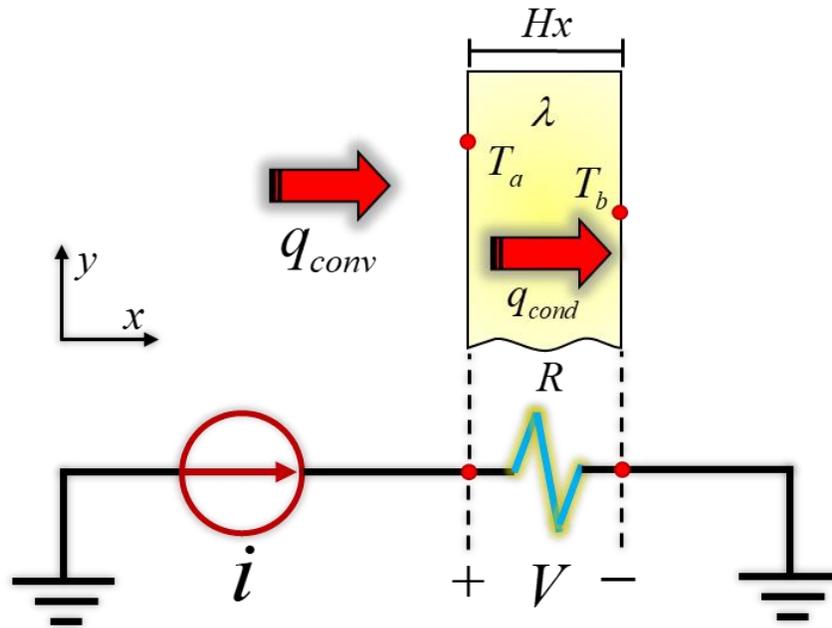


Figura 2.2. Analogía de circuito eléctrico

Como se muestra en la Fig. 2.2, la conexión en serie facilita la comprensión de que una relación matemática similar a la ley de Ohm, lo cual permite enlazar los elementos para determinar la diferencia de temperatura entre ambos extremos del elemento resistivo analizado. La ley de Ohm señala:

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.1)$$

Por lo tanto, la corriente que pasa a través del elemento resistivo en el circuito eléctrico es de la misma magnitud i que la provista por la fuente conectada en serie. De igual forma lo es el flujo de calor por conducción sobre el elemento sólido cuya magnitud y dirección corresponden de la misma forma que el flujo convectivo que incide sobre la superficie del elemento. La diferencia de potencial en la resistencia eléctrica corresponde a la diferencia de

temperatura entre los extremos del elemento sólido. La forma de obtener análogamente el valor de la resistencia térmica al igual que los componentes anteriores consiste en identificar cual es el mecanismo de transferencia de calor involucrado en el análisis. En este punto se emplea la ley de Fourier en el caso de conducción de calor, la ley de enfriamiento de Newton para la convección de calor y la ley de Stefan-Boltzmann para radiación.

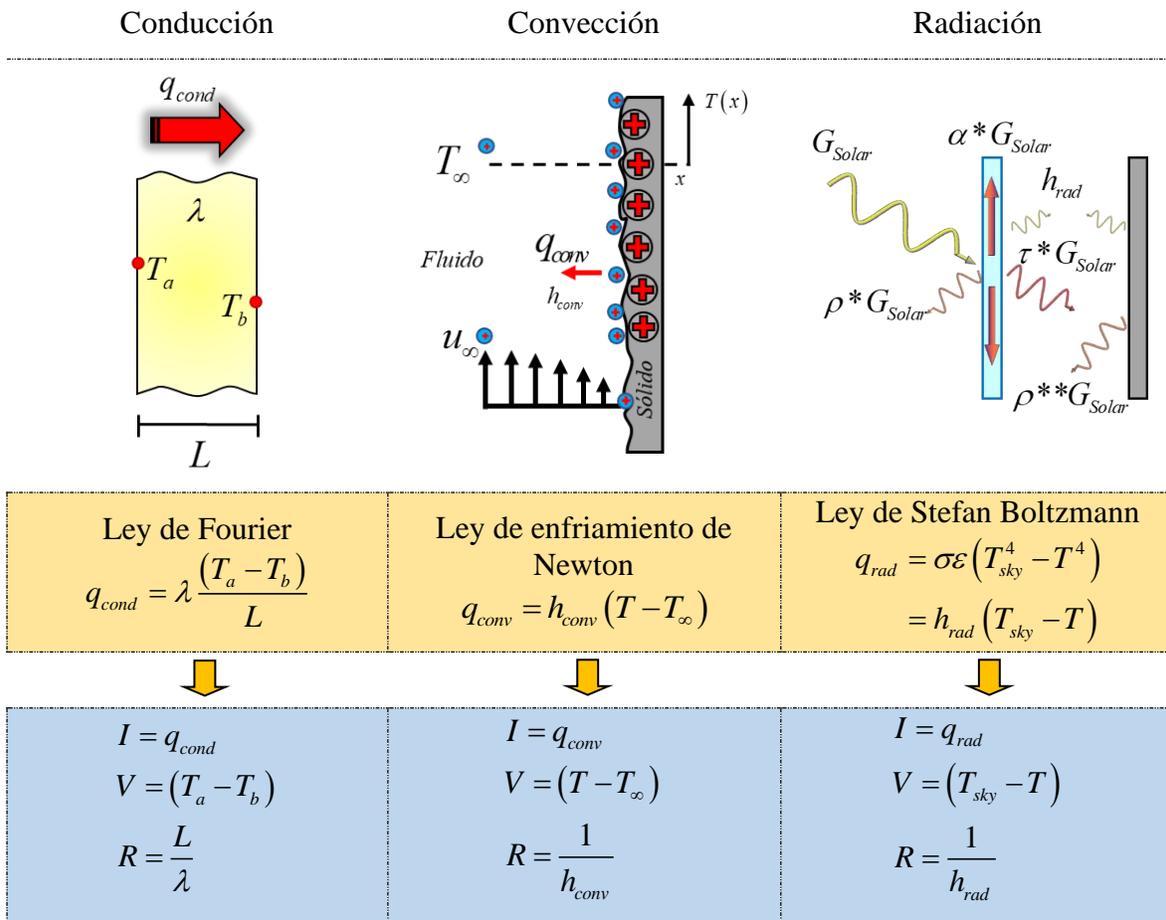


Figura 2.3. Analogía de las relaciones de flux de calor en teoría de circuitos eléctricos

Como se muestra en la Fig. 2.3, cada relación matemática del flux de calor en los tres mecanismos de transferencia de calor se representa como una analogía de la teoría de circuitos eléctricos.

El siguiente aspecto por considerar es la forma de realizar la conexión entre los diferentes elementos. Como se mostró en la Fig. 2.2, cada elemento ya sea sólido o fluido, puede expresarse en términos de una resistencia térmica la cual puede ser conectada en una configuración tipo serie o paralelo. Por lo tanto, es importante definir como se realiza o

plantea el balance. Tomando en cuenta la analogía de circuitos eléctricos, considere el diagrama de la Fig. 2.4.

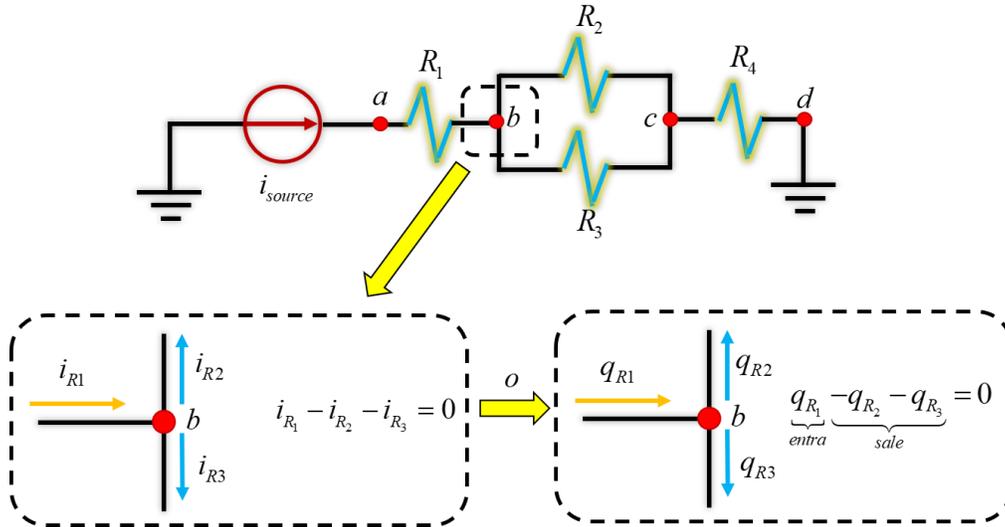


Figura 2.4. Análisis de corriente

La forma de conocer la tensión eléctrica en cada elemento resistivo es mediante un análisis de las corrientes que circulan a través de cada elemento y coinciden sobre los nodos indicados de color rojo. Es aquí donde se aplica la ley de corrientes de Kirchhoff, la cual establece que la suma algebraica de las intensidades de corriente que entran en cualquier nodo es igual a cero. De esta manera se puede establecer una ecuación para cada nodo permitiendo conocer la corriente sobre cada resistencia y al aplicar la ley de Ohm, conocer el valor de la tensión eléctrica. Análogamente se puede realizar el balance de energía, cada ecuación del balance energético se realiza para cada nodo en cuestión, en donde, en lugar de emplear intensidades de corriente en la sumatoria, se sustituyen los flux de energía de cada elemento correspondiente, los cuales están en términos de las temperaturas de cada nodo empleado en el balance. El principio del balance de energía es que el flux de calor que entra es igual al flux de calor que sale (desde un punto de vista estacionario o sin cambios en el tiempo). Posteriormente, al establecer un balance de energía por cada nodo y al agruparlo en un sistema de ecuaciones en una matriz, se implementa un método para la solución del sistema de ecuaciones y así se obtienen los valores de temperatura. Se debe aclarar que las únicas variables a determinar mediante el uso de BE son los valores de temperatura en cada punto de interés. No es posible determinar variables de carácter vectorial como la velocidad del

fluido y conocer el patrón del desplazamiento como en CFD. Por esta razón, es uno de los métodos preferidos para el análisis energético en edificaciones donde solo importan los valores de temperatura para determinar los flujos de calor y eficiencia, sin la necesidad de una base computacional profunda como la requerida en CFD para obtener la solución de los modelos matemáticos.

La suma de resistencias en BE es similar que en teoría de circuitos eléctricos. Por lo tanto, se pueden aplicar las mismas reglas para la sumatoria de elementos resistivos conectados en serie y en paralelo, al igual que considerar que el flux de energía sobre los elementos conectados en serie es el mismo y que este se divide al considerar resistencias en paralelo. En la sección del modelo teórico de la chimenea solar de uno y doble canal se emplean estas condiciones al emplear BE.

A continuación, se presenta una introducción a los materiales de cambio de fase.

2.2. Materiales de cambio de fase (PCM)

La forma de almacenar energía térmica se puede dividir en dos procesos principales: procesos químicos y procesos físicos (Mehling y Cabeza, 2008). Los métodos para el almacenamiento de energía deben ser reversibles, lo cual significa que el calor o energía almacenado debe recuperarse después de un tiempo. Haciendo un enfoque en los procesos físicos, existen dos formas de almacenar energía térmica conocidas como: calor sensible y calor latente.

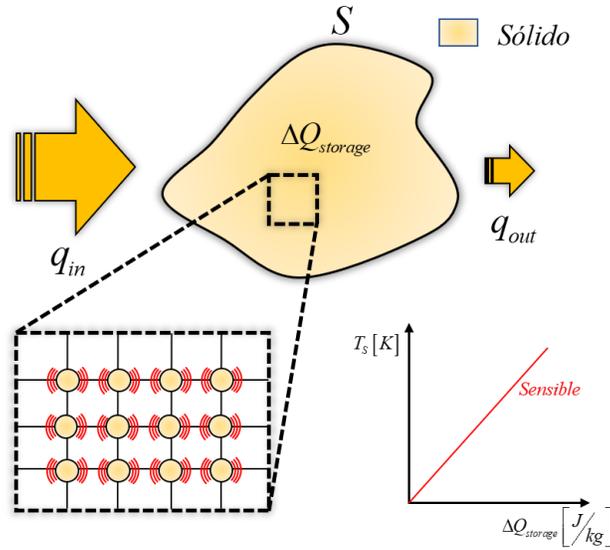


Figura 2.5. Calor sensible

El calor sensible, Fig. 2.5, consiste en un aumento de la temperatura del elemento al almacenar el calor que fue transferido a este. La razón de almacenamiento de energía térmica se conoce como capacidad calorífica C_P [J/kg·K] o, como se conoce en los procesos de transferencia de calor, calor específico. Hablando desde el punto de vista de sistemas pasivos aplicados a edificaciones, este tipo de almacenamiento de energía se puede encontrar en la mayoría de los elementos como los vidrios de las ventanas, techos y muros, ya sean de elemento de placa metálica delgada o masivos como el concreto. En la Fig. 6 se presenta una representación del calor latente.

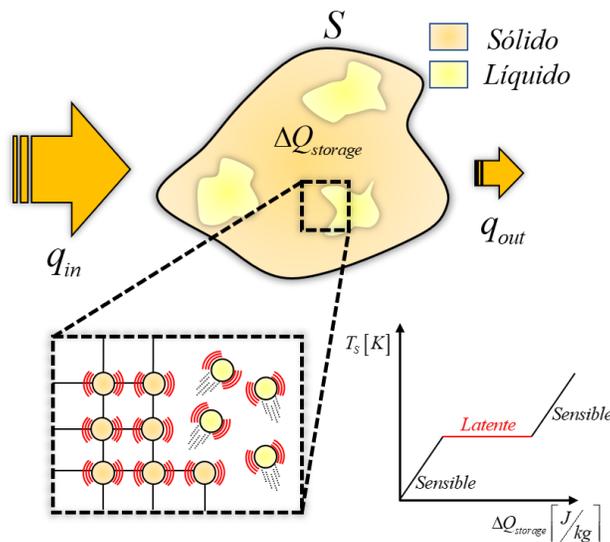


Figura 2.6. Calor latente

En contraste, el calor latente consiste en almacenar energía por medio de los procesos de solidificación, fusión y evaporación, en donde la energía térmica transferida es empleada para que tales procesos ocurran. La forma de conocer en qué punto sucede este proceso es mediante la temperatura de cambio de fase o, dicho de otro modo, ocurre cuando un medio sólido almacena la energía térmica inicialmente en forma de calor sensible elevando su temperatura hasta alcanzar la temperatura de cambio de fase en donde ocurre el fenómeno de fusión. Al alcanzar este punto, durante el proceso de fusión la temperatura del medio se mantiene constante hasta que todo el medio haya cambiado de fase completamente, a partir de aquí la energía almacenada es en forma de calor sensible elevando la temperatura del ahora medio líquido. Suponiendo que después de un tiempo, la temperatura del medio que lo rodea es menor induciendo la transferencia de calor del medio líquido hacia los alrededores, es aquí donde la temperatura desciende hasta la zona en donde ocurre la temperatura de cambio de fase e inicia el proceso de solidificación en donde se libera todo el calor almacenado por el medio.

Los materiales que son adecuados para el almacenamiento de energía por medio del cambio de fase de sólido a líquido son referidos comúnmente como materiales de almacenamiento de calor latente o simplemente como materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés). En la Fig. 2.7, se muestra a detalle el fenómeno antes mencionado.

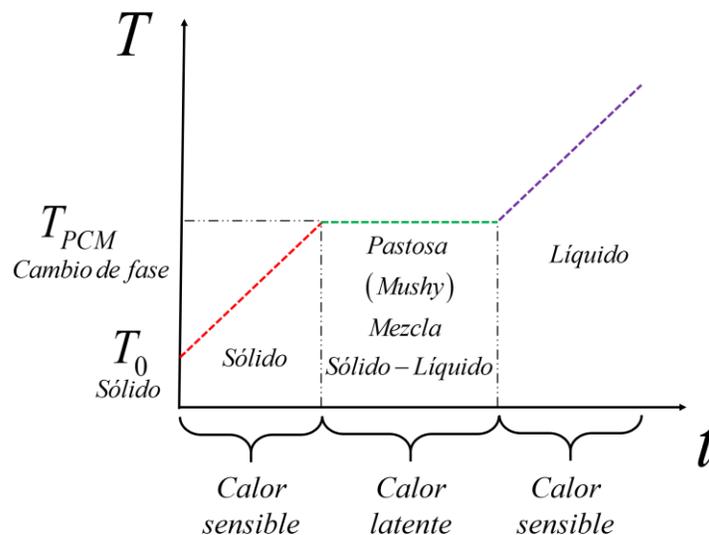


Figura 2.7. Diagrama de PCM

El calor latente empleado durante el proceso de cambio de fase se puede determinar a partir de la diferencia de entalpía h . Entre mayor sea el calor empleado durante el proceso de cambio de fase mayor será la diferencia de entalpía. La selección del material de cambio de fase dependerá de dos criterios: la temperatura de cambio de fase y la entalpía de fusión (**Mehling y Cabeza, 2008**). Sin embargo, esto también dependerá de la disponibilidad del material y la forma de retención o encapsulamiento del material. En cuanto a los tipos de materiales existentes, los materiales de cambio de fase se pueden clasificar en tres clases: orgánicos, inorgánicos, y eutécticos y mezclas (**Kosny 2015**). La Fig. 2.8 muestra el diagrama de la clasificación de los materiales de cambio de fase existentes.

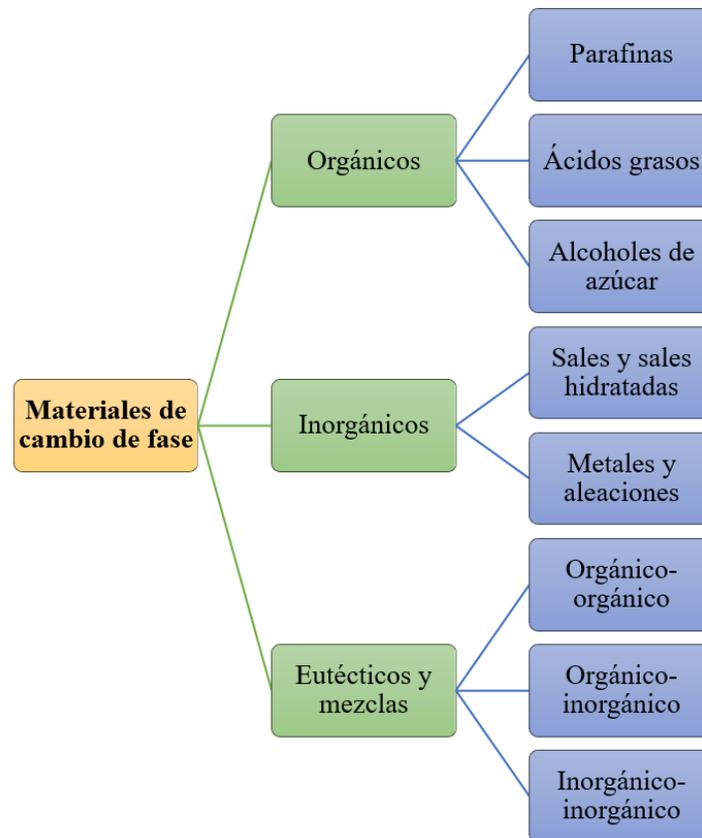


Figura 2.8. Clasificación de PCM

Los PCMs orgánicos se componen de parafinas, ácidos grasos o alcoholes de azúcar. Entre las principales ventajas de emplear PCMs orgánicos se encuentra su capacidad de fusión y solidificación de manera repetitiva sin la degradación de su calor latente de fusión y usualmente no son corrosivos. Además, el proceso de encapsulamiento, así como su envolvente para aplicaciones en edificaciones son simples lo cual facilita su implementación.

En general, el intervalo de su temperatura de fundición se encuentra entre los 6 a 71°C, esto para las parafinas, lo cual los hace adecuados para aplicaciones de edificaciones. En cuanto a las desventajas se encuentra su baja conductividad térmica, su alta flamabilidad y su toxicidad al quemarse, esto para algunos PCM derivados de parafinas, ya que existen materiales basados en grasas animales y vegetales. En cuanto a los costos estos pueden ser bajos, pero depende principalmente del costo de manufactura y producción.

Los PCMs inorgánicos se componen principalmente de sales, sales hidratadas, metales y aleaciones. Su intervalo de temperatura de fusión para estos materiales es amplio y se caracterizan por sus altos niveles de calor latente de fusión. Su conductividad térmica puede llegar a ser al menos del doble de la conductividad de los materiales orgánicos. Además, no representan algún peligro de seguridad ya que los componentes inorgánicos empleados no son inflamables y son ligeramente tóxicos. En cuanto a sus desventajas se encuentra el comportamiento del material al presentarse la fusión, ya que el proceso involucra la hidratación y la deshidratación lo cual hace que la cantidad de agua liberada no sea suficiente para disolver los cristales y esto afecta su desempeño al momento de utilizarse este tipo de materiales. Una segunda desventaja encontrada en estos materiales es su compatibilidad con metales sobre todo al momento de usar estos materiales como contenedores ya que estos PCMs pueden ser altamente corrosivos lo cual afecta su aplicación. En cuanto a su costo estos suelen ser bajos en comparación a otros materiales.

Los PCMS eutécticos son mezclas de dos o más componentes químicos que se solidifican simultáneamente a una temperatura mínima de solidificación. Durante la fusión, todas las mezclas se licuan de manera simultánea. Algunas mezclas de ácidos grasos han mostrado gran factibilidad para aplicaciones en edificaciones, ya que su entalpía de cambio de fase es alta, presentan alta durabilidad y capacidad para impregnarse fácilmente en materiales porosos en comparación a los materiales hechos a base de parafina y sales hidratadas.

El estudio de un PCM ideal puede ser caracterizado matemáticamente mediante cuatro variables escalares: el calor específico de la fase líquida y fase sólida, la entalpía de cambio de fase y la temperatura de fusión. Sin embargo, en la realidad un PCM debe ser representado mediante una función de la entalpía. La determinación precisa de esta función es la meta de una medición calorimétrica de un PCM de calidad. Además, para una correcta caracterización

de un PCM se deben presentar condiciones isotérmicas en la muestra. Es a partir de la caracterización de un PCM real que surge un comportamiento llamado histéresis o histéresis de la temperatura, Fig. 2.9, el cual consiste en una variación de la temperatura del PCM al ocurrir el cambio de fase de líquido a sólido en el que se presenta un efecto de subenfriamiento o super enfriamiento, el cual es una condición en la que el PCM no solidifica inmediatamente cuando la temperatura alcanzada llega al punto de fusión y esta desciende aún más por debajo de ella. Por lo tanto, mientras que no cambie de fase solo se libera energía en forma de calor sensible y solo hasta que descienda más la temperatura y se presente la nucleación es donde se comienza a liberar energía en forma de calor latente.

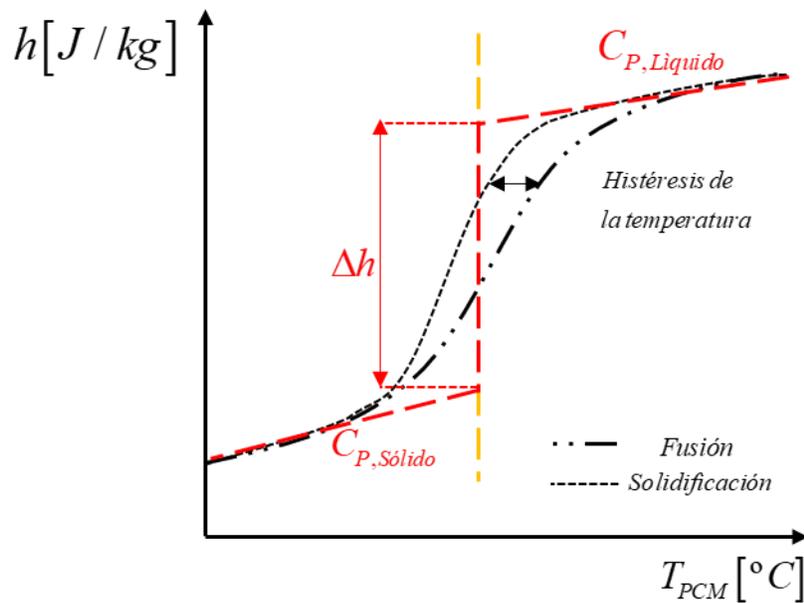


Figura 2.9. Curva de la entalpía mostrando histéresis de la temperatura

Existen dos tipos de nucleación: la nucleación homogénea y la nucleación heterogénea. La nucleación homogénea implica que la generación de los primeros núcleos sólidos ocurre a partir del PCM por sí mismo. En contraste, la nucleación heterogénea implica que esta no inicia en sí mismo por el PCM, ya que puede suceder al añadirse impurezas externas sólidas que funcionan como núcleo o porque se encuentra contenido sólido del PCM entre las grietas del contenedor.

Continuando con las razones detrás de la histéresis, además del subenfriamiento, otras razones por las que surge este fenómeno son que el calor latente del PCM es liberado tan

lentamente durante el enfriamiento, ya sea porque la generación de las estructuras cristalinas o porque el proceso de difusión es lento para homogeneizar la muestra, que la temperatura del PCM desciende por debajo de la temperatura de fusión. Aunque también, un efecto que es pasado por alto es que durante la fusión del PCM los efectos cinéticos son mucho más rápidos para el cambio de fase en comparación a la solidificación.

En cuanto al estudio y aplicación de PCM en elementos de edificaciones, de forma teórica se han desarrollado diferentes modelos matemáticos y metodologías de solución para la modelación del fenómeno de la transferencia de calor por conducción. Entre los cuales se mencionan en la literatura: método de calor ficticio, método de entalpía, método poroso Carman-Kogeny, método de fracción líquida y método de calor específico efectivo. Este último método es reconocido como uno de los métodos más empleados y presentados en la literatura para el análisis de los PCMs.

El método de calor específico efectivo considera el efecto del calor latente como el calor específico dependiente de una temperatura en un intervalo. Por lo tanto, el método se basa en incorporar el fenómeno de cambio de fase en los cálculos del calor específico, de esta manera el calor específico efectivo incluye el efecto del calor latente durante el cambio de fase. A continuación, se presenta el método del calor específico efectivo sobre un modelo matemático que describe la transferencia de calor por conducción en PCM desde un enfoque diferencial, así como su discretización por medio del método de volumen finito.

2.2.1. Método de C_P efectivo - modelo diferencial

El modelo diferencial que representa al fenómeno de transferencia de calor por conducción en estado transitorio se expresa como:

$$\frac{\partial(\rho C_P T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + g \quad \begin{array}{l} 0 < x < Hx \\ 0 < y < Hy \end{array} \quad (2.2)$$

Es importante mencionar que, para la modelación del fenómeno, cuando el medio se encuentra completamente es fase sólida o líquida, se emplea el modelo expresado en la Ec. (2.2). Para determinar en qué fase se encuentra el medio o parte de él se debe conocer su temperatura y, a partir de los datos del PCM implementado, evaluar si se encuentra dentro de

intervalo establecido para el cambio de fase. Por lo tanto, considerando que el modelo se reduce a 2D y se implementa el método de volumen finito para discretizar la ecuación gobernante se obtiene:

$$a_P T_P = a_W T_W + a_E T_E + a_N T_N + a_S T_S + b \quad (2.3)$$

Donde:

$$a_E = \frac{\lambda|_e}{\delta x_{PE}} \Delta y \quad (2.4a)$$

$$a_W = \frac{\lambda|_w}{\delta x_{PW}} \Delta y \quad (2.4b)$$

$$a_N = \frac{\lambda|_n}{\delta x_{PN}} \Delta x \quad (2.4c)$$

$$a_S = \frac{\lambda|_s}{\delta x_{PS}} \Delta x \quad (2.4d)$$

$$a_P = a_W + a_E + a_N + a_S + \rho C_P \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (2.4e)$$

$$b = g \Delta x \Delta y + \rho^0 C_P^0 \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} T_P^0 \quad (2.4f)$$

La Ec. (2.3) corresponde al fenómeno de transferencia de calor por conducción en un medio sólido o líquido y, aunque en este último el desplazamiento del fluido debido a la convección de calor se pasa por alto, para las aplicaciones de energía en edificaciones es adecuado en cuanto a precisión de la estimación del fenómeno y tiempo de cómputo en comparación con una modelación más completa considerando el desplazamiento del fluido. A continuación, se presenta el modelo matemático correspondiente a la conducción de calor cuando ocurre el proceso de cambio de fase por medio del método de C_P efectivo:

$$\rho \left[\frac{\partial (C_p T)}{\partial t} + h_{liq-sol} \frac{\partial f_{liq}}{\partial t} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + g \quad \begin{array}{l} 0 < x < Hx \\ 0 < y < Hy \end{array} \quad (2.5)$$

La principal diferencia entre las Ecs. (2.2) y (2.5) se encuentra en el término transitorio, en el que se expresa el término de la entalpía de cambio de fase factor de la parcial de la fracción líquida con respecto al tiempo; el primer término de lado izquierdo de la igualdad representa la acumulación de energía por calor sensible, mientras que el segundo termino representa la acumulación de energía por calor latente debido al cambio de fase. Sin embargo, antes de proceder a realizar la discretización por medio de volumen finito de esta ecuación, se procede a realizar un tratamiento al término de fracción líquida f_{liq} (**Morgan et al., 1978; Swaminathan y Voller, 1993**), ya que en la literatura este término se define como:

$$f_{liq} = \left(\frac{T - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}} \right)^m \quad \begin{array}{l} m = 1 \text{ lineal} \\ m = 2 \\ m = \dots \end{array} \quad (2.6)$$

La Ec. (2.6) define este término como la razón entre las diferencias de temperatura entre el medio y la temperatura de fase sólida y la diferencia entre fase líquida y sólida. Este término puede expresarse como un término lineal si $m=1$, aunque este término puede cambiarse por una mayor potencia se debe de considerar el hecho de incluir un efecto de “no linealidad” adicional debido a que el problema en sí ya considera a las propiedades del medio dependientes de la temperatura, lo cual puede generar problemas de convergencia de la solución numérica. El término f_{liq} debe tener siempre valores entre cero y la unidad ($0 \leq f_{liq} \leq 1$). Para este caso, se considera un modelo lineal, por lo tanto, continuando con el desarrollo del término transitorio aplicando la regla de la cadena:

$$\frac{\partial f_{liq}}{\partial t} = \frac{\partial f_{liq}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.7)$$

Sustituyendo en la Ec. (2.5):

$$\rho \left[C_P \frac{\partial T}{\partial t} + h_{liq-sol} \frac{\partial f_{liq}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + g \quad (2.8)$$

$$\rho \left[C_P + h_{liq-sol} \frac{\partial f_{liq}}{\partial T} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + g \quad (2.9)$$

Para obtener una expresión cuya variable dependiente sea solamente la temperatura, se parte de la definición de fracción líquida y se aplica la derivada sobre la equivalencia correspondiente:

$$f_{liq} = \frac{T - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}} = \frac{T - T_{sol}}{\Delta T} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial f_{liq}}{\partial T} = \frac{1}{T_{liq} - T_{sol}} = \frac{1}{\Delta T} \quad (2.11)$$

Sustituyendo en la Ec. (2.9):

$$\rho \left[C_P \frac{\partial T}{\partial t} + h_{liq-sol} \frac{1}{\Delta T} \frac{\partial T}{\partial t} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + g \quad (2.12)$$

Agrupando los términos correspondientes a la derivada parcial en el tiempo:

$$\rho \left[\underbrace{C_P + \frac{h_{liq-sol}}{\Delta T}}_{C_{P-efect}} \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + g \quad (2.13)$$

Surge el término de C_P Efectivo o $C_{P-efect}$ como se muestra en los siguientes desarrollos del modelo general. Este nuevo término engloba el calor latente para el cambio de fase descrito anteriormente. Sin embargo, desarrollando a fondo los términos correspondientes de $C_{P-efect}$:

$$\begin{aligned}
 C_{P-efect} &= C_P + \frac{h_{fs}}{\Delta T} \\
 &= \frac{C_{P-sol} + C_{P-liq}}{2} + \frac{h_{fs}}{\Delta T}
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

Por lo tanto, presentando una definición del calor específico efectivo para cada periodo de cambio de fase:

$$C_{P-efect} = \begin{cases} C_{P-sol} & T < T_{sol} \\ \frac{C_{P-sol} + C_{P-liq}}{2} + \frac{h_{fs}}{\Delta T} & T_{sol} \leq T \leq T_{liq} \\ C_{P-liq} & T > T_{liq} \end{cases}
 \tag{2.15}$$

Una característica importante en la Ec. (2.14) en comparación al comportamiento de la temperatura de cambio de fase mostrada en la Fig. 2.7, es que el cociente de la entalpía de cambio de fase requiere una diferencia de temperatura diferente de cero. Ya que el método asocia el proceso de cambio de fase a un intervalo de temperatura definido para cada material. Por lo tanto, para evitar problemas con el modelo se debe considerar un pequeño intervalo de cambio de fase cuando se aborde el análisis considerando materiales puros en los cuales el cambio de fase ocurre solamente a una temperatura en específico. De esta manera el diagrama del comportamiento del PCM considerando materiales homogéneos se presenta en la Fig. 2.10.

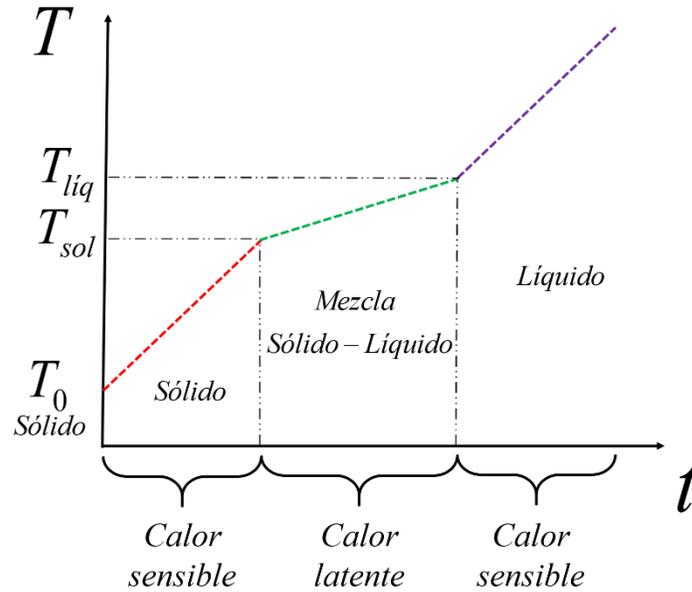


Figura 2.10. Diagrama de PCM para materiales reales

En cuanto al valor que se debe considerar en el ΔT al evaluar materiales con un valor único de temperatura de cambio de fase, en la literatura se recomienda hacer una evaluación en conjunto con el paso del tiempo, ya que una correcta selección de ambos parámetros permite obtener una buena aproximación numérica con respecto a las soluciones analíticas, tal como el trabajo de **Morgan et al. (1978)** en donde se evaluó el modelo matemático considerando tres diferentes valores de ΔT (0.5, 1.0 y 2.0) para un intervalo de tiempo de 0.01 y 0.05s.

Continuando con la discretización del modelo de conducción de calor durante el proceso de cambio de fase, a continuación, se presenta la ecuación gobernante discretizada implementando el método de volumen finito con un enfoque implícito para el tratamiento del término temporal.

$$\begin{aligned}
& \left[\underbrace{\frac{\lambda|_e}{\delta x_{PE}} \Delta y + \frac{\lambda|_w}{\delta x_{PW}} \Delta y + \frac{\lambda|_n}{\delta x_{PN}} \Delta x + \frac{\lambda|_s}{\delta x_{PS}} \Delta x + \left(\rho C_{P-efect} \right) \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t}}_{a_p} \right] T_P = \\
& \underbrace{\frac{\lambda|_e}{\delta x_{PE}} \Delta y T_E}_{a_E} + \underbrace{\frac{\lambda|_w}{\delta x_{PW}} \Delta y T_E}_{a_W} + \underbrace{\frac{\lambda|_n}{\delta x_{PN}} \Delta x T_N}_{a_N} + \underbrace{\frac{\lambda|_s}{\delta x_{PS}} \Delta x T_s}_{a_S} \quad (2.16) \\
& + \underbrace{g \Delta x \Delta y + \left(\rho C_{P-efect} \right) \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t}}_b T_P^0
\end{aligned}$$

Observando a detalle la Ec. (2.16) las propiedades, así como el $C_{P-efect}$ quedan agrupados de la misma forma que en las Ecs, (2.3) y (2.4), por lo tanto, al momento de implementar el algoritmo de solución, todo se resume a un problema de propiedades variables. De esta manera, en la Tabla 2.1 se agrupan las propiedades y sus equivalencias de acuerdo con los posibles escenarios durante la transferencia de calor por conducción de acuerdo con el método C_P Efectivo.

Tabla 2.1. Propiedades del sistema para cada fase

Solido si $T < T_{sol}$	Mezcla $T_{sol} < T < T_{liq}$	Líquido si $T > T_{liq}$
$\rho(i, j) = \rho_{sol}$	$\rho(i, j) = \frac{(\rho_{sol} + \rho_{liq})}{2}$	$\rho(i, j) = \rho_{liq}$
$\lambda(i, j) = \lambda_{sol}$	$\lambda(i, j) = \frac{(\lambda_{sol} + \lambda_{liq})}{2}$	$\lambda(i, j) = \lambda_{liq}$
$C_{P-efect}(i, j) = C_{P-sol}$	$C_{P-efect}(i, j) = \frac{C_{P-sol} + C_{P-liq}}{2} + \frac{h_{ls}}{\Delta T}$	$C_{P-efect}(i, j) = C_{P-liq}$

La Ec. (2.16) corresponde al resultado final de la discretización del modelo diferencial de la transferencia de calor por conducción con materiales de cambio de fase. Mas adelante y conforme al planteamiento de los modelos de la chimenea solar un canal y dos canales, se presenta el desarrollo de los BE para la configuración a evaluar en este trabajo incorporando PCM. El siguiente capítulo corresponde al desarrollo experimental de este trabajo y posteriormente el desarrollo de los modelos teóricos de chimeneas solares.

CAPÍTULO 3

CHIMENEA SOLAR EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta el proceso de diseño, construcción y evaluación funcionamiento de un prototipo de ChSo-OC dentro de las instalaciones del departamento de Ingeniería Mecánica, del Tecnológico Nacional de México campus Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET).

3.1. Metodología general

El desarrollo del prototipo experimental de ChSo-OC consta de tres fases: diseño, construcción y evaluación. En la Fig. 3.1, se presentan estas tres etapas con una breve descripción de las actividades que comprenden cada una de ellas:

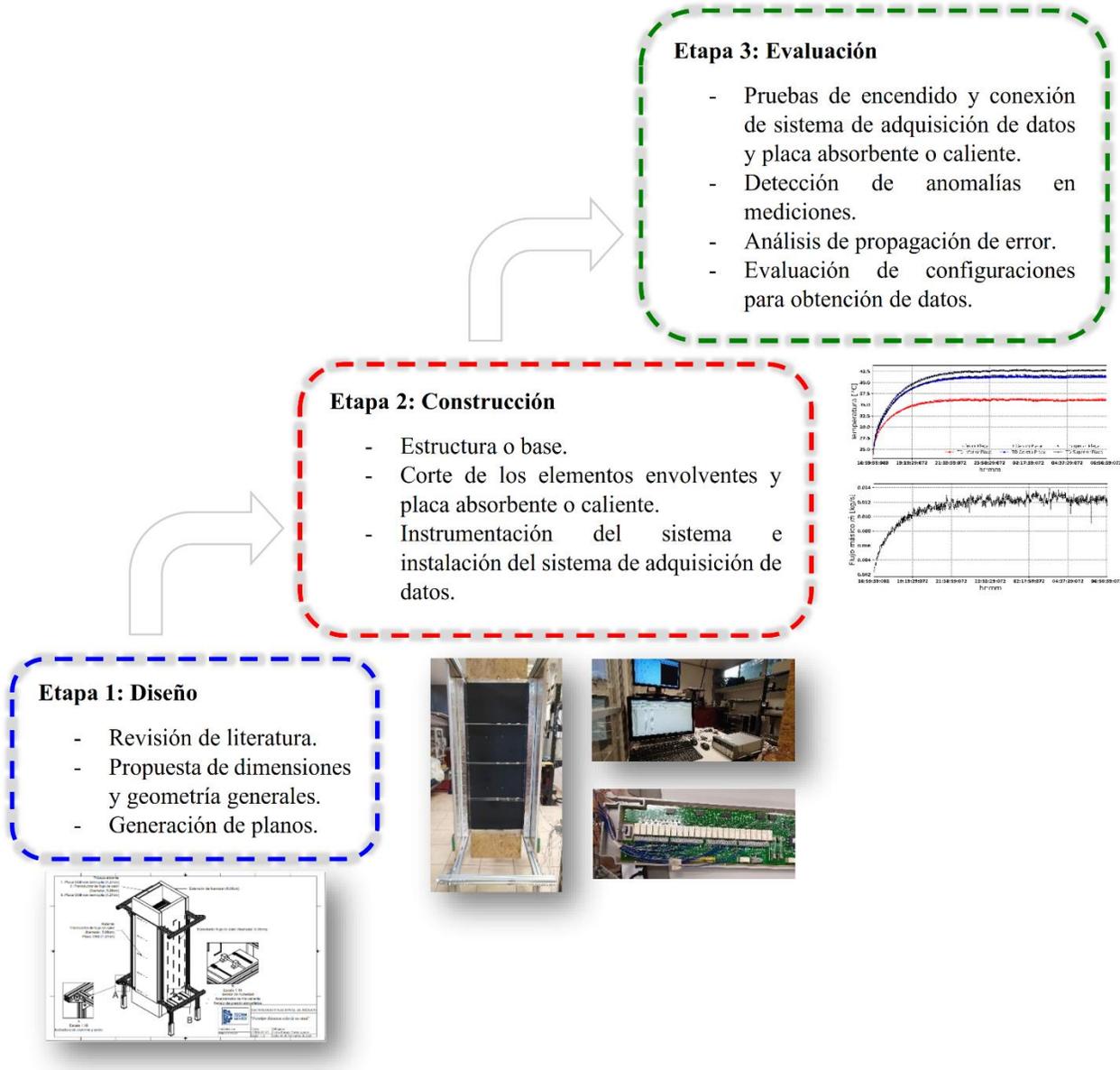


Figura 3.1. Metodología general

En las siguientes secciones se realiza una descripción detallada de cada etapa para el desarrollo del prototipo de ChSo-OC.

3.2.Etapa 1: Diseño

En esta sección se muestra la propuesta de un nuevo diseño de ChSo-OC.

3.2.1. Dimensiones y geometría general

Al observar y analizar la versión del prototipo de chimenea solar de doble canal existente en conjunto con la revisión de la literatura se delimitaron las condiciones necesarias para el desarrollo y evaluación de un nuevo prototipo de ChSo-OC. Se empleó la misma estructura metálica del prototipo orinal, de tal manera que las dimensiones de la superficie de contacto de la placa absorbente o caliente con el fluido del canal son de 1.22×0.46 m. La razón por la cual no se modificaron estas dimensiones se debe a que uno de los intereses de estudiar un prototipo de chimenea solar es estudiar un sistema de dimensiones similares a los de una aplicación real. Además, las nuevas consideraciones del modelo incluyen extensiones a la entrada y salida de la chimenea, por lo que la nueva altura total, así como su amplitud, se encuentran en los límites del espacio de trabajo donde se consideró establecer el prototipo para la realización de las pruebas a flujo de calor constante.

La altura de las extensiones se consideró como máximo 0.23m a la entrada y a la salida del canal. El material empleado es foamular o poliestireno extendido de 5.08 m y madera de la placa de OSB de 0.0127 m.

En comparación al prototipo anterior, para esta nueva versión de un solo canal se consideró implementar aislantes térmicos detrás de la cubierta de vidrio y un arreglo de tres capas de madera-foamular-madera posterior a la placa absorbente, para reducir el flujo de calor al exterior y, de esta manera, que la mayor parte de la energía suministrada sea aprovechada en el calentamiento del fluido.

En la Fig. 3.2 se presenta una comparación del esquema general del prototipo anterior de chimenea solar de doble canal con respecto al nuevo diseño de prototipo de chimenea solar de un solo canal.

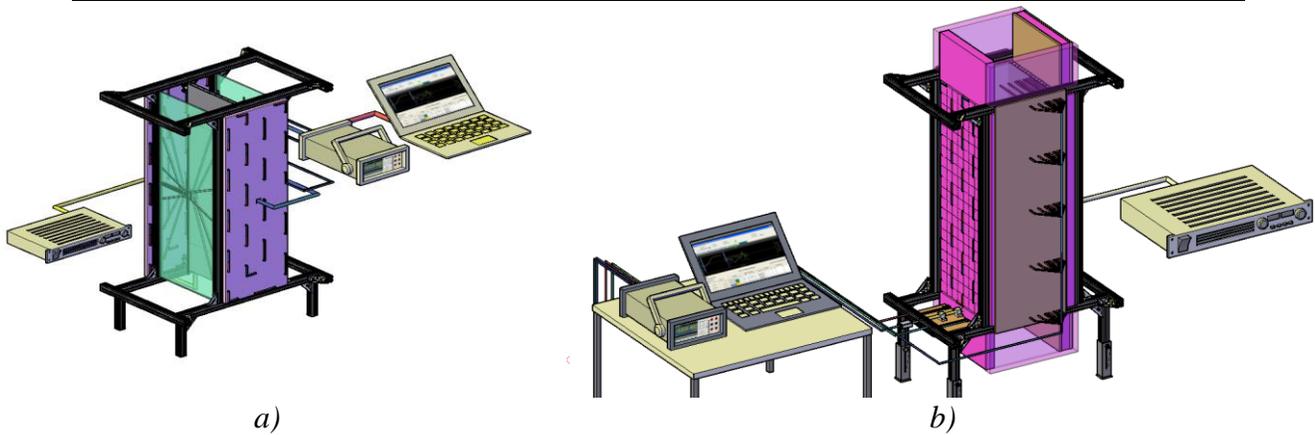


Figura 3.2. Esquema general de prototipos de chimenea solar: a) chimenea solar de doble canal anterior, b) nueva ChSo-OC

El nuevo diseño en general excede las dimensiones originales con el fin de evaluar mejor el fenómeno de la transferencia de calor presente en estos sistemas, lo cual permite aportar los datos necesarios para una futura validación de modelos teóricos. Los detalles del sistema de adquisición de datos e instrumentación se presentan más adelante.

3.3. Etapa 2: Construcción

En esta sección se describe el proceso de construcción e instrumentación para la evaluación del prototipo de ChSo-OC. Finalmente, se presenta un esquema general del sistema completo incluyendo el sistema de adquisición de datos.

3.3.1. Estructura o base

En la sección anterior se hizo la mención sobre el uso de la estructura o base original de la chimenea solar de doble canal y sobre la implementación de una extensión en las zancas, esto con el fin de aumentar su altura y brindar mayor espacio para la succión del aire con las nuevas extensiones del canal de aire. En la Fig. 3.3 se presenta parte del procedimiento de construcción e implementación:



Figura 3.3. Extensiones de zancas

El uso de tornillería como límite para las extensiones de las zancas permite variar la altura, ya que en un principio se consideró la variación de diferentes alturas para evaluar diferentes extensiones de canal de aire. Aunque al momento de su aplicación se instaló a la máxima altura disponible ya que por el momento el estudio de diferentes alturas de extensiones no es prioridad.

La forma final de la estructura completa con las extensiones de las zancas se muestra en la Fig. 3.4 comparando una imagen del diseño en dibujo asistido por computadora desde una perspectiva isométrica.



Figura 3.4. Estructura final

A excepción de los ángulos de unión y las extensiones de las zancas de acero, el resto de la estructura es de aluminio, lo cual le da el color plateado mate ideal. La rigidez de la estructura permite soportar el peso de todos los elementos sin problema alguno, además que se conserva el nivel con respecto al suelo a lo largo de toda la estructura para evitar problemas de instalación de los paneles envolventes.

3.3.2. Elementos envolventes y placa absorbente

Los materiales empleados como envolventes fueron placas de poliestireno expandido de 5.08 cm (2 pulgadas) y madera OSB de 1.27 cm de espesor (1/2 pulgada). Como placa paralela a la placa absorbente se adhirió una cubierta de vidrio sobre una placa de aislante de poliestireno con el fin de proveer una superficie lisa tal como en las aplicaciones reales de chimeneas solares. En la Fig. 3.5 se presentan las dimensiones desde la vista lateral de las placas de OSB y poliestireno expandido que conforman el canal.



a)

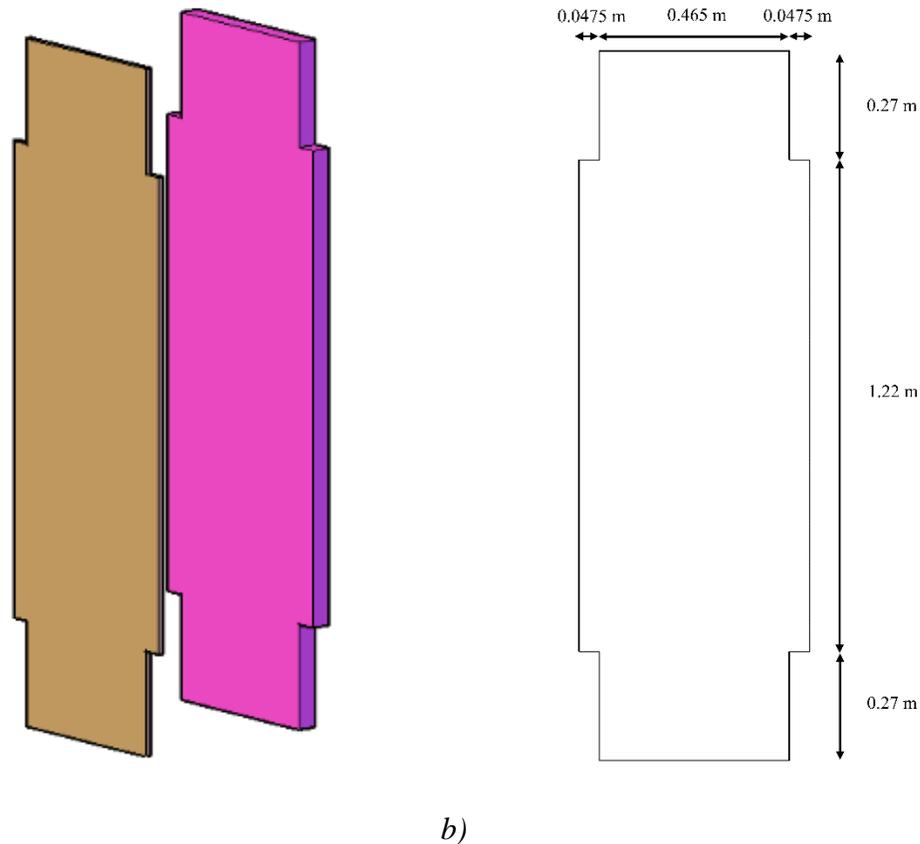


Figura 3.5. Dimensiones placas de poliestireno expandido y madera OSB: a) fotografía de construcción, b) dibujo asistido por computadora

Las imágenes mostradas en la Fig. 3.5, corresponden a la preparación de las placas de la configuración madera-foamular-madera que se colocó en la parte posterior a la placa absorbente o caliente para reducir la transferencia de calor con el exterior. Una placa adicional de estas dimensiones se preparó como base principal de la cubierta de vidrio además de la función de aislante para reducir las pérdidas radiativas con el exterior, Fig. 3.5(a). La cubierta de vidrio fue adherida con el arreglo de sensores correspondientes para evitar daños durante la instalación. Los detalles de la instrumentación se presentan más adelante.

Con el fin de reducir las pérdidas de energía por los costados del prototipo, se prepararon diferentes configuraciones de placa de poliestireno expandido en conjunto con placa de madera OSB. Al plantearse los casos de estudios hasta espesores de 0.2 m como valor máximo, las placas de OSB se construyeron con las dimensiones de $1.31 \times 0.3 \text{ m}^2$. Además,

fueron forrados por la superficie interna al canal con papel aluminio tal como se muestra en la Fig. 3.6(a). En cuanto al segundo nivel de aislamiento elaborado con poliestireno expandido, Fig. 3.6(b), se construyeron las placas a la medida para tres diferentes espesores del canal: 0.1 m, 0.15 m y 0.2 m. Estas placas fueron instrumentadas como transductores de flujo calor para cuantificar la perdida por lo costados del canal y forradas finalmente de papel aluminio para aumentar la reflectancia en la superficie adyacente al canal.



Figura 3.6. Aislantes en los costados: a) corte de madera, b) poliestireno expandido

Debido a las dificultades observadas con el prototipo original de chimenea solar de doble canal, falta de rigidez en la superficie de la placa absorbente, para este nuevo diseño se optó

por fijar la placa absorbente a la placa de madera de la triple capa de aislante. De esta manera, se facilita el montaje y la nivelación con respecto al suelo para proveer una superficie completamente vertical. El montaje se presenta en la Fig. 3.7.



Figura 3.7. Montaje de placa absorbente

Aunque aún no se establecen los detalles para la instrumentación del prototipo de chimenea solar, en la Fig. 3.8 se muestra el armado de la chimenea sobre la estructura de aluminio.





Figura 3.8. Armado de la chimenea solar con envoltentes desarrolladas

3.3.3. Instrumentación y sistema de adquisición de datos

El proceso de instrumentación y la instalación del sistema de adquisición de datos son las partes cruciales del estudio experimental. Para la instrumentación del prototipo de ChSo-OC se empleó extensión de termopar tipo “T” calibre 30 SLE (Límite Especial de Error, por sus siglas en inglés) para la construcción de los sensores de temperatura puntual, arreglos de termopila y transductores de flujo de calor que se presentan más adelante. La velocidad del aire a la entrada del canal se midió a través de un anemómetro de hilo caliente de intervalo de medición de 0.0-2.5 m/s modelo FMA901R-MA. Para la medición de la presión atmosférica se empleó un sensor digital BMP180 mientras que para la humedad relativa se empleó un sensor analógico AMT1001. En la Fig. 3.9 se muestra los sensores empleados.



a)



b)



Figura 3.9. Sensores empleados: a) extensión termopar tipo “T”, b) anemómetro de hilo caliente, c) BMP180, d) AMT1001

La información acerca de las incertidumbres extendidas de cada dispositivo y sensor se presentan más adelante en el análisis de propagación de error. En esta sección solo se describe el proceso de implementación en el prototipo de ChSo-OC.

En la Fig. 3.10 se presenta un esquema general de los sensores implementados en todo el prototipo experimental de la ChSo-OC.

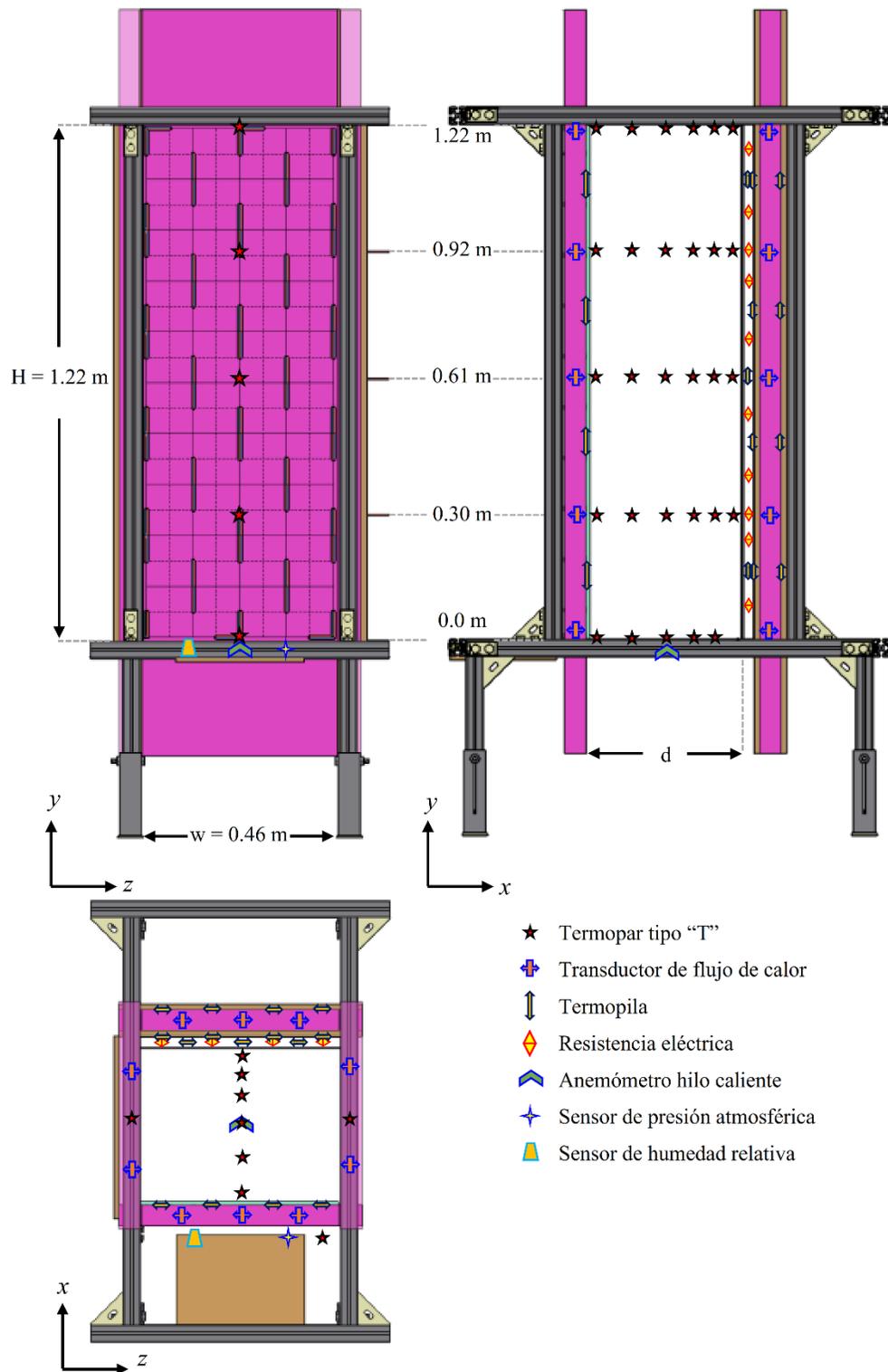


Figura 3.10. Esquema general de sensores implementados en el prototipo experimental

Como se muestra en la Fig. 3.10, los únicos sensores que no forman parte de las envolventes o se encuentran al interior del canal de aire son el sensor digital de presión atmosférica (BM180), el sensor analógico de humedad relativa (AMT1001) y un sensor puntal de temperatura (termopar tipo “T”). La razón detrás de esta decisión es que es de interés la medición de las condiciones ambientales del laboratorio donde se encuentra el prototipo de chimenea solar. *Además, con base en la revisión de la literatura, la medición de estos parámetros suele omitirse sobre todo en la medición de la humedad relativa y la presión atmosférica en la habitación, las cuales son cruciales para el desarrollo de relaciones empíricas de coeficientes convectivos y propiedades del fluido de trabajo, en este caso aire.*

En cuanto a la posición de los sensores que no forman parte del prototipo experimental (temperatura, humedad relativa y presión atmosférica), se ubicaron a la misma altura de la entrada de la chimenea sobre la base que soporta a la sonda del anemómetro de hilo caliente, ya que no se consideró adecuado colocarlos dentro del canal debido a su geometría y dimensiones las cuales afectan el patrón de flujo de aire. *Un posible estudio a futuro es incluir sensores menos invasivos al interior del canal, con el fin de mejorar la medición de las variables que intervienen en el fenómeno físico al interior del canal de la chimenea solar.*

En la Fig. 3.10 se muestra la cantidad de sensores de temperatura distribuidos al interior del canal del aire, los cuales se ubicaron justo al centro del canal sobre el eje x . La separación de estos sensores con respecto a la placa absorbente no se especifica ya que se modifica para cada configuración de espesor del canal de aire a estudiar. Más adelante se mostrará la nomenclatura de cada uno de estos sensores los cuales son asociados a sus respectivas posiciones de acuerdo con la configuración del espesor.

Los primeros elementos sobre los que se comenzó la etapa de instrumentación fueron los transductores de flujo calor del aislante de la cubierta de vidrio y el transductor de la triple capa de aislantes madera-foamular-madera. El desarrollo de un transductor de flujo de calor consiste en un arreglo de termopares tipo “T” conectados en serie, en el que las puntas son colocadas de tal manera que cruzan el elemento sobre el cual se desea realizar la medición. Los termopares son configuraciones de dos cables de diferente polaridad que producen una tensión eléctrica o FEM termoeléctrica entre sus puntas al existir una diferencia de

temperaturas. Este fenómeno se conoce como efecto Seebeck o efecto termoeléctrico, Fig. 3.11.

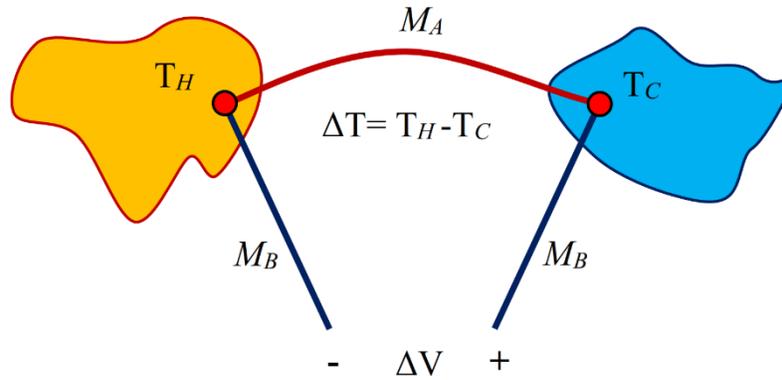


Figura 3.11. Efecto Seebeck o termoeléctrico

Como se describió anteriormente, los termopares se componen de dos materiales termoeléctricos que actúan bajo el efecto termoeléctrico al encontrarse ambas puntas a diferentes temperaturas. Los termopares tipo “T” empleados para el prototipo de chimenea solar se componen de un cable conductor de cobre y otro de constantán (aleación cobre 45% - níquel) con un intervalo de medición de -200° a 370° C con una incertidumbre extendida de $\pm 0.5^{\circ}$ C (ASTM E 230). Estos termopares se clasifican con las siglas SLE que indican que los materiales de fabricación alcanzan un nivel de homogenización que evita que temperaturas intermedias en el elemento conductor afecten la medición.

Por lo tanto, al implementar una serie de conexiones en serie de diferentes puntas de termopar, conectado cobre con constantán y viceversa, se estableció un arreglo que permite cuantificar la diferencia de temperaturas entre ambas caras del elemento empleado como transductor, en este caso las placas de foamular. De tal manera que, *al extender el arreglo de manera ordenada y distribuida sobre toda la superficie, se obtiene una medición promedio de la diferencia de temperaturas total de ambas caras y al conocer el valor de la conductividad térmica de acuerdo con la norma ASTM C 578-01, el espesor del elemento y el área de interés, se estima el flujo de calor que pasa a través del elemento.*

Entre más puntas se agreguen a la conexión en serie mayor cobertura se obtiene en la medición de la diferencia de temperaturas entre superficies. Para las placas de foamular o poliestireno extruido, se agregaron 54 puntas en toda el área central de $1.22 \times 0.46 \text{ m}^2$. La distancia entre las puntas y la distribución de conexión considerados se presentan en la Fig. 3.12.

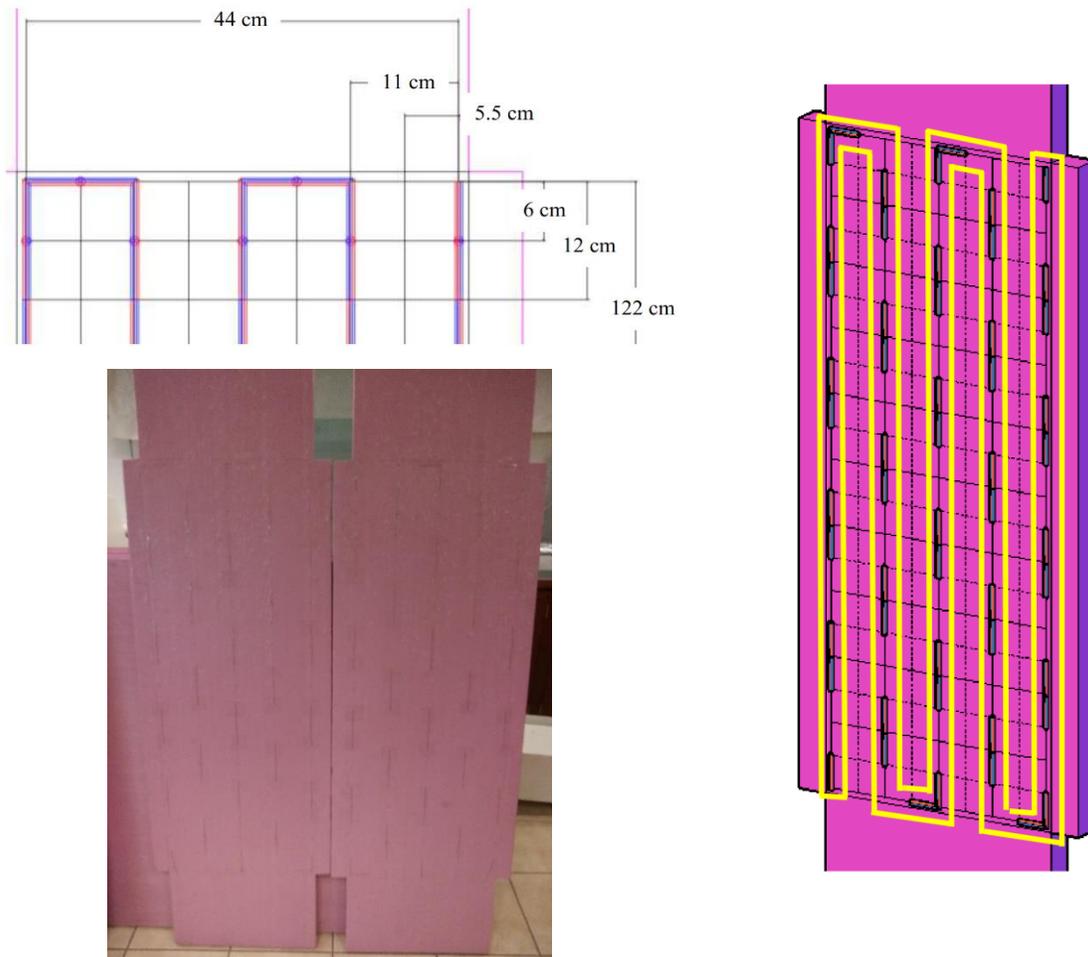


Figura 3.12. Conexión y distribución de puntas para el transductor de flujo de calor

La conductividad térmica empleada para estimar el flujo de calor a través del transductor se obtuvo a partir de un ajuste de los datos presentados por la norma ASTM C 578-01 para aislantes térmicos de poliestireno extruido. Los datos consisten en tres pares de juegos de datos donde se especifica la temperatura de referencia y la conductividad térmica

correspondiente. A pesar de que la variación es pequeña es importante considerar que cualquier variación debe ser cuantificada para una mejor estimación de los flujos de calor que crucen los elementos del prototipo de chimenea solar.

Se construyeron dos arreglos para dos placas de poliestireno de 54 puntas cada una: para la placa de aislante del arreglo de tres capas y para la placa de aislante que es soporte de la cubierta de vidrio. Los nombres con los que se refieren a estos sensores para la conexión al sistema de adquisición de datos son: DFA (Diferencial Foamular Aislante) para el transductor de la triple capa de aislante, y TDCV (Temperatura Diferencial Cubierta de Vidrio) para el transductor que soporta la cubierta de vidrio. Con respecto a la temperatura de referencia para la estimación del flujo de calor en ambos transductores, se emplearon los valores de las temperaturas promedio de las termopilas que están en contacto con la superficie de ambos elementos, ya que tanto la cubierta de vidrio como la placa de madera OSB de la triple capa de aislante, cuentan con un arreglo de termopila para medir la temperatura promedio en toda la superficie de contacto.

Las termopilas son arreglos similares de conexión de termopares en serie, que permiten obtener una medición promedio de la temperatura de superficie del elemento de estudio. En este caso, las puntas de tal arreglo se adhieren a la superficie de estudio tomando en cuenta siempre una zona de referencia. De esta manera, se puede obtener una medición promedio sin la necesidad de requerir un número determinado de sensores individuales. Estos arreglos de termopila se emplearon sobre las superficies de las placas de madera de la triple capa de aislante posterior a la placa absorbente y en la superficie de la cubierta de vidrio que se encuentra en contacto con el transductor de flujo de calor. En la Fig. 3.13 se muestra el arreglo de termopila empleado en los elementos mencionados, su distribución y la zona de referencia para la temperatura promedio.

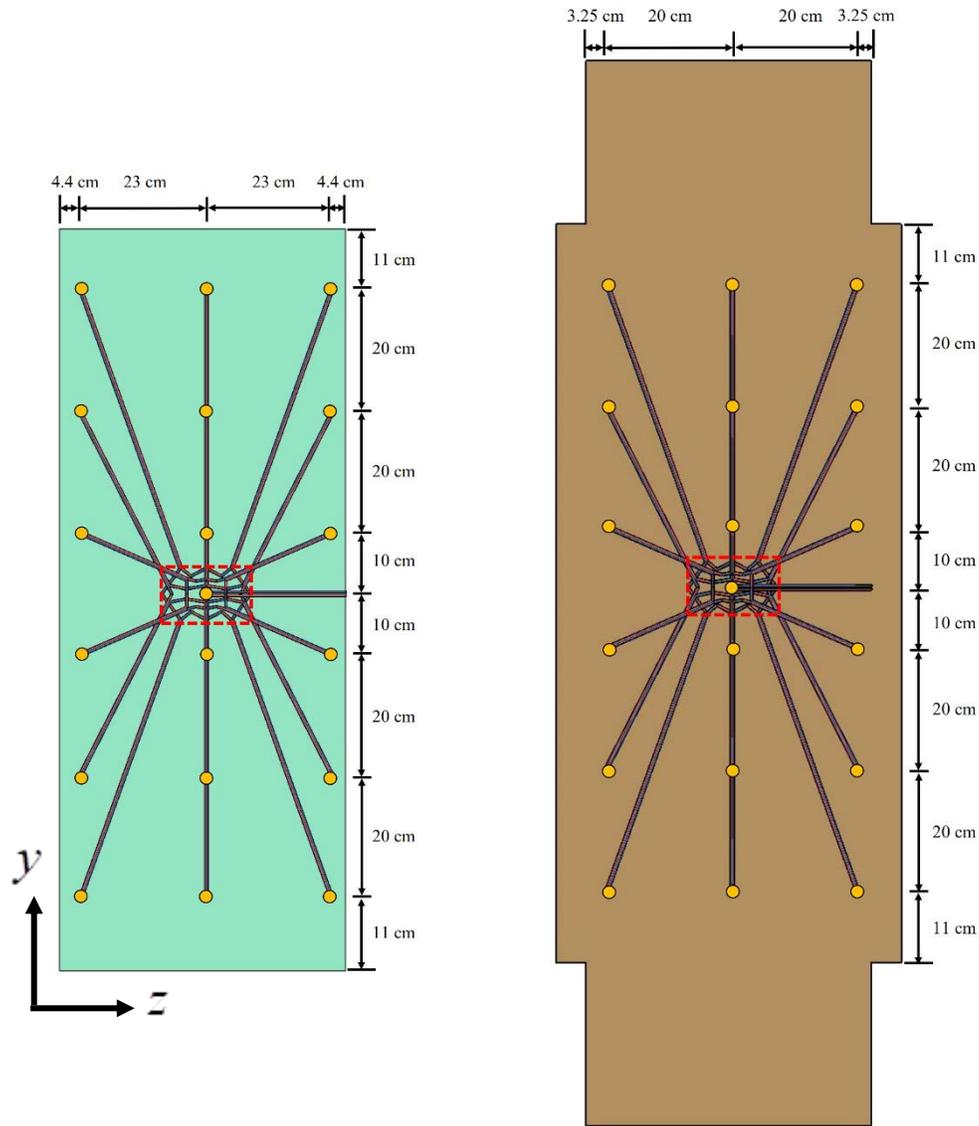


Figura 3.13. Arreglo de termopila en cubierta de vidrio y placas OSB

El número de puntas empleado en los arreglos de termopila fue de 18, Fig. 3.13. Todas las puntas se referenciaron con respecto al centro dentro de un área de $0.1 \times 0.1 \text{ m}^2$. La temperatura de referencia del centro se midió a través de un sensor individual de temperatura empleando termopar tipo “T”. Los nombres con los que se refieren a los sensores de la cubierta de vidrio son: TDV (Temperatura Diferencia Vidrio) para el arreglo de termopila y TCV (Temperatura Centro Vidrio) para la medición de referencia. Los nombres de los sensores para las placas OSB son: TDFM (Temperatura Diferencial Foamular Madera) para

el arreglo de termopila, TCFM (Temperatura Centro Foamular Madera) para la medición de referencia, TDMP (Temperatura Diferencial Madera Placa) para el arreglo de termopila y TCMP (Temperatura Centro Madera Placa) para la medición de referencia A diferencia de los arreglos de termopila de la cubierta de vidrio y la placa OSB, para la medición de la temperatura al interior de la placa absorbente se añadieron tres arreglos de termopila, así como sensores puntuales. En la Fig. 3.14 se presenta la configuración implementada.

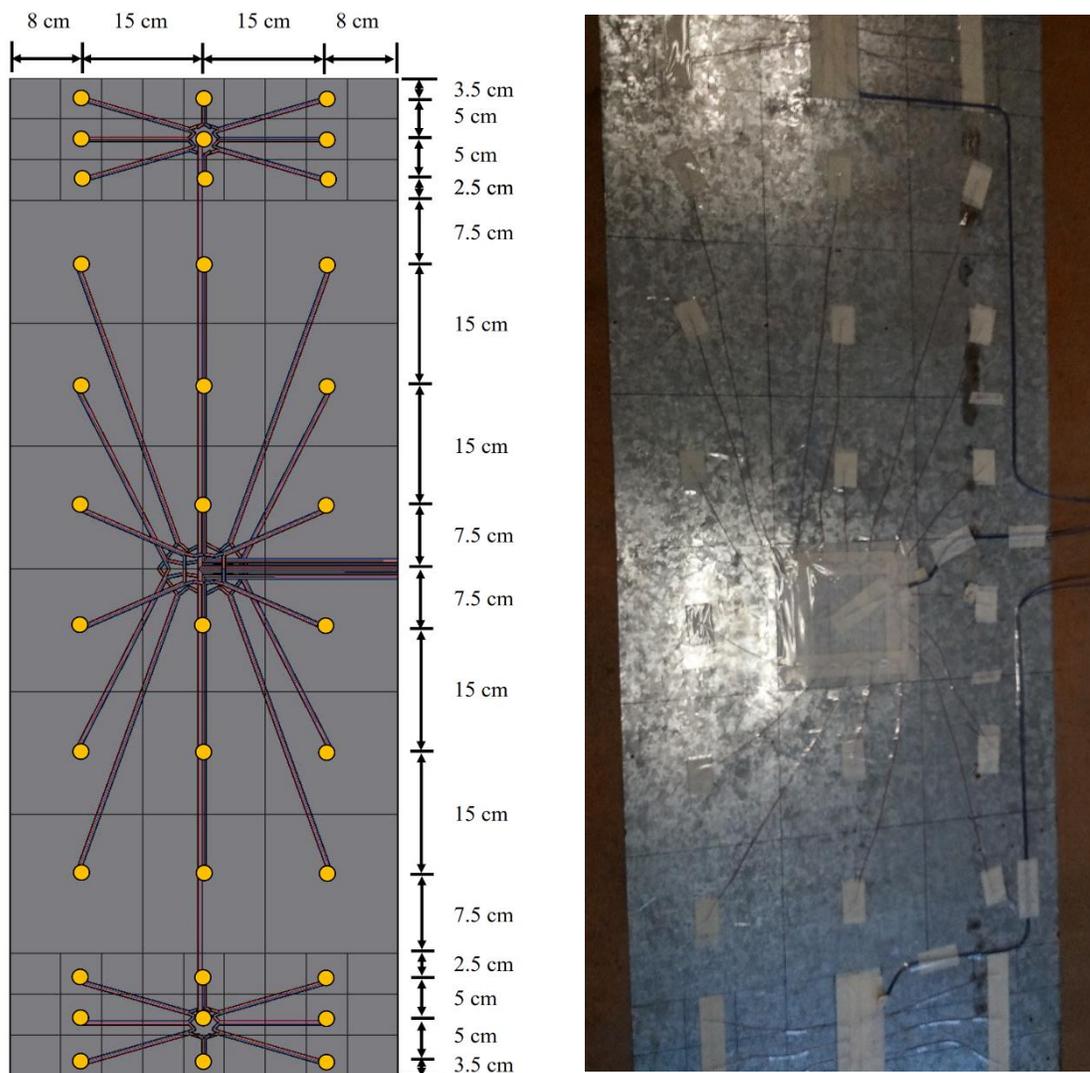


Figura 3.14. Arreglos de termopilas en placa absorbente

Los arreglos de termopilas en la placa absorbente se colocaron en la superficie interna y están en contacto directo con la resistencia eléctrica. En la Fig. 3.14 se muestra que los arreglos de

termopila inferior y superior cuentan con 8 puntas cada uno, más un sensor adicional al centro como temperatura de referencia. Los arreglos inferior y superior se ubicaron en una menor área para registrar los cambios de temperatura que suceden cerca de la entrada y salida de la zona de calentamiento de la placa absorbente. Por esta razón, la termopila de la zona centro abarca un área mayor y se construyó con más puntas para mejorar la estimación de la temperatura promedio de esta zona mientras que al centro se coloca un sensor individual como temperatura de referencia. La termopila del centro tiene 18 puntas tomando como zona de referencia el centro de la placa absorbente.

Los nombres con los que se refieren a los sensores de la placa absorbente son: TDIP (Temperatura Diferencial Inferior Placa), TCIP (Temperatura Centro Inferior Placa) para la zona de referencia, TDCP (Temperatura Diferencial Centro Placa), TCCP (Temperatura Centro Centro Placa), TDSP (Temperatura Diferencial Superior Placa) y TCSP (Temperatura Centro Superior Placa). Los sensores nombrados como “Temperatura Diferencial” se refieren a los arreglos de termopila mientras que los sensores “Temperatura Centro” se refieren a los sensores de referencia que se colocaron al centro de las zonas de medición.

La placa absorbente es un arreglo de placas metálicas paralelas de lámina de acero galvanizado que en su interior contienen los sensores de temperatura y una resistencia eléctrica distribuida en toda el área de las placas para proveer un suministro de energía constante emulando la absorción de radiación solar. La superficie de la placa metálica expuesta al canal de aire se pintó de color negro mate. En la Fig. 3.15 se muestra la vista frontal de la distribución de la resistencia eléctrica de la placa absorbente.

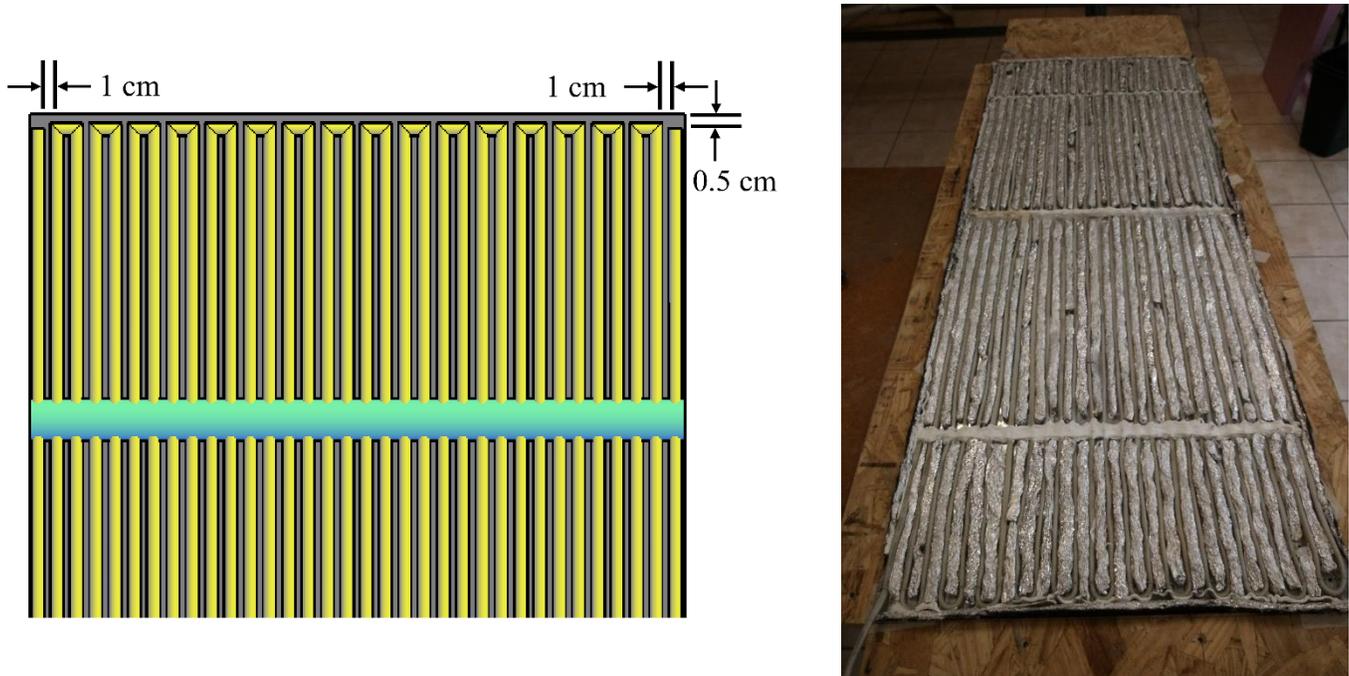


Figura 3.15. Distribución de la resistencia eléctrica en la placa absorbente

La resistencia eléctrica consiste en un hilo o filamento de constantán enrollado a lo largo de los conductores de cobre que se conectan a la fuente y todo esto recubierto de una capa de vinil transparente por donde se observan los conductores. Para cubrir la mayor parte de la superficie de la placa absorbente se utilizaron 28.44 m de resistencia. Como se muestra en la Fig. 3.15, en los espacios entre el arreglo de serpentín se añadió aluminio como elemento conductor para mejorar la conducción de calor entre la resistencia y las placas de metal. Se empleó una fuente de corriente directa Agilent N5769A con capacidad de 100 V y 15 A (1500 W) para proveer a la resistencia eléctrica de un flujo de energía constante. En la siguiente sección se detallan las configuraciones de potencia constante para la evaluación de la chimenea solar.

En la Fig. 3.16 se muestra un esquema general de la distribución de las placas y cubiertas con la instrumentación descrita.

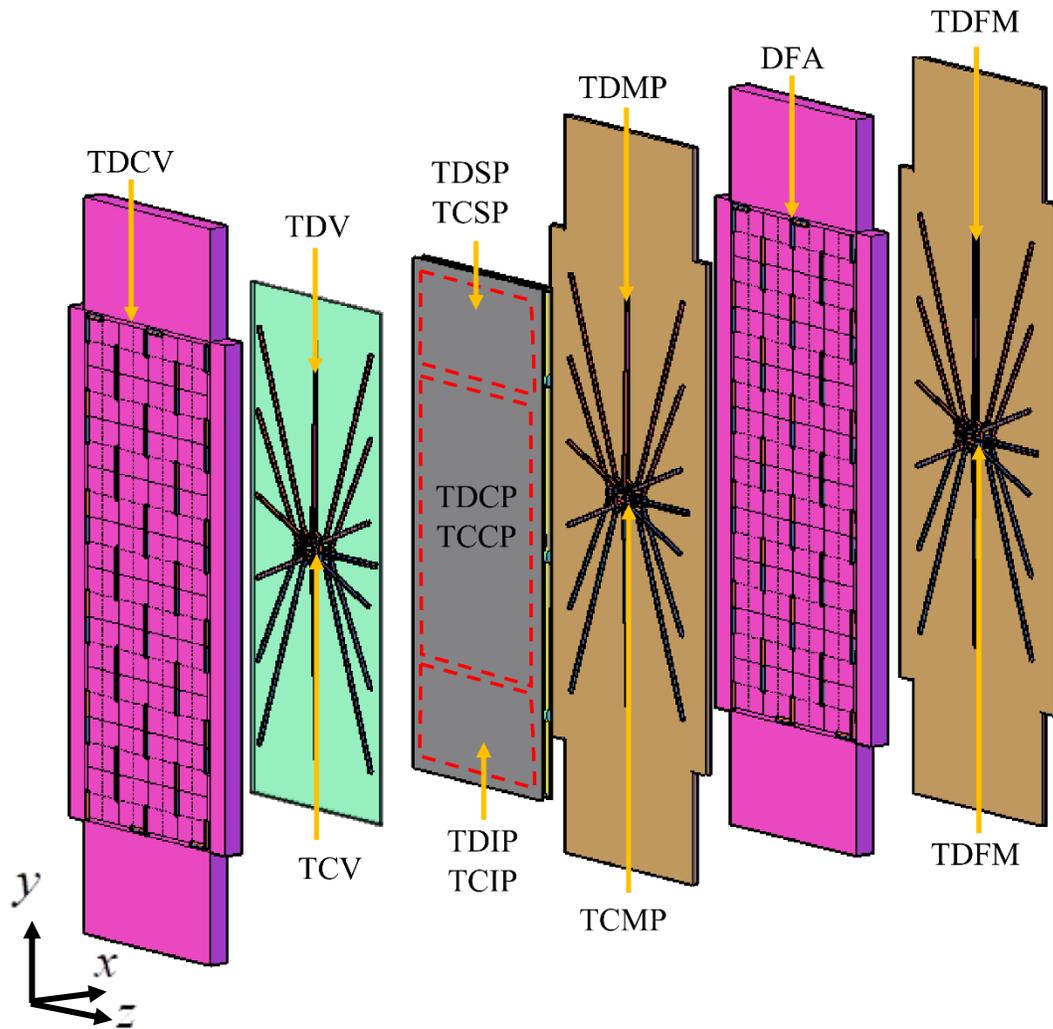


Figura 3.16. Distribución de elementos instrumentados

Los elementos mostrados en la Fig. 3.16 miden los cambios de temperatura y flujo de calor en el plano “ x - y ”, pero la transferencia de calor es presente en todas direcciones, es por ello por lo que es necesario cuantificar la transferencia de calor por los costados. Por lo tanto, se instrumentaron las placas aislantes de foamular de los costados que son orientados en dirección “ z ”. Estas placas se adecuaron para tres diferentes espesores de canal vertical (0.1 m, 0.15 m y 0.2 m), la configuración los transductores de flujo de calor es similar a la configuración que se muestra en la Fig. 3.12 aunque con una menor cantidad de puntas. Para un espesor de 10 cm, las placas de los costados cuentan con 31 puntas; para un espesor de 15 cm se emplearon 46 puntas; y para un espesor de 20 cm las placas contienen 62 puntas de termopar.

Los nombres de los sensores de flujo de calor y temperatura de las placas de los costados son: TDFD (Temperatura Diferencial Foamular Derecho), TFD (Temperatura Foamular Derecho), TDFI (Temperatura Diferencial Foamular Izquierdo) y TFI (Temperatura Foamular Izquierdo). Los sensores cuyo nombre presentan la denotación “Diferencial” se refieren a los arreglos de transductores de flujo de calor, mientras que el resto de los sensores se refieren al elementos para la medición puntual de temperatura que son empleados como referencia para la estimación de la conductividad térmica y en caso de ser necesario utilizar las mediciones como si se tratase de un arreglo de termopila para conocer la temperatura promedio en las superficie de las placas de poliestireno extruido. La función principal de las placas de poliestireno extruido instrumentadas con los transductores de flujo de calor es reducir la transferencia de calor y cuantificar la pérdida de energía térmica que no se aprovecha en el calentamiento del aire.

La posición de los sensores del canal de aire varía de acuerdo con la configuración del espesor del canal. En la Fig. 3.17 se muestran las posiciones para cada sensor y la nomenclatura usada para los datos de salida durante la medición. Como se mostró previamente en la Fig. 3.16, se añadieron más sensores para analizar el comportamiento de la transferencia de calor en el fluido del canal en comparación al prototipo original de chimenea solar de doble canal. Los sensores que se mantuvieron son aquellos que están a un centímetro de la placa absorbente y la cubierta de vidrio y al centro del canal. Todos los sensores se colocaron al centro del canal en eje z ya que es de mayor interés el comportamiento al centro del canal con respecto a los bordes, además que las mediciones necesarias para la validación de los modelos de BE requieren información de una posición desde una perspectiva en el plano x - y al ser de mayor interés.

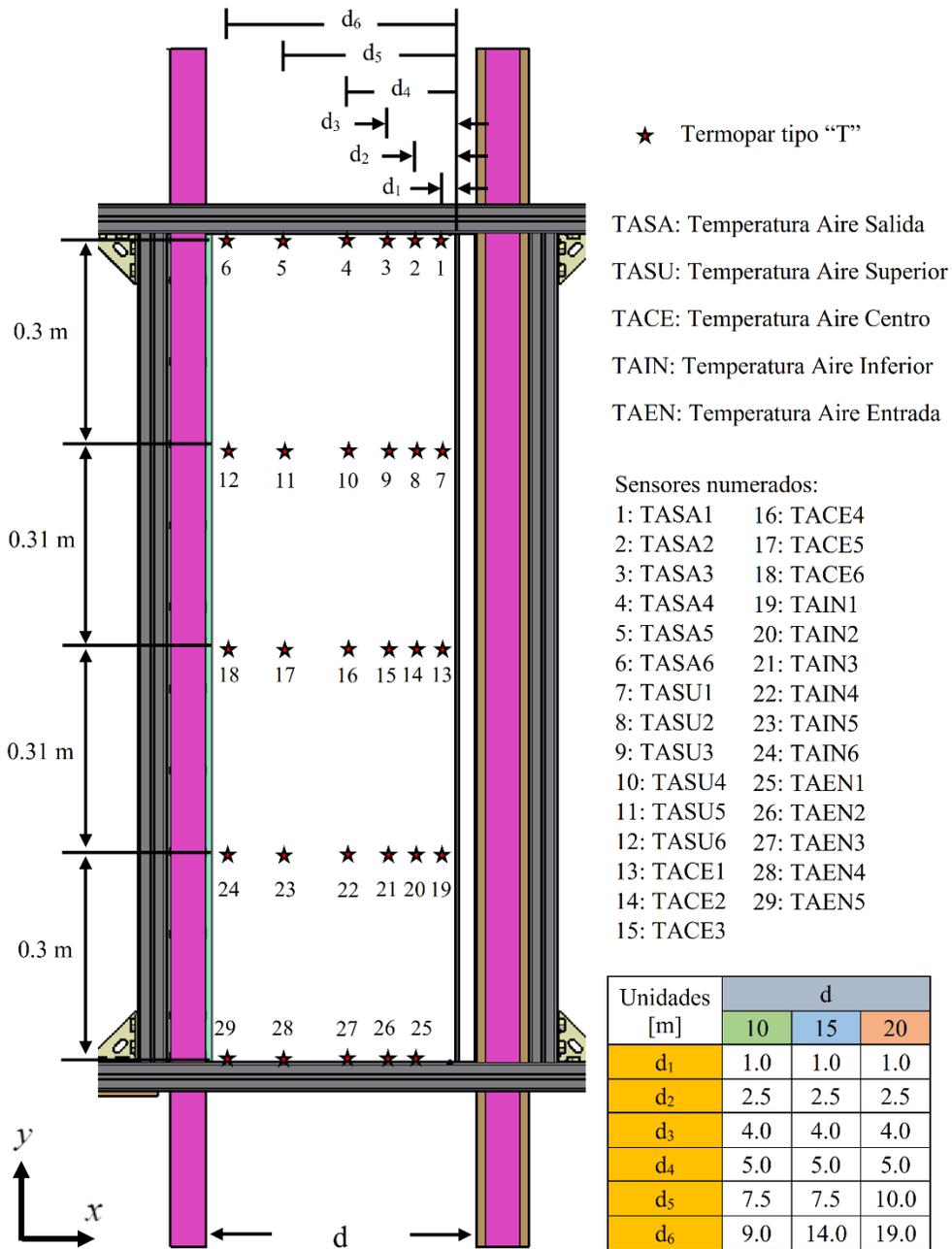


Figura 3.17. Configuración de instrumentación en canal de aire para diferentes espesores del canal

Como se muestra en la Fig. 3.17, los sensores que permanecen sin cambios son aquellos que están por debajo del límite o centro del espesor del canal, ya que se consideró necesario para analizar la capa límite térmica presente durante el análisis de la transferencia de calor. Los

sensores d_5 y d_6 se ajustan para cubrir las mediciones al centro del canal y a un centímetro de la cubierta de vidrio. Otro aspecto, es el estudio de la relación entre la temperatura del centro con respecto a la temperatura de las superficies de la placa absorbente y cubierta de vidrio para el balance de energía en un nodo ubicado al centro del canal.

Para medir la velocidad de aire a la entrada, se empleó un anemómetro de hilo caliente. La sonda remota del anemómetro permitió colocar el sensor de velocidad desde una base exterior y exponiendo la zona de medición justo al centro del canal en dirección perpendicular a la superficie de la placa absorbente, Fig. 3.18.



Figura 3.18. Ubicación de sensor de velocidad de aire

Los sensores de humedad relativa (AMT1001), presión atmosférica (BMP180) y temperatura del aire de la habitación (termopar tipo “T”) se colocaron en la misma base que soporta la sonda del anemómetro de hilo caliente. La altura de la base corresponde a la altura donde inicia el área de calentamiento de la placa absorbente y la zona de medición de los sensores de temperatura del aire del canal. *Una actividad a futuro es identificar que sensores de humedad relativa y presión son más adecuado para la medición de los parámetros deseados al interior del canal, reduciendo el impacto por la invasión en la zona de medición y desarrollo del fenómeno.*

Los sensores de humedad relativa y velocidad del aire requieren alimentación externa de 5 V y 15-24 V de corriente directa respectivamente para emitir la señal analógica de salida. Por

lo tanto, se instalaron fuentes de energía externa a cierta distancia de la zona de medición para evitar el ruido eléctrico sobre los sensores de temperatura y flujo de calor.

Los nombres clave para referirse a los sensores de humedad, presión y temperatura de la habitación son: HR (Humedad Relativa), P1 (Presión atmosférica) y TLAB (Temperatura aire Laboratorio).

En la Fig. 3.19 se muestra las imágenes de los elementos de envoltante montados sobre la estructura de aluminio con la instrumentación descrita previamente.



Figura 3.19 Vistas del armado de la chimenea con instrumentación: a) lateral derecho, b) superior, c) lateral izquierdo

Después de realizar el proceso de instrumentación, el siguiente paso es la conexión de todos los sensores al sistema de adquisición de datos. Los sensores de temperatura puntual, arreglos de termopila y transductores de flujo de calor se conectaron en los canales de tres tarjetas multiplexoras KEYSIGHT 34901A (20 canales + 2 canales adicionales). Las tarjetas multiplexoras se conectan al multímetro digital AGILENT 34970A de alta impedancia. Los 20 primeros canales de cada tarjeta multiplexora están acondicionados para la medición de la tensión producida por los arreglos de termopila, transductores de flujo de calor y los sensores puntuales de termopar tipo “T”. Mientras que los últimos dos canales adicionales

son adecuados para la medición de la corriente eléctrica en corriente directa y alterna. Solo uno de estos canales se utilizó para la medición de la señal analógica del anemómetro de hilo caliente. Los sensores en contacto con la extensión del anemómetro se cubrieron con aluminio a manera que está funcione como una jaula de Faraday y cualquier ruido electromagnético inducido por el sensor sea anulado y no afecte el resto de las mediciones.

Además del sensor de velocidad de aire, el sensor de humedad relativa emite una señal de salida analógica que genera una interferencia aún mayor que el anterior, por esta razón, además de emplear un multímetro digital con tarjetas multiplexoras se implementó un sistema de adquisición a través de un Arduino Uno R3 en conjunto con un Raspberry Pi 3B para el registro de la señal analógica de tensión emitida por el sensor de humedad y el sensor digital de presión.

El Arduino Uno es una placa de desarrollo de código libre que contiene un microcontrolador ATMEGA328P y que a través de una interfaz de entrada es posible conectar a la placa diferentes periféricos, en este caso, las extensiones del sensor de humedad relativa. La placa de Arduino contiene un convertidor de señal analógica de 0-5 V en 10 bits con una resolución de 4.88 mV a señal digital, tal característica fue la razón por la que el Arduino fue empleado como sistema de adquisición de datos de algunos sensores para el experimento.

Raspberry Pi es una minicomputadora de bajo costo integrado con procesador, memoria RAM y tarjeta de video solo requiere de una conexión a pantalla o monitor, teclado y ratón USB, y una tarjeta SD para funcionar como cualquier ordenador convencional. El sistema operativo para estos ordenadores es de acceso libre y optimizado para estos sistemas, ya que está basado en un kernel de Linux. Es ideal para proyectos de electrónica ya que contiene una serie de puertos GPIO que proveen diferentes opciones de conexión para sensores digitales entre otros periféricos. A diferencia de las placas Arduino, los Raspberry no están integrados con un convertidor de señal analógica a digital, por esta razón se tomó la decisión de integrar el conjunto de Arduino a Raspberry para la lectura de las señales de los sensores de humedad relativa y presión atmosférica. Mediante un código desarrollado en el lenguaje de programación Python se programan las entradas y salidas del Raspberry para controlar la señal de entrada del sensor de presión atmosférica y de la placa Arduino, la cual a su vez registra y transforma la señal analógica del sensor de humedad a valores digitales.

En la Fig. 3.20 se presenta un esquema general de la conexión de los sensores del prototipo de chimenea solar al sistema de adquisición de datos.

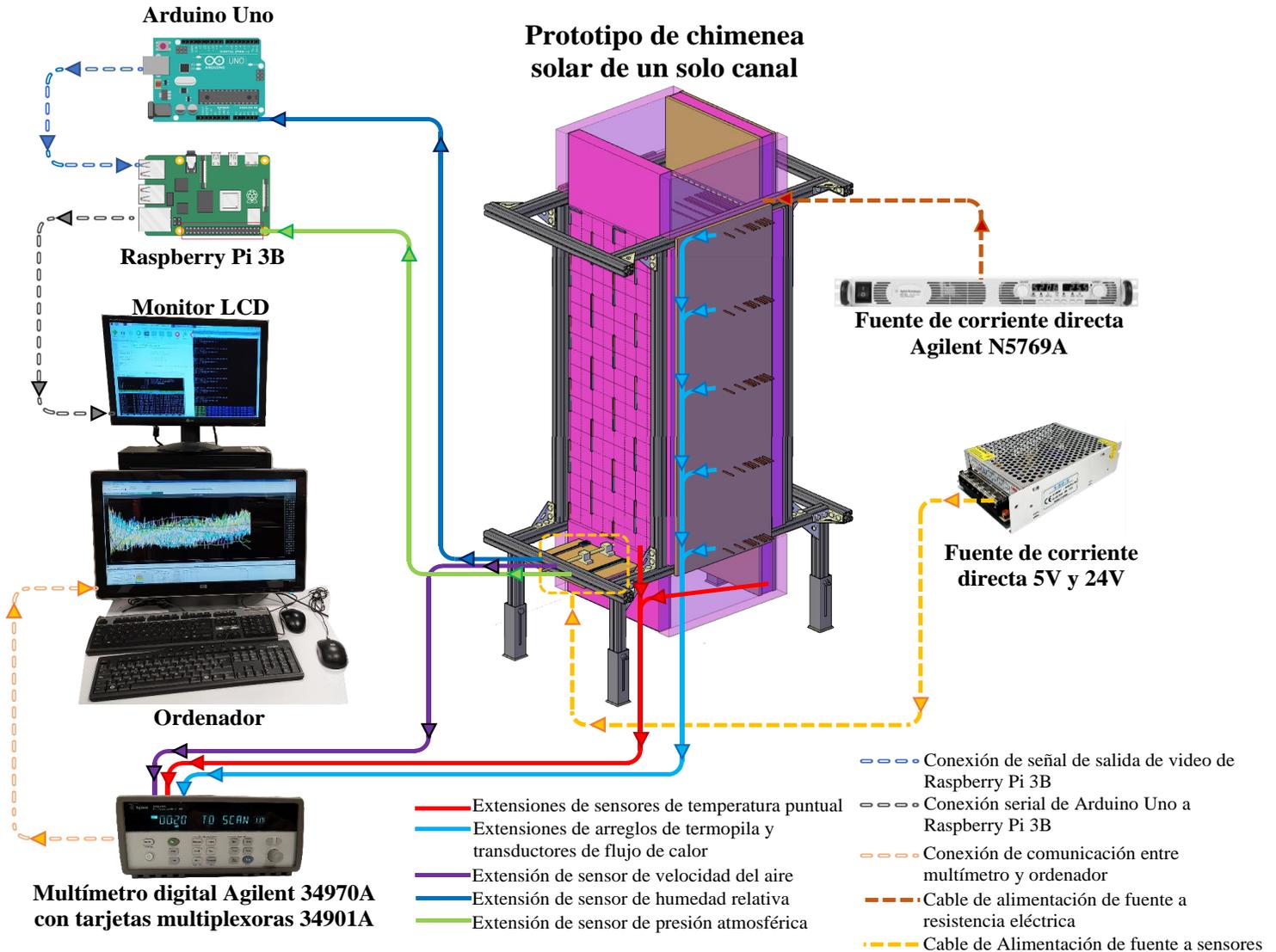
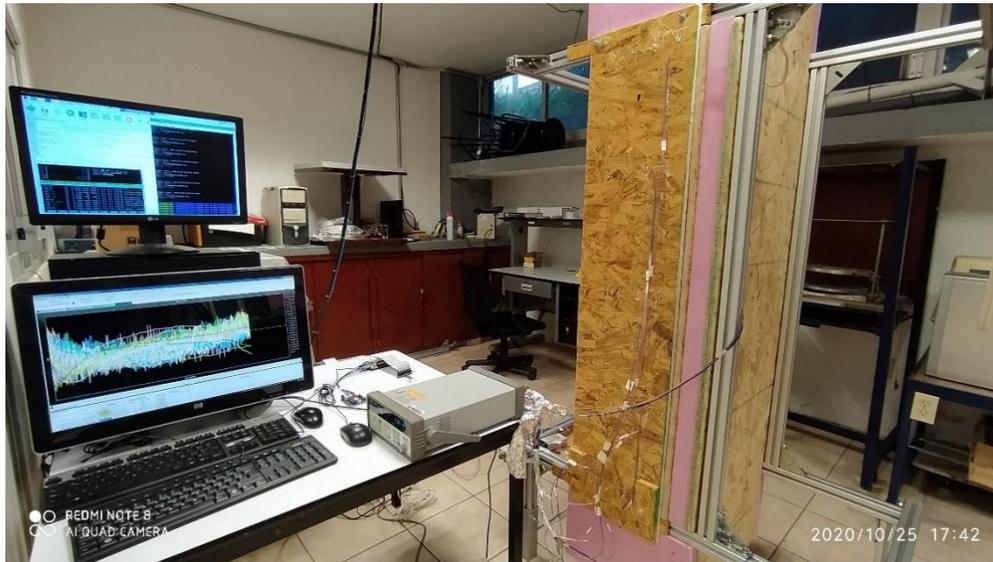


Figura 3.20. Esquema general del prototipo experimental de ChSo-OC y conexión de dispositivos y sensores al sistema de adquisición de datos

Los datos registrados y almacenados tanto por el multímetro digital como el conjunto Arduino-Raspberry están sincronizados en tiempo, lo cual facilita el tratamiento de datos. En

la Fig. 3.21 se presentan fotografías del prototipo de ChSo-OC instrumentado y conectado al sistema de adquisición de datos.



a)



b)



c)

Figura 3.21. Prototipo de ChSo-OC finalizado: a) sistema completo, b) sistema completo lateral derecho, b) sistema completo lateral izquierdo

3.4.Etapa 3: Evaluación

En la etapa de evaluación, el sistema de adquisición de datos y la resistencia eléctrica de la chimenea solar son encendidos para inspeccionar las conexiones de los sensores con el sistema de adquisición de datos, el ruido eléctrico en los sensores, el desempeño de las fuentes de alimentación de los sensores de velocidad de aire y humedad relativa y la conexión de la fuente variable para la activación de la resistencia eléctrica. Además, se llevó a cabo un análisis de propagación de error para determinar las incertidumbres en los sensores empleados y la potencia suministrada.

3.4.1. Pruebas de encendido y detección de anomalías

Las pruebas de encendido del prototipo de ChSo-OC consisten en una serie de evaluaciones del sistema de adquisición de datos, funcionamiento de los sensores y desempeño de la resistencia eléctrica. Tales pruebas se enlistan a continuación:

- a) Primera prueba: encendido de sistema de adquisición de datos sin encendido de fuente de corriente DC para resistencia eléctrica o prueba a “cero potencia”.
- b) Segunda prueba: encendido de sistema de adquisición de datos sin encendido de resistencia eléctrica y cambiando conexión de sensor de humedad relativa y apantallamiento de sensores de temperatura.
- c) Tercera prueba: encendido de sistema de adquisición de datos encendiendo la resistencia eléctrica a diferentes potencias.

Para facilitar el análisis de los datos en las pruebas de encendido, así como en las evaluaciones de estudio, se desarrolló un código en lenguaje de programación Python para la lectura de los archivos de salida del sistema de adquisición de datos y la generación de archivos de salida con la información deseada y gráficos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las pruebas iniciales.

3.4.2. Análisis de propagación de error

Existen dos métodos principales para cuantificar las fuentes de incertidumbre: el Método de Evaluación Tipo A el cual se basa en un análisis estadístico de un conjunto o serie de mediciones, y el Método de Evaluación Tipo B que se basa en la experiencia o información externa a aquel que realiza la medición (metrólogo) (Schmid y Lazos-Martínez, 2000). Para

la cuantificación de las fuentes de incertidumbre en el prototipo de ChSo-OC se emplea el Método de Evaluación tipo B.

Las fuentes de incertidumbre tipo B se cuantifican usando información externa. Esta información proviene de: certificados de calibración, manuales del instrumento de medición, normal o literatura, valores de mediciones anteriores y conocimiento sobre las características o el comportamiento del sistema de medición.

La cuantificación de una fuente de incertidumbre incluye la asignación de un valor y la determinación de la distribución a la cual se refiere este valor. Por las características del experimento y el fenómeno de estudio se establece que los resultados de la medición siguen una distribución normal, Fig. 3.22. La distribución normal se representa a partir de una curva a la que se denomina curva de normalidad o “campana de Gauss”. La campana de Gauss es una representación gráfica de la distribución de datos de una variable continua.

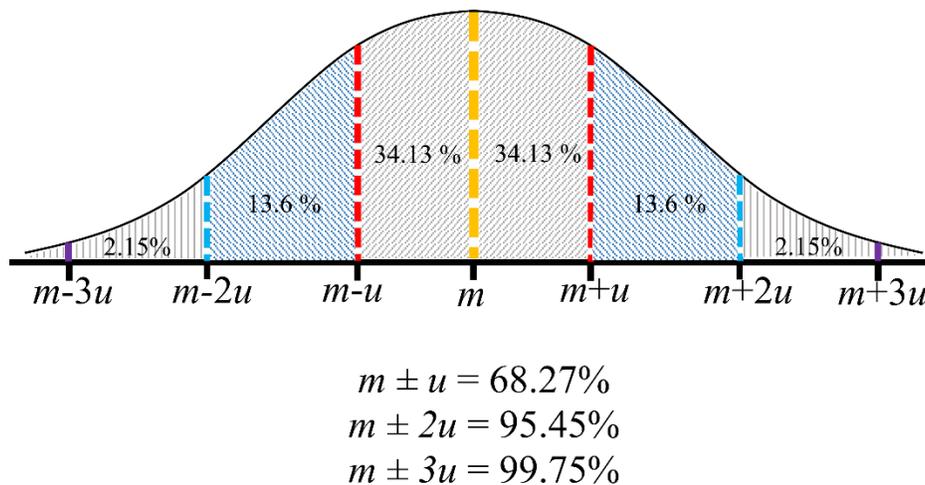


Figura 3.22. Distribución normal

El término m , Fig. 3.22, corresponde a la media del valor de la variable. El término u corresponde a la desviación estándar el cual es una medida de dispersión que indica que tan dispersos se encuentran los valores o datos con respecto a m . La desviación estándar calculada a partir de los resultados de una medición repetida ya representa la incertidumbre estándar.

La incertidumbre estándar u representa un intervalo centrado en el mejor estimado de la medición que contiene el valor verdadero con una probabilidad de P de 68.27%, bajo la suposición que los posibles valores del mensurado siguen la distribución normal, Fig. 3.22. Generalmente se desea una mayor probabilidad, lo que se obtiene expandiendo el intervalo de incertidumbre por un factor K , llamado factor de cobertura. En la Fig. 3.22, estos se presentan los factores de cobertura para diferentes probabilidades, un valor $K = 1$ corresponde al 68.27% de los datos, un valor de $K=2$ corresponde al 95.45% de los datos y mientras que $K= 3$ corresponde al 99.75% de los datos. El resultado del producto de la incertidumbre estándar por el factor de cobertura se conoce como incertidumbre expandida U .

La incertidumbre expandida U indica un intervalo que representa una fracción p de los valores que probablemente tomen los datos de la medición. El valor de p es llamado el nivel de confianza y es elegido a conveniencia.

La forma de expresar la incertidumbre como parte de los resultados de la medición depende de la conveniencia del usuario. A veces se expresa simplemente como la incertidumbre estándar o combinada. Algunos casos requieren que la incertidumbre se exprese en términos de un nivel de confianza. En cualquier caso, es indispensable especificar la manera en que se expresa la incertidumbre sin ambigüedades.

Cuando se disponen de valores de una incertidumbre expandida del instrumento de medición, como los presentados en certificados de calibración, la incertidumbre estándar se obtiene a partir de dividir U entre el factor de cobertura K establecido por un nivel de confianza deseado.

$$u(x_i) = \frac{U}{K} \quad (3.1)$$

Donde x_i corresponde a la magnitud medida o mensurado.

El resultado de la combinación de las contribuciones de todas las fuentes es la incertidumbre estándar combinada $u_c(y)$, la cual contiene toda la información esencial sobre la incertidumbre del mensurado Y .

La contribución $u_i(y)$ de cada fuente a la incertidumbre combinada depende de la incertidumbre estándar $u(x_i)$ de la propia fuente o mensurando. Es posible que una pequeña variación de alguna de las magnitudes de influencia tenga un impacto importante la magnitud medida y viceversa.

Para calcular la contribución $u_i(y)$ se emplea el producto de $u(x_i)$ y su coeficiente de sensibilidad c_i (o factor de sensibilidad):

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (3.2)$$

El coeficiente de sensibilidad describe que tan sensible es la magnitud medida con respecto a variaciones de la magnitud de entrada correspondiente. Para su determinación existen dos métodos:

a) Determinación a partir de una relación funcional

Este método evalúa si el modelo matemático para el mensurado $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ describe la influencia de la magnitud de entrada X_i suficientemente bien mediante una relación funcional, para después calcular el coeficiente de sensibilidad c_i por la derivada parcial de f con respecto a X_i ,

$$c_i = \left. \frac{\partial f(X_1, \dots, X_N)}{\partial X_i} \right|_{X_1=x_1 \dots X_N=x_N} \quad (3.3)$$

b) Otros métodos de determinación

Si la influencia de la magnitud de entrada X_i en el mensurando Y no está representada por una relación funcional, se determina el coeficiente de sensibilidad c_i por una estimación del impacto de una variación de X_i en Y según:

$$c_i = \frac{\Delta Y}{\Delta X_i} \quad (3.4)$$

Lo cual implica que se mantienen constantes el resto de las magnitudes de entrada, mientras se determina el cambio de Y producido por un cambio en X_i por una medición o a partir de la información disponible.

En el caso de magnitudes de entrada no correlacionadas, la incertidumbre combinada $u_c(y)$ se calcula por la suma de geométrica de las contribuciones particulares:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (3.5)$$

Sustituyendo las Ecs. 3.3-4 en 3.5 y despejando se obtiene:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial X_i} u(x_i) \right]^2} \quad (3.6)$$

La Ec. 3.6 representa la “ley de propagación de incertidumbre”. El último término de la Ec. 3.6 dispone de la relación funcional entre Y y $\{X_i\}$.

De acuerdo con el Centro Nacional de Metrología, los resultados de las mediciones deben presentarse con un nivel de confianza no menor al 95%. En cuanto a la expresión de la incertidumbre expandida U , debe incluirse un intervalo centrado en el mejor estimado y del medurado, así como la afirmación de que p es del 95%, o el valor sea el caso, y el número de grados de libertad sea el caso. Una manera de expresar el resultado de la medición es:

$$Y = y \pm U \quad (3.7)$$

El número de cifras significativas en la expresión de la incertidumbre es generalmente uno, o dos cuando la exactitud es alta. Se debe asegurar que el número de cifras significativas del valor del medurado sea consistente con el de la incertidumbre.

3.4.3. Configuraciones evaluadas con prototipo experimental

Posterior a las pruebas de funcionamiento, se realizaron 15 evaluaciones del prototipo experimental de ChSo-OC, variando los espesores del canal (0.10, 0.15 y 0.20 m) y los flux

de calor suministrados a la placa absorbente (100, 200, 300, 400 y 500 W m⁻²). De forma resumida, se presentan los valores promedio de temperatura y velocidad del fluido después de alcanzar el estado estable. Para ello se tomaron 5 horas de medición estable de cada configuración. En el capítulo 5 se presentan los resultados experimentales de tales configuraciones para la validación de los modelos de chimenea solar en estado permanente y transitorio.

CAPÍTULO 4

MODELO DE LA ChSo-OC Y ChSo-TC POR BE

En este capítulo se presenta el planteamiento de los modelos matemáticos de la ChSo-OC y la ChSo-TC a partir de los BE. Se presenta el desarrollo de las ecuaciones para cada elemento que conforman los sistemas pasivos, así como las correlaciones empleadas para la estimación de los coeficientes convectivos y la estimación del flujo de aire inducido por las chimeneas solares. Los modelos comprenden el uso de materiales masivos para la evaluación paramétrica. Se presentan los modelos generales con materiales masivos ya que la evaluación sin ellos solo requiere retirar las ecuaciones correspondientes.

4.1. Modelo físico y matemático de una ChSo-OC incorporando un material masivo

De acuerdo con el modelo físico de la Fig. 4.1, el seccionamiento del elemento masivo o PCM es en N_{xPCM} elementos, debido a que el estudio puede variar en cuanto a las dimensiones del contenedor, tipo de material empleado y condiciones climáticas, por lo tanto, el modelo debe adecuarse para realizar un estudio similar a la independencia de malla espacial empleado en los modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD). Por lo tanto, el modelo matemático para el PCM debe mostrar una estructura genérica para N_{xPCM} nodos.

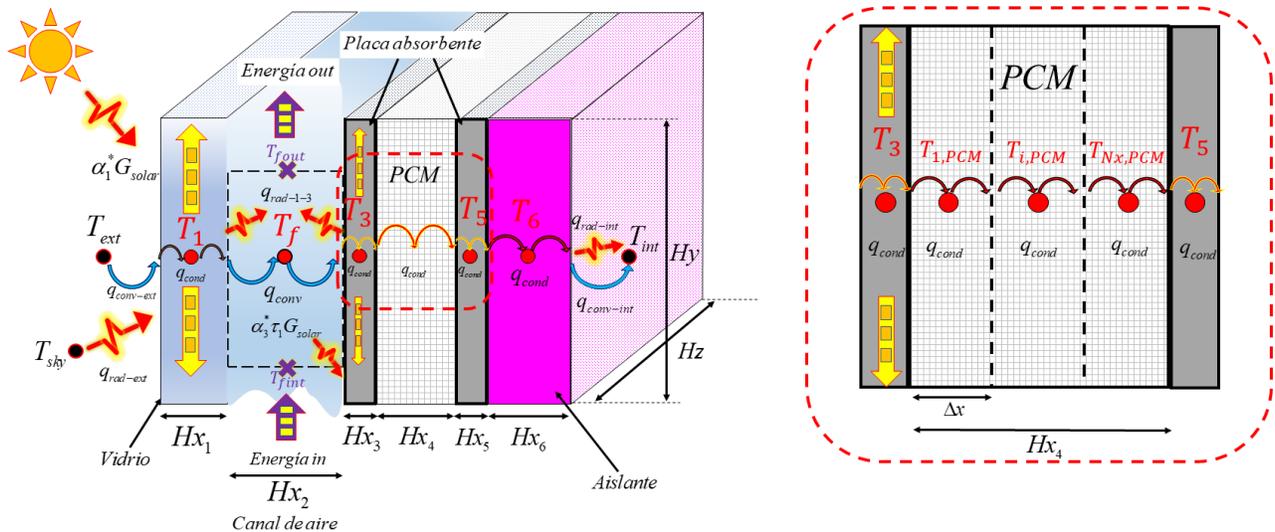


Figura 4.1. Modelo físico de ChSo-OC con PCM

En cuanto al método para el estudio del fenómeno de conducción de calor en el PCM se emplea el método de $C_{P-efect}$ (Cp efectivo). A continuación, se presentan el modelo de BE para el modelo matemático correspondiente de la Fig. 4.1 en estado transitorio.

Elemento 1 (Cubierta de vidrio):

$$q_{entra,1} - q_{sale,1} = \frac{d}{dt} (\rho_1 C_{P,1} T_1) A \Delta x \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} & \underbrace{\left(\frac{T_{ext} - T_1}{\frac{1}{h_{conv-ext}} + \frac{Hx_1}{2\lambda_1}} \right)}_{a_1} A_{int} + \underbrace{\left(\frac{T_{sky} - T_1}{h_{rad1}} \right)}_{a_2} A_{int} + \alpha_1^* G_{solar} A_{int} - \underbrace{\left(\frac{T_1 - T_f}{\frac{Hx_1}{2\lambda_1} + \frac{1}{h_{1-f}}} \right)}_{a_3} A_{out} - \underbrace{\left(\frac{T_1 - T_3}{h_{rad,1-3}} \right)}_{a_4} A_{out} \quad (4.2) \\ & = \underbrace{\left(\frac{\rho_1 C_{P,1} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{P,1}^0} A (T_1 - T_1^0) \quad A = A_{int} = A_{out} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (a_1 a_2 a_3 + a_1 a_2 a_4 + a_1 a_3 a_4 + a_2 a_3 a_4 + a_1 a_2 a_3 a_4 a_{P,1}^0) T_1 - (a_1 a_2 a_4) T_f \quad (4.3) \\ & = a_2 a_3 a_4 T_{ext} + a_1 a_3 a_4 T_{sky} + a_1 a_2 a_3 T_f + a_1 a_2 a_3 a_4 \alpha_1^* G_{solar} + a_1 a_2 a_3 a_4 a_{P,1}^0 T_1^0 \end{aligned}$$

Donde:

$$a_1 = \frac{1}{h_{conv-ext}} + \frac{Hx_1}{2\lambda_1}; \quad a_2 = \frac{1}{h_{rad1}}; \quad a_3 = \frac{Hx_1}{2\lambda_1} + \frac{1}{h_{1-f}}; \quad a_4 = \frac{1}{h_{rad,1-3}}; \quad a_{P,1}^0 = \frac{\rho_1 C_{P,1} \Delta x}{\Delta t} \quad (4.4)$$

$$h_{rad1} = \sigma \varepsilon_1 (T_{sky}^2 + T_1^2) (T_{sky} + T_1) \quad (4.5)$$

$$h_{rad,1-3} = \frac{\sigma (T_1^2 + T_3^2) (T_1 + T_3)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_3} - 1} \quad (4.6)$$

Elemento 2 (fluido del canal):

$$q_{entra,f} - q_{sale,f} = \frac{d}{dt} (\rho_f C_{P,f} T_f) A \Delta x \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} & \underbrace{\left(\frac{T_1 - T_f}{\frac{Hx_1}{2\lambda_1} + \frac{1}{h_{1-f}}} \right)}_{b_1} + \frac{\dot{m}_{int} C_{P,int} T_{f,int}}{HyHz} - \underbrace{\left(\frac{T_f - T_3}{\frac{1}{h_{f-3}} + \frac{Hx_3}{2\lambda_3}} \right)}_{b_2} - \frac{\dot{m}_{out} C_{P,out} T_{f,out}}{HyHz} \\ & = \underbrace{\left(\frac{\rho_f C_{P,f} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{P,f}^0} (T_f - T_f^0) \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} & -(b_2)T_1 + \left(b_1 + b_2 + b_1 b_2 \frac{\dot{m} C_{P,f}}{\gamma HyHz} + b_1 b_2 a_{P,f}^0 \right) T_f - (b_1)T_3 \\ & = b_1 b_2 \frac{\dot{m} C_{P,f}}{\gamma HyHz} T_{f,int} + b_1 b_2 a_{P,f}^0 T_f^0 \end{aligned} \quad (4.9)$$

La Ec. (4.9) introduce el término γ el cual es el factor de promedio entre las temperaturas de entrada y salida con la temperatura del volumen de control del canal; de esta manera la expresión solo está en función de $T_{f,int}$ y T_f . Los coeficientes de la Ec. (4.9) son:

$$b_1 = \frac{Hx_1}{2\lambda_1} + \frac{1}{h_{1-f}} \quad b_2 = \frac{1}{h_{f-3}} + \frac{Hx_3}{2\lambda_3} \quad a_{P,f}^0 = \frac{\rho_f C_{P,f} \Delta x}{\Delta t} \quad (4.10)$$

Elemento 3 (placa metálica absorbente):

$$q_{entra,3} - q_{sale,3} = \frac{d}{dt} (\rho_3 C_{P,3} T_3) A \Delta x \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} & \underbrace{\left(\frac{T_f - T_3}{\frac{1}{h_{f-3}} + \frac{Hx_3}{2\lambda_3}} \right)}_{c_1} A_{int} + \underbrace{\left(\frac{T_1 - T_3}{h_{rad,1-3}} \right)}_{c_2} + \alpha_3^* \tau_1^* G_{solar} A_{int} - \underbrace{\left(\frac{T_3 - T_{1,PCM}}{\frac{Hx_3}{2\lambda_3} + \frac{\Delta x_{1,PCM}}{2\lambda_{1,PCM}}} \right)}_{c_3} A_{out} \\ & = \underbrace{\left(\frac{\rho_3 C_{P,3} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{P,3}^0} A (T_3 - T_3^0) \quad A = A_{int} = A_{out} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned}
& -(c_2 c_3) T_f + (c_1 c_2 + c_1 c_3 + c_2 c_3 + c_1 c_2 c_3 a_{P,3}^0) T_3 - (c_1 c_2) T_4 \\
& = c_1 c_3 T_1 + c_1 c_2 c_3 \alpha_3^* \tau_1^* G_{solar} + c_1 c_2 c_3 a_{P,3}^0 T_3^0
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Donde:

$$c_1 = \frac{1}{h_{f-3}} + \frac{Hx_3}{2\lambda_3} \quad c_2 = \frac{1}{h_{rad,1-3}} \quad c_3 = \frac{Hx_3}{2\lambda_3} + \frac{\Delta x_{1,PCM}}{2\lambda_{1,PCM}} \quad a_{P,3}^0 = \frac{\rho_3 C_{P,3} \Delta x}{\Delta t} \tag{4.14}$$

Para las ecuaciones correspondientes de cada capa del PCM, se considera conducción de calor entre las placas metálicas que fungen como contenedores y las capas de PCM adyacentes. Como se mencionó anteriormente, el método empleado para describir el fenómeno de conducción de calor en el PCM es el $C_{P-efect}$, de esta manera se contempla que el término de la entalpía de cambio de fase forma parte del término C_P en cada ecuación resultante.

Elemento 4 (PCM) nodo 1:

$$q_{entra,1,PCM} - q_{sale,1,PCM} = \frac{d}{dt} (\rho_{1,PCM} C_{P,1,PCM} T_{1,PCM}) A \Delta x \tag{4.15}$$

$$\frac{T_3 - T_{1,PCM}}{\underbrace{\left(\frac{Hx_3}{2\lambda_3} + \frac{\Delta x_{1,PCM}}{2\lambda_{1,PCM}} \right)}_{d_1}} A_{int} - \frac{T_{1,PCM} - T_{2,PCM}}{\underbrace{\left(\frac{\Delta x_{1,PCM}}{2\lambda_{1,PCM}} + \frac{\Delta x_{2,PCM}}{2\lambda_{2,PCM}} \right)}_{d_2}} A_{out} \tag{4.16}$$

$$= \underbrace{\left(\frac{\rho_{1,PCM} C_{P,1,PCM} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{P,1,PCM}^0} A (T_{1,PCM} - T_{1,PCM}^0) \quad A = A_{int} = A_{out}$$

$$-(d_2) T_3 + (d_1 + d_2 + d_1 d_2 a_{P,1,PCM}^0) T_{1,PCM} - (d_1) T_{2,PCM} = d_1 d_2 a_{P,1,PCM}^0 T_{1,PCM}^0 \tag{4.17}$$

Donde:

$$d_1 = \frac{Hx_3}{2\lambda_3} + \frac{\Delta x_{1,PCM}}{2\lambda_{1,PCM}} \quad d_2 = \frac{\Delta x_{1,PCM}}{2\lambda_{1,PCM}} + \frac{\Delta x_{2,PCM}}{2\lambda_{2,PCM}} \quad a_{P,1,PCM}^0 = \frac{\rho_{1,PCM} C_{P,1,PCM} \Delta x}{\Delta t} \quad (4.18)$$

Elemento 4 (PCM) nodo i :

$$q_{entra,i,PCM} - q_{sale,i,PCM} = \frac{d}{dt} (\rho_{i,PCM} C_{P,i,PCM} T_{i,PCM}) A \Delta x \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} & \underbrace{\left(\frac{T_{i-1,PCM} - T_{i,PCM}}{2\lambda_{i-1,PCM}} + \frac{T_{i,PCM} - T_{i+1,PCM}}{2\lambda_{i,PCM}} \right)}_{e_1} A_{int} - \underbrace{\left(\frac{T_{i,PCM} - T_{i+1,PCM}}{2\lambda_{i,PCM}} + \frac{T_{i+1,PCM} - T_{i+2,PCM}}{2\lambda_{i+1,PCM}} \right)}_{e_2} A_{out} \\ & = \underbrace{\left(\frac{\rho_{i,PCM} C_{P,i,PCM} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{P,i,PCM}^0} A (T_{i,PCM} - T_{i,PCM}^0) \quad A = A_{int} = A_{out} \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$-(e_2)T_{i-1} + (e_1 + e_2 + e_1 e_2 a_{P,i,PCM}^0)T_{i,PCM} - (e_1)T_{i+1,PCM} = e_1 e_2 a_{P,i,PCM}^0 T_{i,PCM}^0 \quad (4.21)$$

Donde:

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{\Delta x_{i-1,PCM}}{2\lambda_{i-1,PCM}} + \frac{\Delta x_{i,PCM}}{2\lambda_{i,PCM}} & e_2 &= \frac{\Delta x_{i,PCM}}{2\lambda_{i,PCM}} + \frac{\Delta x_{i+1,PCM}}{2\lambda_{i+1,PCM}} \\ a_{P,i,PCM}^0 &= \frac{\rho_{i,PCM} C_{P,i,PCM} \Delta x}{\Delta t} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Elemento 4 (PCM) nodo Nx :

$$q_{entra,Nx,PCM} - q_{sale,Nx,PCM} = \frac{d}{dt} (\rho_{Nx,PCM} C_{P,Nx,PCM} T_{Nx,PCM}) A \Delta x \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\left(\frac{T_{N_x-1,PCM} - T_{N_x,PCM}}{2\lambda_{N_x-1,PCM}} + \frac{\Delta x_{N_x,PCM}}{2\lambda_{N_x,PCM}} \right)}_{f_1} A_{int} - \underbrace{\left(\frac{T_{N_x,PCM} - T_5}{2\lambda_{N_x,PCM}} + \frac{Hx_5}{2\lambda_5} \right)}_{f_2} A_{out} \\
& = \underbrace{\left(\frac{\rho_{N_x,PCM} C_{P,N_x,PCM} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{P,N_x,PCM}^0} A (T_{N_x,PCM} - T_{N_x,PCM}^0) \quad A = A_{int} = A_{out}
\end{aligned} \tag{4.24}$$

$$-(f_2)T_{N_x-1} + (f_1 + f_2 + f_1 f_2 a_{P,N_x,PCM}^0)T_{N_x,PCM} - (f_1)T_{N_x+1,PCM} = f_1 f_2 a_{P,N_x,PCM}^0 T_{N_x,PCM}^0 \tag{4.25}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
f_1 &= \frac{\Delta x_{N_x-1,PCM}}{2\lambda_{N_x-1,PCM}} + \frac{\Delta x_{N_x,PCM}}{2\lambda_{N_x,PCM}} & f_2 &= \frac{\Delta x_{N_x,PCM}}{2\lambda_{N_x,PCM}} + \frac{Hx_5}{2\lambda_5} \\
a_{P,N_x,PCM}^0 &= \frac{\rho_{N_x,PCM} C_{P,N_x,PCM} \Delta x}{\Delta t}
\end{aligned} \tag{4.26}$$

Elemento 5 (placa metálica absorbente):

$$q_{entra,5} - q_{sale,5} = \frac{d}{dt} (\rho_5 C_{P,5} T_5) A \Delta x \tag{4.27}$$

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\left(\frac{T_{N_x,PCM} - T_5}{2\lambda_{N_x,PCM}} + \frac{Hx_5}{2\lambda_5} \right)}_{g_1} A_{int} - \underbrace{\left(\frac{T_5 - T_6}{2\lambda_5} + \frac{Hx_6}{2\lambda_6} \right)}_{g_2} A_{out} = \underbrace{\left(\frac{\rho_5 C_{P,5} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{P,5}^0} A (T_5 - T_5^0)
\end{aligned} \tag{4.28}$$

$$A = A_{int} = A_{out}$$

$$-(g_2)T_{N_x,PCM} + (g_1 + g_2 + g_1 g_2 a_{P,5}^0)T_5 - (g_1)T_6 = g_1 g_2 a_{P,5}^0 T_5^0 \tag{4.29}$$

Elemento 6 (aislante expuesto a medio interior):

$$q_{entra,6} - q_{sale,6} = \frac{d}{dt} (\rho_6 C_{P,6} T_6) A \Delta x \tag{4.30}$$

$$\underbrace{\left(\frac{T_5 - T_6}{\frac{Hx_5}{2\lambda_5} + \frac{Hx_6}{2\lambda_6}} \right)}_{p_1} A_{int} - \underbrace{\left(\frac{T_6 - T_{int}}{\frac{Hx_6}{2\lambda_6} + \frac{1}{h_{conv-int} + h_{rad-int}}} \right)}_{p_2} A_{out} = \underbrace{\left(\frac{\rho_6 C_{p,6} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{p,6}^0} A (T_6 - T_6^0) \quad (4.31)$$

$$A = A_{int} = A_{out}$$

$$-(p_2)T_5 + (p_1 + p_2 + p_1 p_2 a_{p,6}^0)T_6 = p_1 T_{int} + p_1 p_2 a_{p,6}^0 T_6^0 \quad (4.32)$$

$$p_1 = \frac{Hx_5}{2\lambda_5} + \frac{Hx_6}{2\lambda_6} \quad p_2 = \frac{Hx_6}{2\lambda_6} + \frac{1}{h_{conv-int} + h_{rad-int}}$$

$$h_{rad-int} = \sigma \varepsilon_6 (T_6^2 + T_{int}^2)(T_6 + T_{int}) \quad (4.33)$$

$$a_{p,6}^0 = \frac{\rho_6 C_{p,6} \Delta x}{\Delta t}$$

Agrupando las Ecs. (4.3), (4.9), (4.13), (4.17), (4.21), (4.25), (4.29) y (4.32) en una matriz:

$$\begin{pmatrix} a_1 a_2 a_3 + a_1 a_2 a_4 \\ + a_1 a_3 a_4 + a_2 a_3 a_4 \\ + a_1 a_2 a_3 a_4 a_{p,1}^0 \\ -(b_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -(a_1 a_2 a_4) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \left(b_1 + b_2 + b b_2 \frac{\dot{m} C_{p,f}}{\gamma H y H z} + b b_2 a_{p,f}^0 \right) & -(b_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(c_2 c_3) & \begin{pmatrix} c_1 c_2 + c_1 c_3 + c_2 c_3 \\ + c_1 c_2 c_3 a_{p,3}^0 \end{pmatrix} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(c_1 c_2) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Ec. (17) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Ec. (21) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Ec. (25) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(g_2) & -(g_1 + g_2 + g_1 g_2 a_{p,5}^0) & -(g_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(p_2) & (p_1 + p_2 + p_1 p_2 a_{p,6}^0) & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} a_2 a_3 a_4 T_{ext} + a_1 a_3 a_4 T_{sky} + a_1 a_2 a_3 T_3 + a_1 a_2 a_3 a_4 \alpha_1^* G_{solar} + a_1 a_2 a_3 a_4 a_{p,1}^0 T_1^0 \\ b b_2 \frac{\dot{m} C_{p,f}}{\gamma H y H z} T_{f,int} + b b_2 a_{p,f}^0 T_f \\ c_1 c_2 T_1 + c_1 c_2 \alpha_3^* \tau_1^* G_{solar} + c_1 c_2 c_3 a_{p,3}^0 T_3^0 \\ \vdots \\ \vdots \\ g_1 g_2 a_{p,5}^0 T_5^0 \\ p_1 T_{int} + p_1 p_2 a_{p,6}^0 T_6^0 \end{pmatrix} \tag{4.34}$$

La Ec. (4.34) es la representación general del sistema de ecuaciones resultante de los modelos de BE de la ChSo-OC incorporando un PCM y en estado transitorio. Previo a mostrar la metodología de solución se presenta el modelo físico de la ChSo-TC incorporando un PCM y el desarrollo del modelo matemático a partir de un análisis de BE.

4.2. Modelo físico y matemático de una ChSo-TC incorporando un PCM

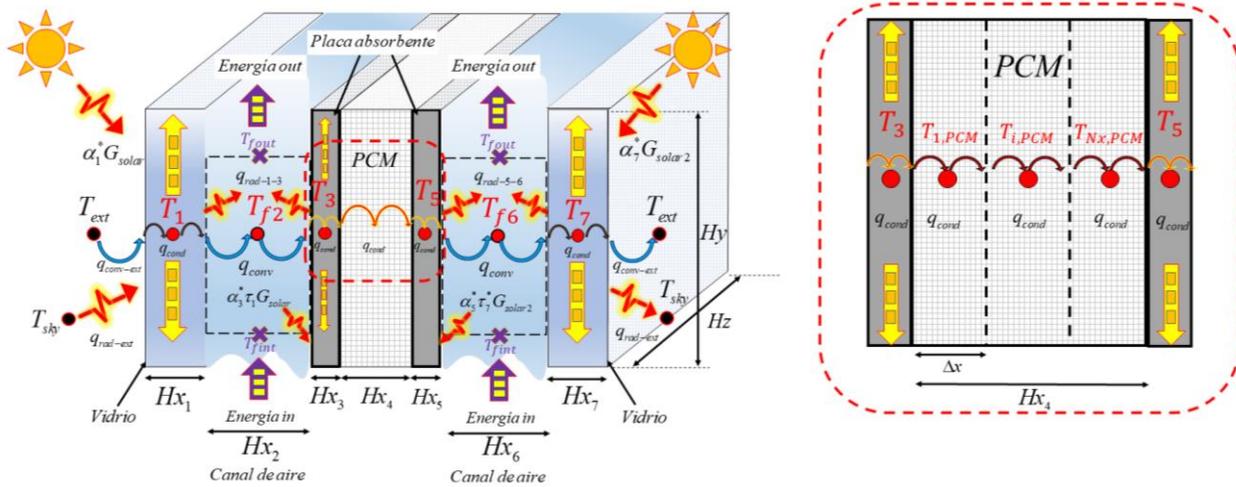


Figura 4.2. Modelo físico de ChSo-TC con PCM

De acuerdo con el modelo mostrado en la Fig. 4.2, el desarrollo del modelo matemático corresponde al igual que para el caso de la ChSo-OC el método del C_P -efect para el estudio del PCM así como un seccionamiento por capas o nodos de este elemento para evaluar el fenómeno de almacenamiento de energía térmica a través del tiempo. Por lo tanto, tomando en cuenta estas consideraciones generales, se presenta el desarrollo del modelo matemático para el estudio de la ChSo-TC en estado transitorio incorporando un PCM:

Elemento 1 (Cubierta de vidrio):

$$q_{entra,1} - q_{sale,1} = \frac{d}{dt} (\rho_1 C_{P,1} T_1) A \Delta x \tag{4.35}$$

$$\underbrace{\left(\frac{T_{ext} - T_1}{h_{conv-ext} + \frac{Hx_1}{2\lambda_1}}\right)}_{a_1} A_{int} + \underbrace{\left(\frac{T_{sky} - T_1}{h_{rad1}}\right)}_{a_2} A_{int} + \alpha_1^* G_{solar1} A_{int} - \underbrace{\left(\frac{T_1 - T_{f2}}{\frac{Hx_1}{2\lambda_1} + \frac{1}{h_{1-f2}}}\right)}_{a_3} A_{out} \quad (4.36)$$

$$- \underbrace{\left(\frac{T_1 - T_3}{h_{rad,1-3}}\right)}_{a_4} A_{out} = \underbrace{\left(\frac{\rho_1 C_{p,1} \Delta x}{\Delta t}\right)}_{a_{p,1}^0} A (T_1 - T_1^0) \quad A = A_{int} = A_{out}$$

$$\begin{aligned} & (a_1 a_2 a_3 + a_1 a_2 a_4 + a_1 a_3 a_4 + a_2 a_3 a_4 + a_1 a_2 a_3 a_4 a_{p,1}^0) T_1 - (a_1 a_2 a_4) T_{f2} \quad (4.37) \\ & = a_2 a_3 a_4 T_{ext} + a_1 a_3 a_4 T_{sky} + a_1 a_2 a_3 T_3 + a_1 a_2 a_3 a_4 \alpha_1^* G_{solar} + a_1 a_2 a_3 a_4 a_{p,1}^0 T_1^0 \end{aligned}$$

Donde:

$$a_1 = \frac{1}{h_{conv-ext}} + \frac{Hx_1}{2\lambda_1}; a_2 = \frac{1}{h_{rad1}}; a_3 = \frac{Hx_1}{2\lambda_1} + \frac{1}{h_{1-f}}; a_4 = \frac{1}{h_{rad,1-3}}; a_{p,1}^0 = \frac{\rho_1 C_{p,1} \Delta x}{\Delta t} \quad (4.38)$$

$$h_{rad1} = \sigma \varepsilon_1 (T_{sky}^2 + T_1^2) (T_{sky} + T_1) \quad (4.39)$$

$$h_{rad,1-3} = \frac{\sigma (T_1^2 + T_3^2) (T_1 + T_3)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_3} - 1} \quad (4.40)$$

Elemento 2 (fluido del canal 1):

$$q_{entra,f2} - q_{sale,f2} = \frac{d}{dt} (\rho_{f2} C_{p,f2} T_{f2}) A \Delta x \quad (4.41)$$

$$\begin{aligned} & \underbrace{\left(\frac{T_1 - T_{f2}}{\frac{Hx_1}{2\lambda_1} + \frac{1}{h_{1-f2}}}\right)}_{b_1} + \frac{\dot{m}_{int} C_{p,int} T_{f,int}}{HyHz} - \underbrace{\left(\frac{T_{f2} - T_3}{h_{f2-3} + \frac{Hx_3}{2\lambda_3}}\right)}_{b_2} - \frac{\dot{m}_{out} C_{p,out} T_{f,out}}{HyHz} \\ & = \underbrace{\left(\frac{\rho_{f2} C_{p,f2} \Delta x}{\Delta t}\right)}_{a_{p,f2}^0} (T_{f2} - T_{f2}^0) \quad (4.42) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -(b_2)T_1 + \left(b_1 + b_2 + b_1 b_2 \frac{\dot{m}_{f2} C_{P,f2}}{\gamma HyHz} + b_1 b_2 a_{P,f2}^0 \right) T_{f2} - (b_1)T_3 \\
& = b_1 b_2 \frac{\dot{m}_{f2} C_{P,f2}}{\gamma HyHz} T_{f,int} + b_1 b_2 a_{P,f2}^0 T_{f2}^0
\end{aligned} \tag{4.43}$$

De la misma forma que en el modelo de la ChSo-OC, se introduce el factor de promedio (γ) para las temperaturas de la entrada y salida en ambos canales. Los coeficientes de la Ec. (4.43) engloban:

$$b_1 = \frac{Hx_1}{2\lambda_1} + \frac{1}{h_{1-f2}} \quad b_2 = \frac{1}{h_{f2-3}} + \frac{Hx_3}{2\lambda_3} \quad a_{P,f2}^0 = \frac{\rho_{f2} C_{P,f2} \Delta x}{\Delta t} \tag{4.44}$$

Elemento 3 (placa metálica absorbente):

$$q_{entra,3} - q_{sale,3} = \frac{d}{dt} (\rho_3 C_{P,3} T_3) A \Delta x \tag{4.45}$$

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\left(\frac{T_{f2} - T_3}{\frac{1}{h_{f2-3}} + \frac{Hx_3}{2\lambda_3}} \right)}_{c_1} A_{int} + \underbrace{\left(\frac{T_1 - T_3}{h_{rad,1-3}} \right)}_{c_2} + \alpha_3^* \tau_1^* G_{solar} A_{int} - \underbrace{\left(\frac{T_3 - T_{1,PCM}}{\frac{Hx_3}{2\lambda_3} + \frac{\Delta x_{1,PCM}}{2\lambda_{1,PCM}}} \right)}_{c_3} A_{out} \\
& = \underbrace{\left(\frac{\rho_3 C_{P,3} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{P,3}^0} A (T_3 - T_3^0) \quad A = A_{int} = A_{out}
\end{aligned} \tag{4.46}$$

$$\begin{aligned}
& -(c_2 c_3) T_f + (c_1 c_2 + c_1 c_3 + c_2 c_3 + c_1 c_2 c_3 a_{P,3}^0) T_3 - (c_1 c_2) T_4 \\
& = c_1 c_3 T_1 + c_1 c_2 c_3 \alpha_3^* \tau_1^* G_{solar} + c_1 c_2 c_3 a_{P,3}^0 T_3^0
\end{aligned} \tag{4.47}$$

Donde:

$$c_1 = \frac{1}{h_{f2-3}} + \frac{Hx_3}{2\lambda_3} \quad c_2 = \frac{1}{h_{rad,1-3}} \quad c_3 = \frac{Hx_3}{2\lambda_3} + \frac{\Delta x_{1,PCM}}{2\lambda_{1,PCM}} \quad a_{P,3}^0 = \frac{\rho_3 C_{P,3} \Delta x}{\Delta t} \tag{4.48}$$

Para las ecuaciones correspondientes de cada capa del PCM, se considera conducción de calor entre las placas metálicas que fungen como contenedores y las capas de PCM adyacentes. Como se mencionó anteriormente, el método empleado para describir el fenómeno de conducción de calor en el PCM es el $C_{P-effect}$, de esta manera se contempla que el término de la entalpía de cambio de fase forma parte del término C_P en cada ecuación resultante al igual que el modelo de la ChSo-OC.

Elemento 4 (PCM) nodo 1:

$$q_{entra,1,PCM} - q_{sale,1,PCM} = \frac{d}{dt} (\rho_{1,PCM} C_{P,1,PCM} T_{1,PCM}) A \Delta x \quad (4.49)$$

$$\underbrace{\left(\frac{T_3 - T_{1,PCM}}{2\lambda_3} + \frac{\Delta x_{1,PCM}}{2\lambda_{1,PCM}} \right)}_{d_1} A_{int} - \underbrace{\left(\frac{T_{1,PCM} - T_{2,PCM}}{2\lambda_{1,PCM}} + \frac{\Delta x_{2,PCM}}{2\lambda_{2,PCM}} \right)}_{d_2} A_{out} \quad (4.50)$$

$$= \underbrace{\left(\frac{\rho_{1,PCM} C_{P,1,PCM} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{P,1,PCM}^0} A (T_{1,PCM} - T_{1,PCM}^0) \quad A = A_{int} = A_{out}$$

$$-(d_2)T_3 + (d_1 + d_2 + d_1 d_2 a_{P,1,PCM}^0)T_{1,PCM} - (d_1)T_{2,PCM} = d_1 d_2 a_{P,1,PCM}^0 T_{1,PCM}^0 \quad (4.51)$$

Donde:

$$d_1 = \frac{Hx_3}{2\lambda_3} + \frac{\Delta x_{1,PCM}}{2\lambda_{1,PCM}} \quad d_2 = \frac{\Delta x_{1,PCM}}{2\lambda_{1,PCM}} + \frac{\Delta x_{2,PCM}}{2\lambda_{2,PCM}} \quad a_{P,1,PCM}^0 = \frac{\rho_{1,PCM} C_{P,1,PCM} \Delta x}{\Delta t} \quad (4.52)$$

Elemento 4 (PCM) nodo i :

$$q_{entra,i,PCM} - q_{sale,i,PCM} = \frac{d}{dt} (\rho_{i,PCM} C_{P,i,PCM} T_{i,PCM}) A \Delta x \quad (4.53)$$

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\left(\frac{T_{i-1,PCM} - T_{i,PCM}}{\frac{\Delta x_{i-1,PCM}}{2\lambda_{i-1,PCM}} + \frac{\Delta x_{i,PCM}}{2\lambda_{i,PCM}}} \right)}_{e_1} A_{int} - \underbrace{\left(\frac{T_{i,PCM} - T_{i+1,PCM}}{\frac{\Delta x_{i,PCM}}{2\lambda_{i,PCM}} + \frac{\Delta x_{i+1,PCM}}{2\lambda_{i+1,PCM}}} \right)}_{e_2} A_{out} \\
& = \underbrace{\left(\frac{\rho_{i,PCM} C_{P,i,PCM} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{P,i,PCM}^0} A (T_{i,PCM} - T_{i,PCM}^0) \quad A = A_{int} = A_{out}
\end{aligned} \tag{4.54}$$

$$-(e_2)T_{i-1} + (e_1 + e_2 + e_1 e_2 a_{P,i,PCM}^0)T_{i,PCM} - (e_1)T_{i+1,PCM} = e_1 e_2 a_{P,i,PCM}^0 T_{i,PCM}^0 \tag{4.55}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
e_1 &= \frac{\Delta x_{i-1,PCM}}{2\lambda_{i-1,PCM}} + \frac{\Delta x_{i,PCM}}{2\lambda_{i,PCM}} & e_2 &= \frac{\Delta x_{i,PCM}}{2\lambda_{i,PCM}} + \frac{\Delta x_{i+1,PCM}}{2\lambda_{i+1,PCM}} \\
a_{P,i,PCM}^0 &= \frac{\rho_{i,PCM} C_{P,i,PCM} \Delta x}{\Delta t}
\end{aligned} \tag{4.56}$$

Elemento 4 (PCM) nodo Nx :

$$q_{entra,Nx,PCM} - q_{sale,Nx,PCM} = \frac{d}{dt} (\rho_{Nx,PCM} C_{P,Nx,PCM} T_{Nx,PCM}) A \Delta x \tag{4.57}$$

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\left(\frac{T_{Nx-1,PCM} - T_{Nx,PCM}}{\frac{\Delta x_{Nx-1,PCM}}{2\lambda_{Nx-1,PCM}} + \frac{\Delta x_{Nx,PCM}}{2\lambda_{Nx,PCM}}} \right)}_{f_1} A_{int} - \underbrace{\left(\frac{T_{Nx,PCM} - T_5}{\frac{\Delta x_{Nx,PCM}}{2\lambda_{Nx,PCM}} + \frac{Hx_5}{2\lambda_5}} \right)}_{f_2} A_{out} \\
& = \underbrace{\left(\frac{\rho_{Nx,PCM} C_{P,Nx,PCM} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{P,Nx,PCM}^0} A (T_{Nx,PCM} - T_{Nx,PCM}^0) \quad A = A_{int} = A_{out}
\end{aligned} \tag{4.58}$$

$$-(f_2)T_{Nx-1} + (f_1 + f_2 + f_1 f_2 a_{P,Nx,PCM}^0)T_{Nx,PCM} - (f_1)T_{Nx+1,PCM} = f_1 f_2 a_{P,Nx,PCM}^0 T_{Nx,PCM}^0 \tag{4.59}$$

Donde:

$$f_1 = \frac{\Delta x_{N_x-1,PCM}}{2\lambda_{N_x-1,PCM}} + \frac{\Delta x_{N_x,PCM}}{2\lambda_{N_x,PCM}} \quad f_2 = \frac{\Delta x_{N_x,PCM}}{2\lambda_{N_x,PCM}} + \frac{Hx_5}{2\lambda_5} \quad (4.60)$$

$$a_{P,N_x,PCM}^0 = \frac{\rho_{N_x,PCM} C_{P,N_x,PCM} \Delta x}{\Delta t}$$

Elemento 5 (placa metálica absorbente):

$$q_{entra,5} - q_{sale,5} = \frac{d}{dt} (\rho_5 C_{P,5} T_5) A \Delta x \quad (4.61)$$

$$\underbrace{\left(\frac{T_{N_x,PCM} - T_5}{\frac{\Delta x_{N_x,PCM}}{2\lambda_{N_x,PCM}} + \frac{Hx_5}{2\lambda_5}} \right)}_{g_1} A_{int} + \alpha_5^* \tau_7^* G_{solar2} A_{int} - \underbrace{\left(\frac{T_5 - T_{f6}}{\frac{Hx_5}{2\lambda_5} + \frac{1}{h_{5-f6}}} \right)}_{g_2} A_{out} - \underbrace{\left(\frac{T_5 - T_7}{\frac{1}{h_{rad,5-7}}} \right)}_{g_3} A_{out} \quad (4.62)$$

$$= \underbrace{\left(\frac{\rho_5 C_{P,5} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{P,5}^0} A (T_5 - T_5^0) \quad A = A_{int} = A_{out}$$

$$-(g_2 g_3) T_{N_x,PCM} + (g_1 g_2 + g_1 g_3 + g_2 g_3 + g_1 g_2 g_3 a_{P,5}^0) T_5 - (g_1 g_3) T_{f6} \quad (4.63)$$

$$= g_1 g_2 T_5 + g_1 g_2 g_3 \alpha_5^* \tau_7^* G_{solar2} + g_1 g_2 g_3 a_{P,5}^0 T_5^0$$

$$g_1 = \frac{\Delta x_{N_x,PCM}}{2\lambda_{N_x,PCM}} + \frac{Hx_5}{2\lambda_5} \quad g_2 = \frac{Hx_5}{2\lambda_5} + \frac{1}{h_{5-f6}} \quad g_3 = \frac{1}{h_{rad,5-7}} \quad (4.64)$$

$$a_{P,5}^0 = \frac{\rho_5 C_{P,5} \Delta x}{\Delta t}$$

Elemento 6 (fluido del canal 2):

$$q_{entra,f6} - q_{sale,f6} = \frac{d}{dt} (\rho_{f6} C_{P,f6} T_{f6}) A \Delta x \quad (4.65)$$

$$\frac{T_5 - T_{f6}}{\underbrace{\left(\frac{Hx_5}{2\lambda_5} + \frac{1}{h_{5-f6}} \right)}_{p_1}} + \frac{\dot{m}_{int6} C_{P6,int} T_{f,int}}{HyHz} - \frac{T_{f6} - T_7}{\underbrace{\left(\frac{1}{h_{f6-7}} + \frac{Hx_7}{2\lambda_7} \right)}_{p_2}} - \frac{\dot{m}_{out6} C_{P6,out} T_{f,out}}{HyHz} =$$

$$\underbrace{\left(\frac{\rho_{f6} C_{Pf6} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{p,f6}^0} (T_{f6} - T_{f6}^0) - (p_2)T_5 + \left(p_1 + p_2 + p_1 p_2 \frac{\dot{m}_{f6} C_{P,f6}}{\gamma HyHz} + p_1 p_2 a_{p,f6}^0 \right) T_{f6} - (p_1)T_7$$

$$= p_1 p_2 \frac{\dot{m}_{f6} C_{P,f6}}{\gamma HyHz} T_{f6,int} + p_1 p_2 a_{p,f6}^0 T_{f6}^0$$

$$p_1 = \frac{Hx_5}{2\lambda_5} + \frac{1}{h_{5-f6}} \quad p_2 = \frac{1}{h_{f6-7}} + \frac{Hx_7}{2\lambda_7} \quad a_{p,f6}^0 = \frac{\rho_{f6} C_{Pf6} \Delta x}{\Delta t}$$

Elemento 7 (cubierta de vidrio):

$$q_{entra,7} - q_{sale,7} = \frac{d}{dt} (\rho_7 C_{P,7} T_7) A \Delta x$$

$$\frac{T_{f6} - T_7}{\underbrace{\left(\frac{1}{h_{f6-7}} + \frac{Hx_7}{2\lambda_7} \right)}_{r_1}} A_{int} + \frac{T_5 - T_7}{\underbrace{\left(\frac{1}{h_{rad,5-7}} \right)}_{r_2}} A_{int} + \alpha_7^* G_{solar2} A_{int} - \frac{T_7 - T_{ext}}{\underbrace{\left(\frac{Hx_7}{2\lambda_7} + \frac{1}{h_{conv-ext} + h_{rad,7}^*} \right)}_{r_3}} A_{out}$$

$$- \frac{T_7 - T_{sky}}{\underbrace{\left(\frac{1}{h_{rad,7}} \right)}_{r_4}} A_{out} = \underbrace{\left(\frac{\rho_7 C_{P,7} \Delta x}{\Delta t} \right)}_{a_{p,7}^0} (T_7 - T_7^0) \quad A = A_{int} = A_{out}$$

$$-(r_2 r_3 r_4) T_{f6} + (r_1 r_2 r_3 + r_1 r_2 r_4 + r_1 r_3 r_4 + r_2 r_3 r_4 + r_1 r_2 r_3 r_4 a_{p,7}^0) T_7$$

$$= r_1 r_3 r_4 T_5 + r_1 r_2 r_4 T_{ext} + r_1 r_2 r_3 T_{sky} + r_1 r_2 r_3 r_4 \alpha_7^* G_{solar2} + r_1 r_2 r_3 r_4 a_{p,7}^0 T_7^0$$

$$r_1 = \frac{1}{h_{f6-7}} + \frac{Hx_7}{2\lambda_7}; r_2 = \frac{1}{h_{rad,5-7}}; r_3 = \frac{Hx_7}{2\lambda_7} + \frac{1}{h_{conv-ext}}; r_4 = \frac{1}{h_{rad,7}}; a_{p,7}^0 = \frac{\rho_7 C_{P,7} \Delta x}{\Delta t}$$

4.3. Metodología de solución

La metodología de solución para los sistemas de ecuaciones correspondientes a los modelos de chimenea solar de un canal y dos canales introduciendo PCM en estado transitorio, Ecs. (4.34) y (4.73), se presenta a continuación. El diagrama de flujo presente es aplicable para ambos modelos desarrollados.

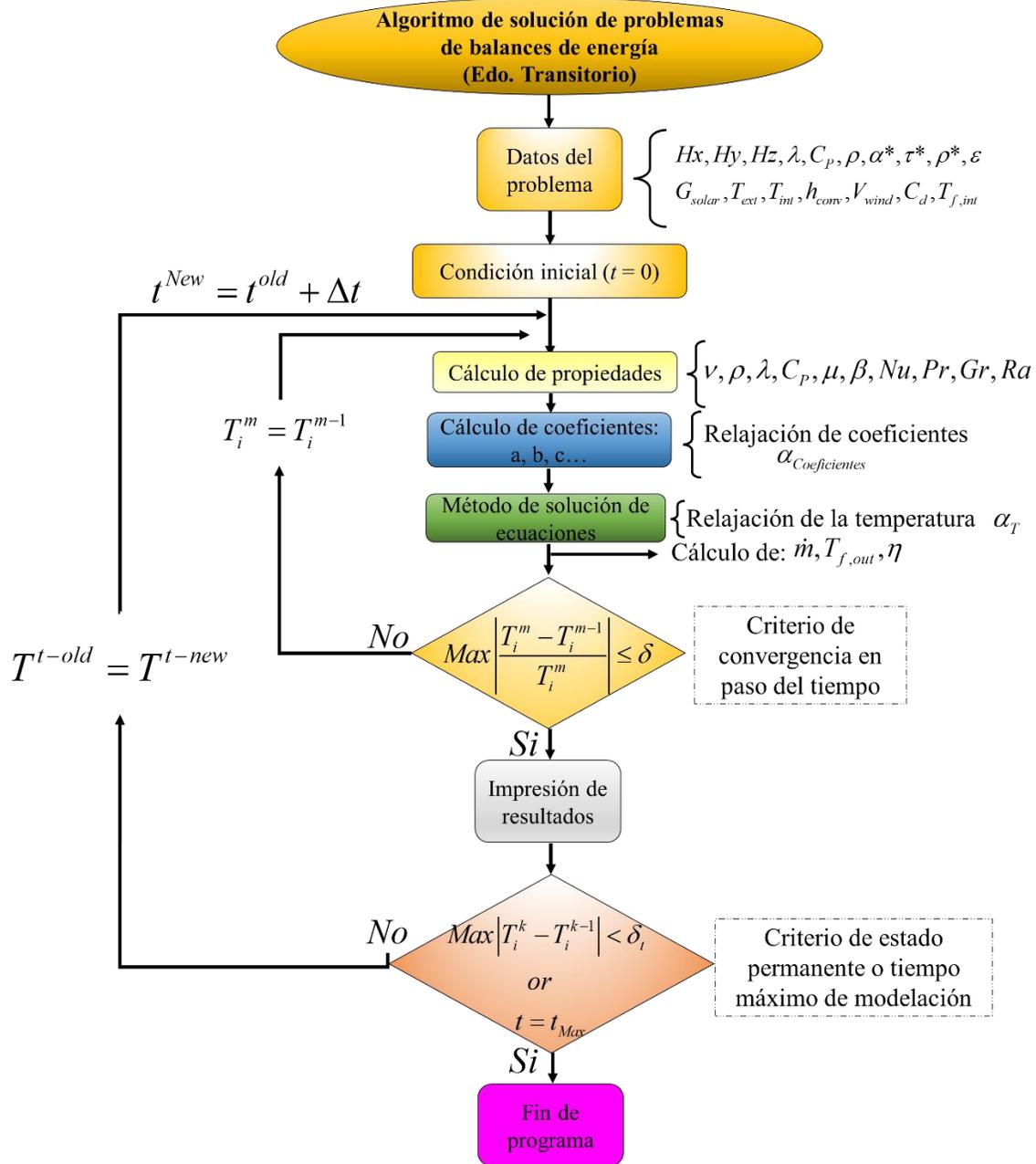


Figura 4.3. Diagrama de flujo de la solución numérica

De acuerdo con el diagrama de flujo, en la metodología se incorporan dos formas de relajación: relajación en coeficientes y relajación de la variable temperatura. De esta manera, se asegura que la convergencia de la solución numérica permita obtener resultados satisfactorios que correspondan al fenómeno de estudio.

Además de realizar el cálculo de las propiedades del aire en cada iteración y paso del tiempo, se incluye el cálculo de las propiedades del PCM de acuerdo con el método de $C_{P\text{-efect}}$. Posteriormente, se realiza el cálculo de los coeficientes de la matriz y finalmente la implementación del método de solución de ecuaciones, el cual para estos modelos se contempla la implementación del método iterativo Jacobi.

Aunque el diagrama de flujo contempla un criterio de estado permanente, este criterio solo se tomó en cuenta para la realización de ejercicios de prueba ya que el objetivo del modelo es el estudio del sistema pasivo bajo condiciones climáticas reales en el que solo importa el análisis del fenómeno en el tiempo de modelación establecido y no cuando el sistema ha alcanzado el estado permanente. Sin embargo, el criterio de convergencia del ciclo interno para la solución en cada paso del tiempo debe vigilarse constantemente para determinar si la solución no presenta oscilaciones en el valor del residual que afecten a la solución numérica, de ahí la importancia de una técnica de relajación de la solución.

El proceso de relajación de los coeficientes se expresa como:

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{cccccc}
 \frac{(a_1 + a_2 + a_{p0}a_1a_2)}{\alpha_{coeficientes}} & (-a_2) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \vdots & \ddots & \ddots & 0 & 0 & 0 \\
 0 & (-b_1) & \frac{(b_1 + b_2 + a_{p0}b_1b_2)}{\alpha_{coeficientes}} & (-b_2) & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\
 0 & 0 & 0 & (-c_1) & \frac{(c_1 + c_2 + a_{p0}c_1c_2)}{\alpha_{coeficientes}} & 0
 \end{array} \right] \begin{bmatrix} T_1 \\ \vdots \\ T_i \\ \vdots \\ T_{Nx} \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} \left(a_1T_A + a_{p0}a_1a_2T_1^0 \right) + \left(1 - \alpha_{coeficientes} \right) \frac{a_p}{\alpha_{coeficientes}} T_1^{m-1} \\ \vdots \\ \left(a_{p0}b_1b_2T_i^0 \right) + \left(1 - \alpha_{coeficientes} \right) \frac{a_p}{\alpha_{coeficientes}} T_i^{m-1} \\ \vdots \\ \left(c_2T_B + a_{p0}c_1c_2T_{Nx}^0 \right) + \left(1 - \alpha_{coeficientes} \right) \frac{a_p}{\alpha_{coeficientes}} T_{Nx}^{m-1} \end{bmatrix} \tag{4.74}
 \end{aligned}$$

El tratamiento matemático de relajación para la variable T , se aplica justo después de obtener los nuevos valores de temperatura al aplicar el método de solución de ecuaciones. Por lo tanto, la relajación de la variable T se expresa como:

$$T_i^\alpha = T_i^{m-1} + \alpha_T (T_i^m - T_i^{m-1}) \tag{4.75}$$

Donde m corresponde al valor de la variable recién calculado y $m-1$ corresponde al valor de la iteración anterior.

Algunos aspectos que se han pasado por alto en la metodología general es el cálculo o lectura de los datos de entrada como radiación solar, temperatura del medio y la velocidad del viento, ya que estos parámetros serán evaluados en otra prueba posterior a la validación de los modelos aquí presentados para llevar a cabo el estudio paramétrico correspondiente.

4.4. Implementación de la solución numérica

Los modelos de la ChSo-OC y ChSo-TC se transcribieron en un código computacional desarrollado en el lenguaje de programación ANSI-C. Todas las modelaciones computacionales se llevaron a cabo en una plataforma computacional: computadora con procesador Intel Core i5-7700K con 4.2GHz y 16GB de RAM, en un sistema operativo GNU/Linux (Ubuntu 20.02 de 64 bits).

4.4.1. Parámetros generales para la implementación de los modelos matemáticos

Los parámetros generales para la evaluación de la ChSo-OC y la ChSo-TC se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Parámetros para el estudio de la ChSo-OC

Cubierta de vidrio					Pared absorbente				Aislante		
H_x [m]	ϵ [-]	α^* [-]	τ^* [-]	λ [W/m ² K]	H_x [m]	ϵ [-]	α^* [-]	λ [W/m ² K]	H_x [m]	ϵ [-]	λ [W/m ² K]
0.006	0.9	0.06	0.84	1.177	0.002	0.9	0.9	60.50	0.02	0.94	0.00017+0.0262
C_p [J/kgK]		ρ [kg/m ³]			C_p [J/kgK]		ρ [kg/m ³]		C_p [J/kgK]		ρ [kg/m ³]
837.0		2413.0			432.0		7854.0		1470.0		25.0

Nota: Datos obtenidos de Incropera y DeWitt (1996), Kumaran (1996), CENAM (2003), Arce et al. (2013)

Los valores de los coeficientes convectivos en los canales de aire, así como las propiedades del aire se calcularon con las relaciones presentes a continuación:

$$h_{conv-ext} = 2.8 + 3.0V_{wind} \tag{4.76}$$

La Ec. (4.76) corresponde a la **ASHRAE (1982)** para la determinación del coeficiente convectivo al exterior de la chimenea solar mientras que para el interior del canal se emplean los parámetros adimensionales como el Nusselt, Prandtl, Rayleigh y Grashof:

Nusselt en flujo laminar ($Ra < 10^9$) (**Incropera y Dewitt, 1996**):

$$Nu = 0.68 + \frac{(0.67Ra^{1/4})}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \tag{4.77}$$

Para flujo turbulento ($Ra > 10^9$):

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{(0.387 Ra^{1/6})}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (4.78)$$

Donde:

$$Ra = Gr Pr \quad (4.79)$$

$$Pr = \frac{C_{p,f} \mu_f}{\lambda_f} \quad (4.80)$$

$$Gr = \frac{g \beta_f |T_3 - T_f| L_i^3}{\nu_f^2} \quad (4.81a)$$

$$Gr = \frac{g \beta_f |T_1 - T_f| L_i^3}{\nu_f^2} \quad (4.81b)$$

$$\nu_f = \frac{\mu_f}{\rho_f} \quad (4.82)$$

Y a partir del cálculo del Nu correspondiente, se pueden estimar los coeficientes convectivos al interior del canal como:

$$h_{w-f} = \frac{Nu_{w-f} \lambda_f}{L_i} \quad (4.83a)$$

$$h_{f-w} = \frac{Nu_{f-w} \lambda_f}{L_i} \quad (4.83b)$$

Las siguientes relaciones reportadas por **Arce et al. (2013)** son aplicables para un intervalo de temperatura mayor el cual es de 250 a 400 K:

$$\mu_f = \left[2.2078 T_f^{0.7756} \right] \times 10^{-7} \quad (4.84a)$$

$$\rho_f = 351.9/T_f \quad (4.84b)$$

$$\lambda_f = [0.1723 T_f^{0.8812}] \times 10^{-3} \quad (4.84c)$$

$$C_{p,f} = [0.9125 T_f^{0.0174}] \times 10^3 \quad (4.84d)$$

$$\beta_f = 1/T_f \quad (4.84e)$$

Adicionalmente, en el Capítulo 5 se presentan los valores de los parámetros de los materiales masivos, así como las variaciones geométricas consideradas para el estudio.

El flujo de aire inducido por este tipo de sistemas se estima a partir de relaciones que han sido propuestas en la literatura para canales verticales. Por lo tanto, para el cálculo del flujo másico (**Bansal et al., 1993**) y flujo volumétrico:

$$\dot{m} = Cd \frac{\rho_{f,out} A_o}{\sqrt{1 + A_r}} \sqrt{\frac{2gL(T_f - T_{room})}{T_{room}}} \quad (4.85)$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho_{f,out}} \quad (4.86)$$

La exactitud de los modelos de balance de energía depende principalmente de las relaciones empíricas para la estimación de los coeficientes convectivos reportados en la literatura. Tales relaciones se obtienen a partir de la medición experimental de variables como la temperatura, presión y humedad relativa en zonas locales donde se analiza el fenómeno. En cuanto a los modelos de chimenea solar, muros Trombe y captadores solares, las relaciones para coeficientes convectivos generalmente no hacen distinción más que para ciertos intervalos de temperatura dejando a un lado la humedad relativa del aire incluso la presión atmosférica donde se encuentra ubicado el experimento. De la misma forma, para la determinación de las propiedades del aire al interior del canal como la densidad.

En cuanto a las aplicaciones de chimeneas solares, **Ong (2003)** reportó un conjunto de relaciones empíricas para determinar propiedades como viscosidad dinámica, conductividad térmica, calor específico, coeficiente de expansión y densidad del aire. Tales relaciones aún son empleadas a la fecha en los trabajos teóricos de BE. **Arce et al. (2013)** presentaron un

conjunto de relaciones para determinar las mismas propiedades que son empleadas en los modelos de balance de energía, así como en otros métodos numéricos, en contraste de las relaciones reportadas por **Ong (2003)**, el intervalo de temperaturas aplicables de las relaciones de **Arce et al. (2013)** es mayor, lo cual permite tener un mayor espectro de aplicación al momento de evaluar configuraciones cuyas condiciones ambientales sean más extremas. Sin embargo, algo que presentan en común ambos conjuntos de relaciones, es que dependen directamente de la temperatura del fluido, haciendo a un lado variables como la presión atmosférica y la humedad relativa.

A continuación, se describe el proceso del cálculo de la densidad del aire tomando en cuenta la temperatura puntual de medición, la humedad relativa del medio y la presión atmosférica los cuales fueron considerados en el presente estudio. Esta metodología es reportada por el Centro Nacional de Metrología (**CENAM, 2013**).

El primer paso es calcular la presión de vapor saturado P_{sv} :

$$P_{sv} = 1 Pa \times e^{\left(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T} \right)} \quad (4.87)$$

$$A = 1.237\ 8847 \times 10^{-5} K^{-2}$$

$$B = -1.912\ 131\ 6 \times 10^{-2} K^{-1}$$

$$C = 33.937\ 110\ 47$$

$$D = -6.343\ 164\ 5 \times 10^{-3} K$$

Donde T es la temperatura del aire en K o temperatura de punto de roción T_r en K.

Al mismo tiempo se requiere obtener el factor de fugacidad f a partir de la temperatura del aire. Esto es necesario para estimar la fracción molar del vapor de agua x_v .

$$f = \alpha + \beta P + \gamma T^2 \quad (4.88)$$

$$\alpha = 1.000\ 62$$

$$\beta = 3.14 \times 10^{-8} Pa^{-1}$$

$$\gamma = 5.6 \times 10^{-7} K^{-2}$$

Donde P es la presión del aire en Pa y T es la temperatura del aire en °C. Por lo tanto, teniendo en cuenta la presión de saturación y el factor de fugacidad se debe estimar la fracción molar de vapor de agua con el uso de otros datos como la humedad relativa y la presión del aire.

$$x_v = Hr \times f \times \frac{P_{sv}}{P} \quad (4.89)$$

La variable Hr corresponde a la humedad relativa del aire. El siguiente paso es calcular el factor de compresibilidad Z :

$$Z = 1 - \frac{P}{T} \left[a_0 + a_1(T + 273.15) + a_2(T + 273.15)^2 + (b_0 + b_1(T + 273.15))x_v + (c_0 + c_1(T + 273.15))x_v^2 \right] + \frac{P^2}{T^2} (d + ex_v^2) \quad (4.90)$$

$$a_0 = 1.58123 \times 10^{-6} K Pa^{-1}$$

$$a_1 = -2.9331 \times 10^{-8} K^{-1} Pa^{-1}$$

$$a_2 = 1.1043 \times 10^{-10} K^{-1} Pa^{-1}$$

$$b_0 = 5.707 \times 10^{-6} K Pa^{-1}$$

$$b_1 = -2.051 \times 10^{-8} Pa^{-1}$$

$$c_0 = 1.9898 \times 10^{-4} K Pa^{-1}$$

$$c_1 = -2.376 \times 10^{-6} Pa^{-1}$$

$$d = 1.83 \times 10^{-11} K^2 Pa^{-2}$$

$$e = -0.765 \times 10^{-8} K^2 Pa^{-2}$$

Donde T es la temperatura del aire en K y P es la presión atmosférica en Pa. Otro parámetro necesario es la constante universal de los gases ideales cuyo valor con su desviación es de $R = 8.314510 \pm 8.4 \times 10^{-6} J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$. Además de la constante universal, se requiere el valor de la masa molar de aire seco, el cual es un promedio de las masas molares de sus diferentes componentes y de sus respectivas fracciones molares x_i . Si la composición del aire se supone constante, la masa molar de aire seco es $M_a = 0.028963512440 kg \cdot mol^{-1}$. Este valor se debe estimar de nuevo en caso de contar con la medición de concentración de CO_2 presente en el aire para obtener un valor más exacto.

Finalmente, la densidad del aire se obtiene a partir de la ecuación de estado y al sustituir los parámetros antes presentados queda la expresión:

$$\rho_{aire} = \frac{PM_a}{ZRT} \left[1 - x_v \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right] \quad (4.91)$$

La incertidumbre relativa de la Ec. 4.89 es de $\pm 1 \times 10^{-4} \text{ kgm}^{-3}$.

En el siguiente capítulo se muestran los ejercicios de verificación de los modelos teóricos de la chimenea solar y la validación con los datos obtenidos a partir de la evaluación experimental.

CAPÍTULO 5

VALIDACIÓN DE MODELOS DE BALANCES GLOBALES

En este capítulo se presenta la verificación y validación de los modelos de chimenea solares desarrollados. De igual forma, se añade un ejercicio de verificación para el análisis de la conducción de calor en PCM. Se presenta una descripción de los casos considerados durante la evaluación experimental para validar los modelos de la ChSo-OC en estado transitorio.

5.1.Familiarización y verificación de modelo de chimenea solar de Ong (2003)

Como parte de los ejercicios de familiarización de los modelos de balance de energía, se desarrolló la verificación del modelo de chimenea solar de un canal reportado por Ong (2003) para verificar la metodología de solución e incorporarla en los modelos propuestos que después fueron validados con los datos experimentales obtenidos. El modelo de Ong (2003) fue validado con los datos experimentales reportados por Hirunlabh et al. (1999). El modelo de Ong (2003) no considera el efecto de la conducción de calor a través del elemento semitransparente, ni el intercambio radiativo de la superficie interior del elemento aislante con el interior de la habitación; contraste a los modelos propuestos de ChSo-OC y ChSo-TC que si consideran estos fenómenos. En la Fig. 5.1 se muestra el modelo físico de la chimenea solar con las consideraciones del estudio de Ong (2003).

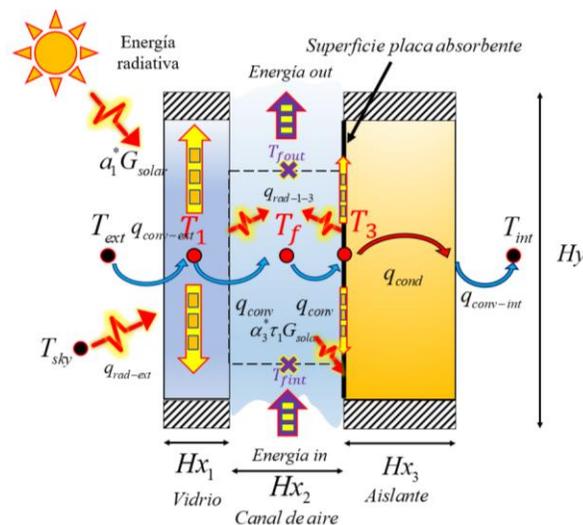


Figura 5.1. Modelo físico de la ChSo-OC

Parte de la verificación consistió en un análisis paramétrico de la altura y espesor del canal de la chimenea solar, hasta una longitud total de 4 m. En la Fig. 5.2 se presentan los resultados obtenidos a diferentes alturas de la chimenea solar.

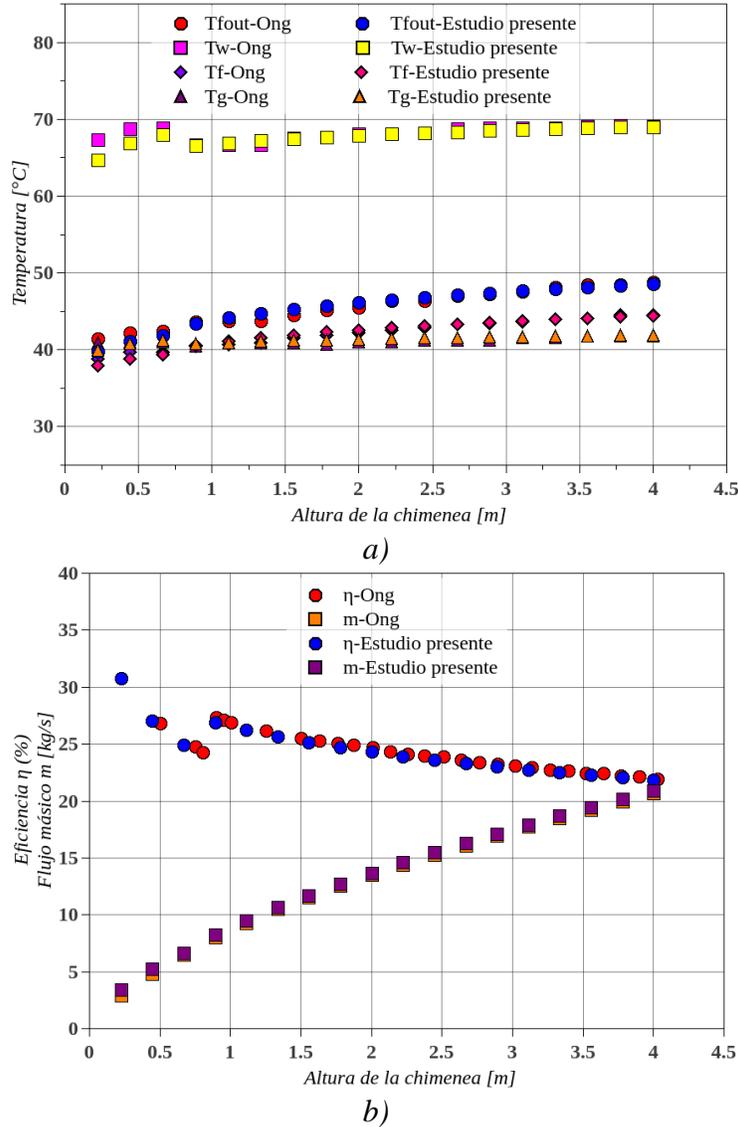


Figura 5.2. Efecto de la altura de la chimenea solar sobre la: a) temperaturas en el sistema y b) flujo másico y eficiencia

En la Fig 5.2 se observan diferencias mínimas que permiten concluir que la solución es satisfactoria. Las variaciones observadas en el primer metro de altura de la chimenea solar se deben a errores de truncamiento para determinar los coeficientes convectivos durante el cálculo de los coeficientes del sistema de ecuaciones. Se observa una tendencia de incremento del flujo másico conforme se aumenta la longitud del canal, variable que se desea

optimizar para efectos de ventilación; sin embargo, tal como se muestra en la Fig. 5.2(b) la eficiencia del sistema tiende a decrecer hasta acercarse al 20%, lo cual describe como la energía se pierde hacia el entorno. En la Tabla 5.1 se presenta una comparación de los valores de temperatura y flujo másico de forma cuantitativa al dividirse la altura de la chimenea en 18 secciones, para aumentar el registro de los resultados obtenidos con la modelación.

Tabla 5.1. Comparación de los estudios de chimenea solar de un canal para una radiación constante ($G_{solar}=400 \text{ W m}^{-2}$)

y [m]	Ong 2003					Estudio presente				
	T_g [°C]	T_f [°C]	T_w [°C]	$T_{f,out}$ [°C]	\dot{m} [kg/s]	T_g o T_l [°C]	T_f [°C]	T_w o T_3 [°C]	$T_{f,out}$ [°C]	\dot{m} [kg/s]
0.22	40.87	38.80	67.36	41.40	2.92	39.95	37.90	64.68	39.86	3.46
0.44	41.05	39.66	68.75	42.24	4.86	40.76	38.82	66.85	41.10	5.25
0.67	41.05	39.66	68.92	42.42	6.54	41.21	39.41	68.05 (1.26)	41.87	6.68
0.89	40.52	40.52	66.68	43.63	8.01	40.81	40.61	66.52	43.47	8.28 (3.39)
1.11	40.87	40.70	66.68	43.80	9.32	40.95	41.12	66.90	44.16	9.52
1.33	40.87	40.90	66.68	43.80	10.50	41.08	41.56 (1.61)	67.21	44.75 (2.16)	10.66
1.56	40.87	41.56	67.54	44.50	11.57	41.18	41.94	67.47	45.26	11.73
1.78	40.70	41.91	67.71	45.18	12.57	41.28 (1.42)	42.28	67.69	45.71	12.74
2.00	41.05	42.24	68.06	45.51	13.52	41.36	42.59	67.89	46.12	13.70
2.22	41.05	42.60	68.06	46.37	14.41	41.45	42.85	68.07	46.46	14.60
2.44	41.20	42.93	68.22	46.37	15.28	41.53	43.10	68.22	46.80	15.48
2.67	41.20	43.28	68.75	47.07	16.12	41.59	43.34	68.37	47.11	16.33
2.89	41.20	43.45	68.92	47.23	16.94	41.65	43.55	68.50	47.41	17.14
3.11	41.56	43.63	68.92	47.60	17.74	41.71	43.76	68.62	47.68	17.93
3.33	41.56	43.96	68.92	48.11	18.51	41.77	43.95	68.74	47.93	18.70
3.56	41.73	44.14	69.08	48.44	19.27	41.82	44.13	68.84	48.17	19.45
3.78	41.73	44.50	69.25	48.44	19.99	41.86	44.30	68.95	48.40	20.18
4.00	41.73	44.50	69.08	48.79	20.69	41.91	44.47	69.04	48.62	20.89

Nota: Los valores entre paréntesis indican el porcentaje máximo de diferencia entre el parámetro correspondiente y el reportado en la literatura.

Las diferencias máximas en los valores de temperatura reportados no alcanzaron el 2.5% de diferencia y la diferencia máxima del flujo másico fue de 3.4%, lo que permite concluir que el modelo de ChSo-OC y la metodología para su solución son correctos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el estudio paramétrico donde la longitud de la chimenea solar se mantiene constante a 2 m, pero la radiación solar varía desde 100 hasta los 600 Wm^{-2} .

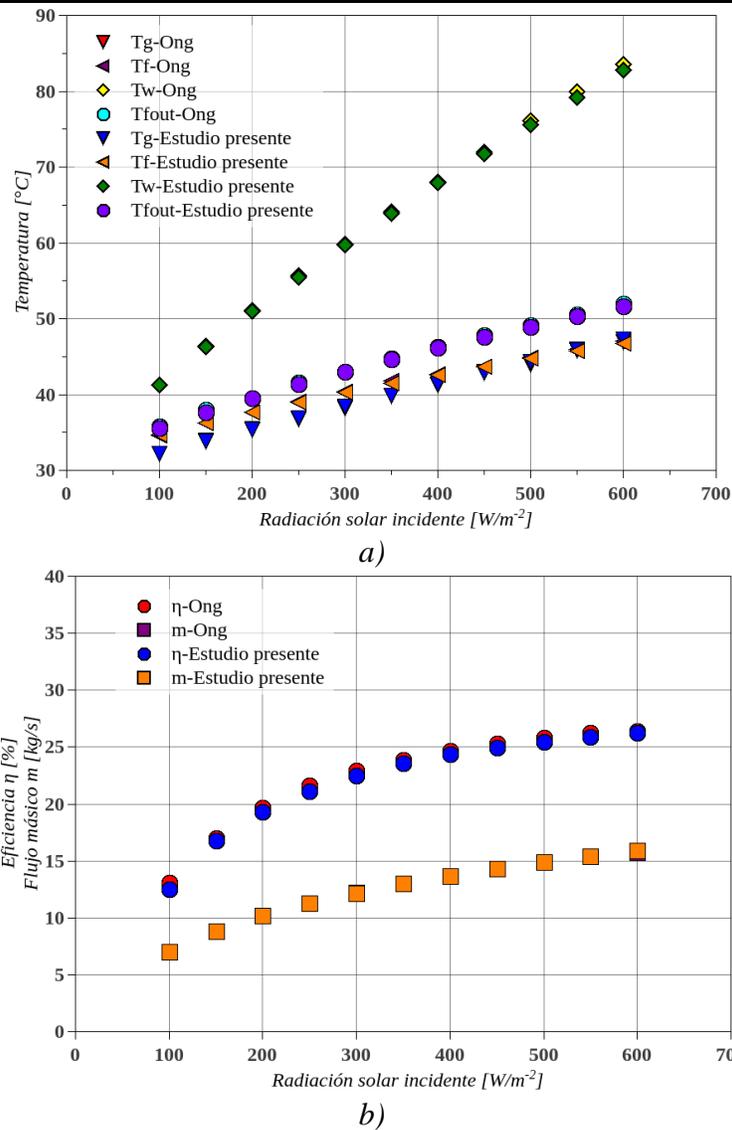


Figura 5.3. Efecto de la radiación solar sobre la: a) Temperaturas en el sistema y b) flujo másico y eficiencia

Como se observa en la Fig. 5.3, a pesar de que la temperatura de la placa absorbente muestra un incremento de forma lineal conforme aumenta la radiación, este patrón no se observa con el flujo másico, ya que conforme mayor sea la radiación solar, los incrementos en el flujo másico disminuyen y, por lo tanto, su eficiencia también.

En la Tabla 5.2, se presenta una comparación cuantitativa de las soluciones presentadas en este trabajo como el reportado en la literatura al variar la radiación solar.

Tabla 5.2. Comparación de los estudios de chimenea solar de un canal a radiación solar variable

G_{solar} [W m ⁻²]	Ong 2003					Estudio presente				
	T_g [°C]	T_f [°C]	T_w [°C]	$T_{f,out}$ [°C]	\dot{m} [kg/s]	T_g o T_l [°C]	T_f [°C]	T_w o T_3 [°C]	$T_{f,out}$ [°C]	\dot{m} [kg/s]
100.00	32.17	34.57	41.27	35.78	7.01	32.18	34.65	41.28	35.54	7.03
150.00	33.89	36.28	46.42	38.00	8.82	33.79	36.23	46.29	37.64 (0.94)	8.84
200.00	35.43	37.67	51.06	39.56	10.22	35.35	37.66	51.00	39.55	10.17
250.00	36.81	39.03	55.70	41.60	11.32	36.88	38.99	55.47	41.32	11.26
300.00	38.17	40.42	59.83	42.99	12.22	38.39	40.24	59.76	42.99	12.18
350.00	39.89	41.78	64.12	44.70	12.99	39.86	41.46	63.89	44.62	13.00
400.00	41.27	42.64	68.08	46.24	13.67	41.36	42.59	67.89	46.12	13.70
450.00	42.99	43.67	72.01	47.80	14.31	42.85	43.68	71.77	47.57	14.33
500.00	44.02	44.88	76.15	49.17	14.89	44.33	44.72	75.54	48.96	14.91
550.00	45.91	45.91	79.93	50.55	15.40	45.82	45.72	79.22 (0.89)	50.30	15.44
600.00	46.95	47.10	83.53	51.92	15.80	47.30 (0.74)	46.70 (0.84)	82.81	51.60	15.93 (0.81)

Nota: Los valores entre paréntesis indican el porcentaje máximo de diferencia entre el parámetro correspondiente y el reportado en la literatura.

Las diferencias porcentuales máximas fueron menores al 1%. Por lo tanto, se establece que el algoritmo de solución es satisfactorio para su implementación en los modelos propuestos de chimeneas solares de uno y doble canal.

5.2. Verificación de la transferencia de calor por conducción en materiales de cambio de fase

Como parte de los objetivos de esta tesis se realizó un ejercicio de verificación del modelo de conducción de calor en materiales de cambio de fase a través de modelos de BE. Para esta actividad se tomaron en cuenta el caso y los datos reportados por **Solomon (1979)** y **Arici et al. (2018)** empleando el método de C_P efectivo. El problema consiste en evaluar el comportamiento de la transferencia de calor por conducción en estado transitorio de un PCM en la dirección x sometido a condiciones de primera clase. Las propiedades del PCM se muestran en la Tabla 5.3, mientras que las características geométricas y las condiciones de fronteras se muestran en la Fig. 5.4.

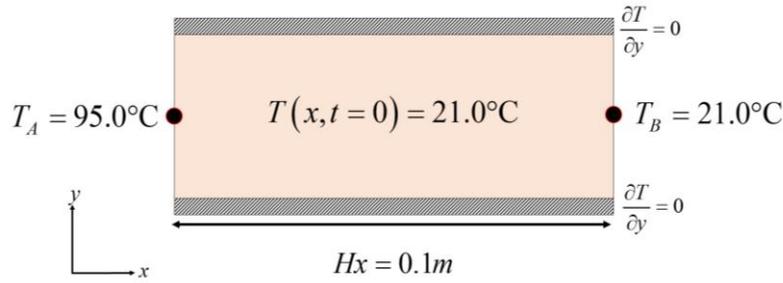


Figura 5.4. Modelo físico para problema de verificación reportado por Solomon (1979)

Como se muestra en la Tabla 5.3, el intervalo de temperatura entre fases es cero, lo cual no es aplicable para el método de C_p efectivo, por lo tanto, tomando la recomendación presentada en la literatura (Morgan et al. 1978), se considera un $\Delta T = 0.5^\circ\text{C}$ para considerar el proceso de cambio de fase. En cuanto al número de elementos considerados para generar el perfil de comparación, se consideró $N_x = 50$.

Tabla 5.3. Propiedades del PCM

Fase sólida				Fase líquida				Fase pastosa
λ_{sol} [W/m ² K]	C_{p-sol} [J/kgK]	ρ_{sol} [kg/m ³]	T_{sol} [°C]	λ_{liq} [W/m ² K]	C_{p-liq} [J/kgK]	ρ_{liq} [kg/m ³]	T_{liq} [°C]	h_{ls} [J/kg]
0.15	2210.0	856.0	36.7	0.15	2010.0	778.0	36.7	247000.0

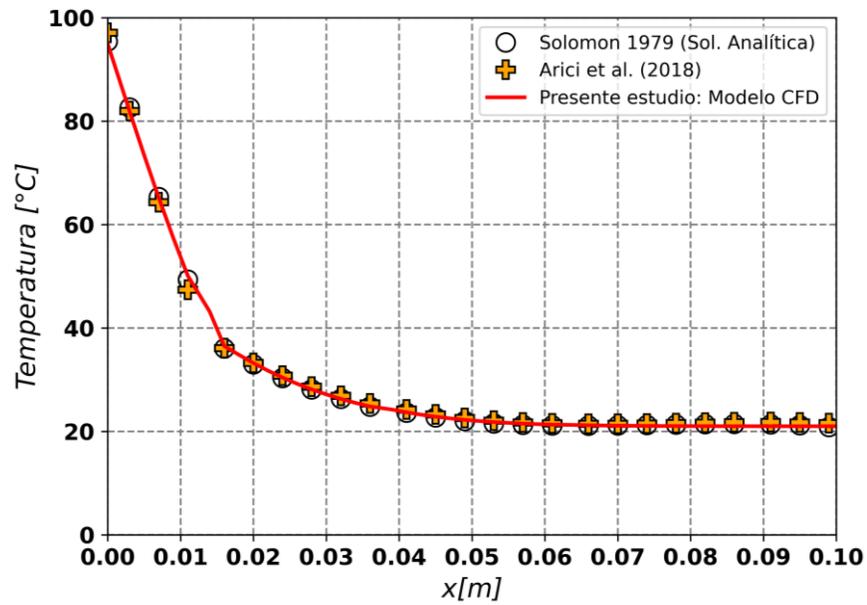
Nota: Datos obtenidos de Arici et al. (2018).

Se comparó el perfil de temperatura cuando el sistema alcanzó un tiempo de modelación de 3600 s (1 hora, considerando un $\Delta t = 1\text{s}$). Además de comparar la solución del problema empleando BE, se realizó la discretización de la ecuación gobernante de conducción de calor aplicando el método de C_p efectivo con el método de volumen finito. Posteriormente, se compararon ambas. En la Fig. 5.5 se presentan los resultados de la evaluación.

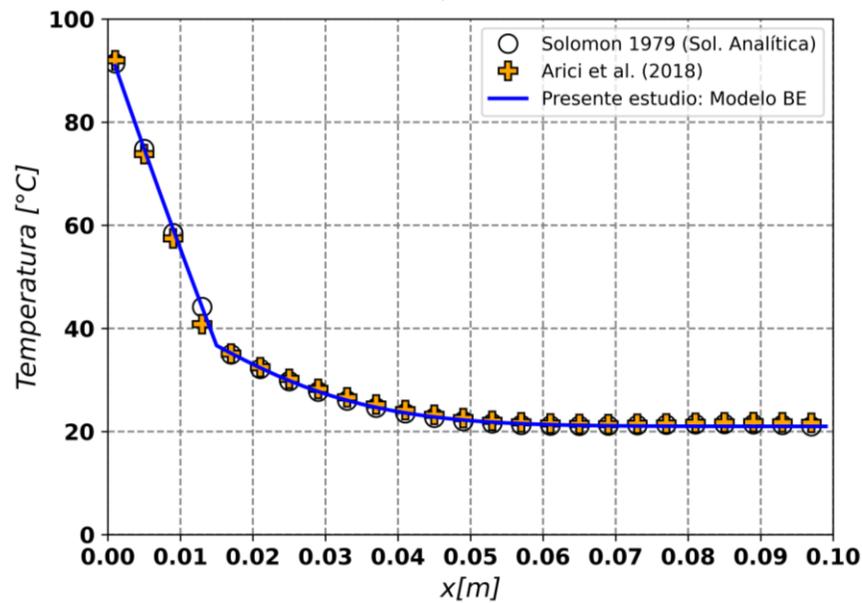
Como se muestra en la Fig. 5.5, los perfiles de temperatura de ambos modelos presentan un comportamiento similar a las soluciones reportadas en la literatura. Tal como el resultado numérico de Arici et al. (2018), la diferencia más notoria se encuentra en la región donde se registra una temperatura cercana a la región de cambio de fase, lo cual se debe a la aproximación del modelo.

La diferencia porcentual máxima obtenida en ambos modelos (diferencial y de BE) con respecto a la solución exacta (Solomon, 1979) es de 2.15%. Con lo cual se establece que los

modelos y la metodología desarrollados para el estudio de la transferencia de calor por conducción en PCM son satisfactorios.



a)



b)

Figura 5.5. Perfil de temperatura: a) modelo CFD, b) modelo de BE

5.3. Validación de modelos de chimenea solar

Para el análisis en estado transitorio fue necesario considerar los nodos al centro de cada elemento tomando en cuenta la condición de elemento de placa delgada. El modelo físico en estado transitorio del prototipo experimental se muestra en la Fig. 5.6.

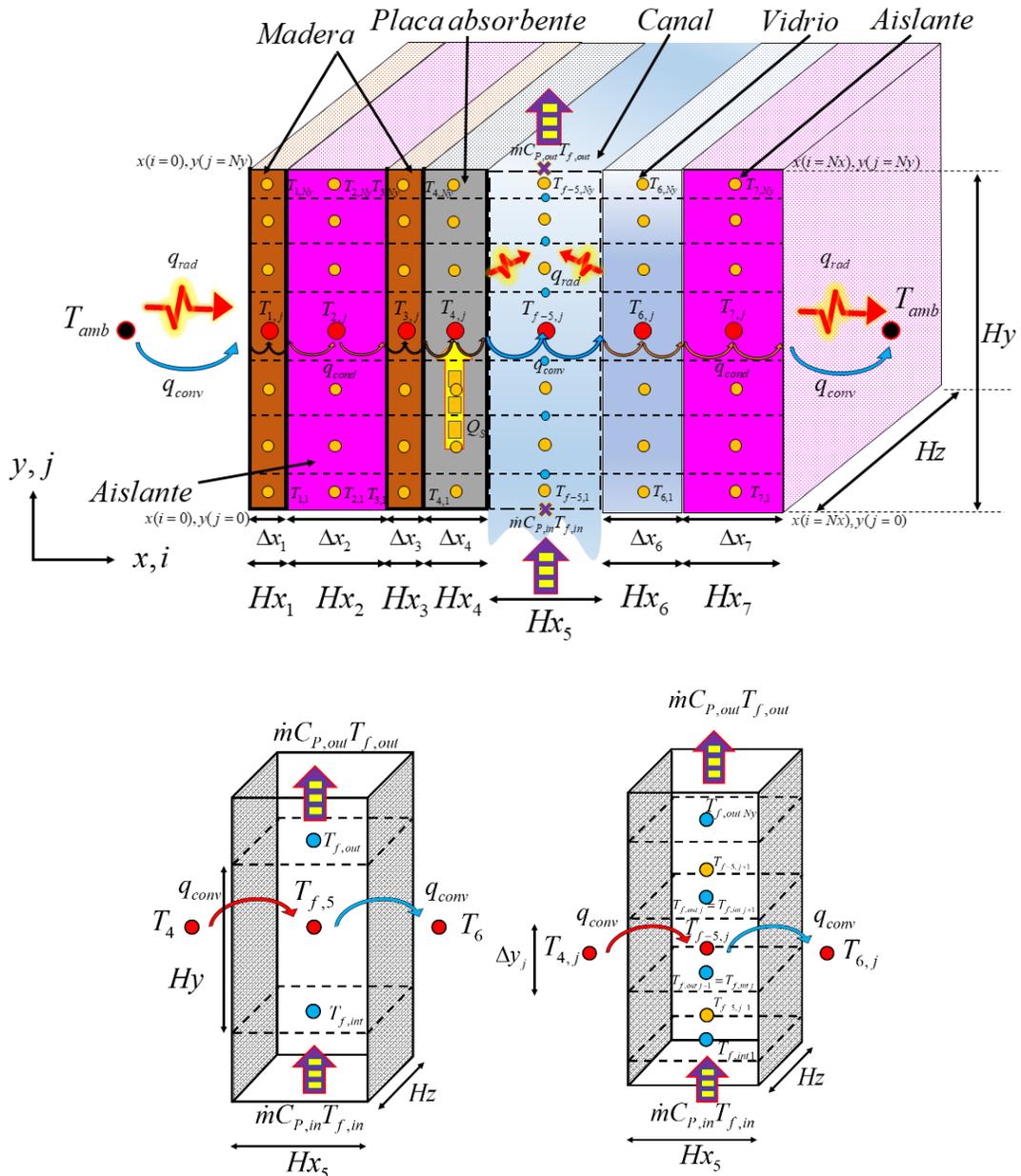


Figura 5.6. Modelo físico de prototipo de ChSo-OC en estado permanente

Para incluir el efecto 2D al interior del canal de aire, se añaden nodos en la dirección y tanto en los elementos sólidos como al interior del canal. Sin embargo, para no romper con el

enfoque de un modelo de BE, el intercambio energético entre los nodos en los elementos sólidos es únicamente en dirección x mientras que al interior del canal se considera el efecto sobre la dirección y ya que es de interés. Esto no impide que se registren variaciones de temperatura en dirección y en los elementos sólidos ya que, aunque se considera la transferencia de calor en una sola dirección en los balances de energía, no se excluyen las variaciones debido a los cambios de temperatura a lo largo del canal de aire.

En la Tabla 5.4 se presentan los datos de las propiedades del sistema para llevar a cabo la modelación del modelo de ChSo-OC.

Tabla 5.4. Propiedades termofísicas y espesor de los elementos del sistema

Madera	Poliestireno extruido (foamular)	Placa metálica (interior resistencia eléctrica)	Placa de vidrio
$Hx = 0.0127$ m	$Hx = 0.050$ m	$Hx = 0.010$ m	$Hx = 0.003$ m
$\lambda = 0.0283$ W(kg°C) ⁻¹ $C_P = 1215.0$ J(kg°C) ⁻¹ $\rho = 545.0$ kg m ⁻³	$\lambda = 0.0001T + 0.0262$ W(kg°C) ⁻¹ $C_P = 1210.0$ J(kg°C) ⁻¹ $\rho = 21.0$ kg m ⁻³	$\lambda = 60.50$ W(kg°C) ⁻¹ $C_P = 434.0$ J(kg°C) ⁻¹ $\rho = 7854.0$ kg m ⁻³	$\lambda = 1.177$ W(kg°C) ⁻¹ $C_P = 750.0$ J(kg°C) ⁻¹ $\rho = 2500.0$ kg m ⁻³
$\varepsilon = 0.87$	$\varepsilon = 0.82$	$\varepsilon = 0.87$	$\varepsilon = 0.9$

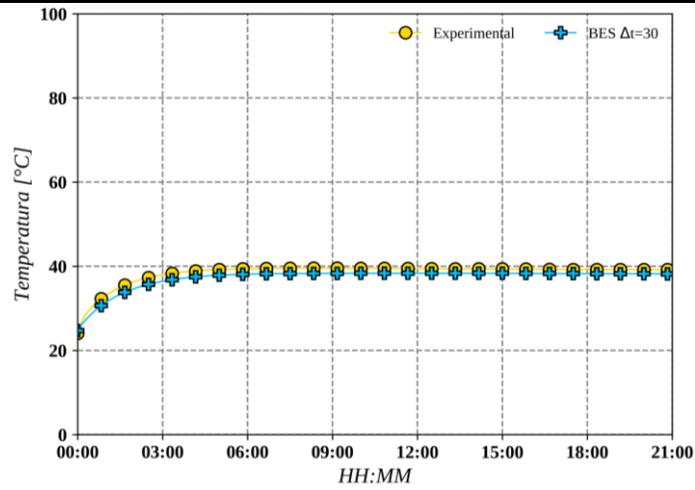
Nota: Datos obtenidos de Incropera y DeWitt (1996), ASTM C578-01.

La altura del canal $H_y = 1.22$ m, mientras que la amplitud $H_z = 0.46$ m. Para el coeficiente convectivo exterior se consideró una velocidad del viento de 0.001 m/s. En cuanto al número de elementos considerados a lo largo del eje y se tomaron en cuenta 21 elementos y para las relaciones de coeficientes convectivos, se consideraron las relaciones expuestas en el Capítulo 4. De igual forma para el cálculo de la densidad del aire en función de la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica, se empleó la metodología descrita por CENAM (2003). No hubo un solo tiempo de modelación fijo para todas las configuraciones ya que esto dependió de los datos experimentales obtenidos para diferentes espesores y flux de calor, en específico los datos de humedad relativa, presión atmosférica y temperatura del laboratorio. Esto se debe a que en los tiempos de cada prueba variaron ligeramente en minutos, aunque en general el tiempo de operación de estas pruebas fue poco más de 20 horas con intervalos de tiempo de medición de cada 30 segundos.

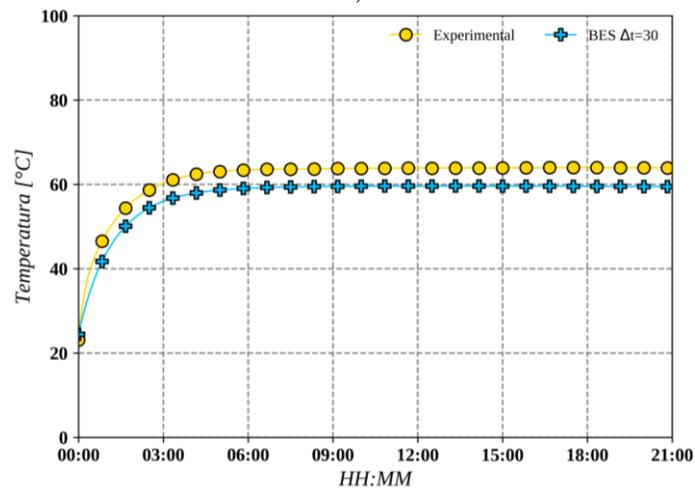
Se emplearon los valores de $\gamma = 0.67$ y $Cd = 0.59$ ya que fueron los que permitieron obtener mejores aproximaciones durante la evaluación en estado permanente. Para el ejercicio de validación se compararon los resultados de tres casos de los 15 evaluados experimentalmente. Los tres casos seleccionados fueron empleando un espesor de 0.15 m en el canal de aire para los flux de calor inducidos en la placa caliente de 100, 300 y 500 Wm^{-2} . Sin embargo, un parámetro que faltó por establecer en la Tabla 5.4 es el intervalo de tiempo o Δt . Como se mencionó previamente, en las mediciones experimentales el tiempo entre mediciones fue de 30 segundos, sin embargo, teóricamente usar el mismo intervalo de tiempo puede ser o no lo más idóneo porque al modelar el fenómeno se desconoce su comportamiento, así como la rapidez con la que ocurre los cambios entre pasos de tiempo. Por lo tanto, fue necesario realizar un estudio de independencia temporal para evaluar hasta que Δt se perciben cambios significativos que afecten la modelación del fenómeno. Es por ello por lo que se evaluaron diferentes $\Delta t = 30, 15, 10, 5, 3, 2$ y 1 s.

En la literatura usualmente la forma de realizar un ejercicio de validación se reduce a la comparación de los flujos de aire inducidos, por lo que realizar una comparación adicional de los valores de temperatura es algo extra que facilita visualizar el comportamiento de la modelación numérica en contraste con la realidad del fenómeno de interés.

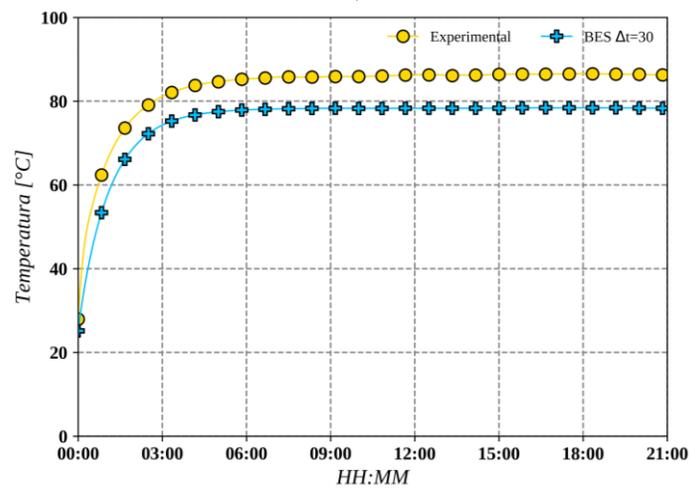
Ya que la cantidad de configuraciones evaluadas se limita a tres casos analizados experimentalmente, en la Fig. 5.7 se presentan los perfiles de temperatura al interior de la placa caliente mientras que en la Fig. 5.8 se presentan los perfiles de temperatura al interior del canal de aire. En ambas figuras se presentan los perfiles de temperatura utilizando un $\Delta t=30$ s, se comparan con los resultados obtenidos experimentalmente.



a)

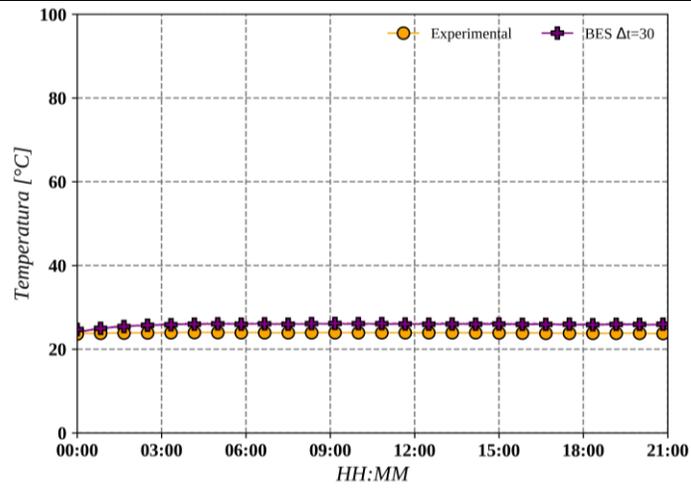


b)

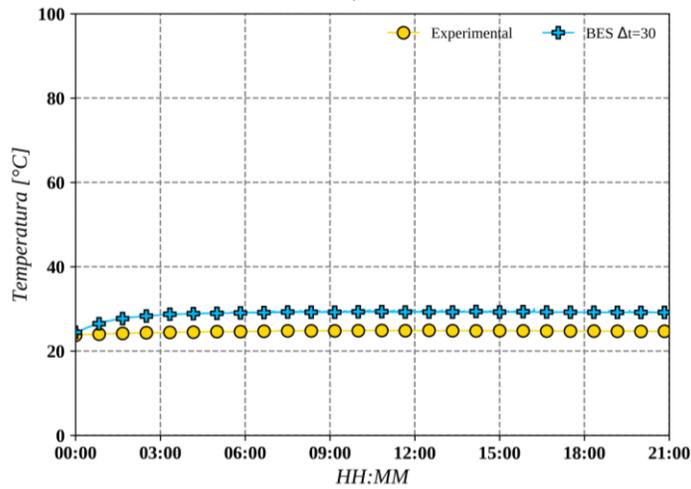


c)

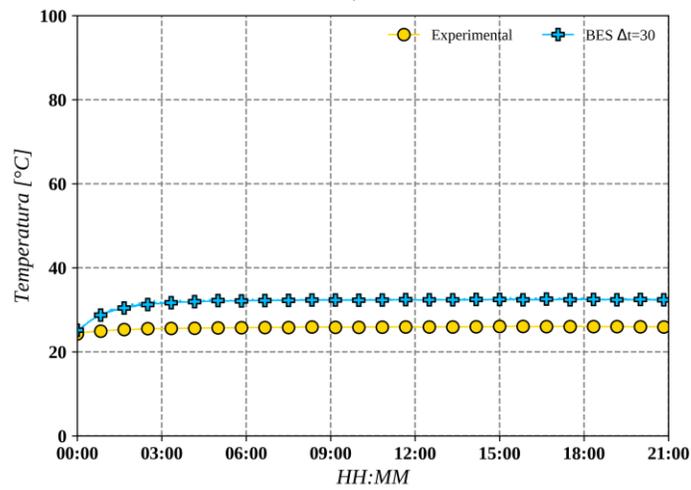
Figura 5.7. Temperatura al interior de placa absorbente: a) $100Wm^{-2}$, b) $300Wm^{-2}$, c) $500Wm^{-2}$



a)



b)



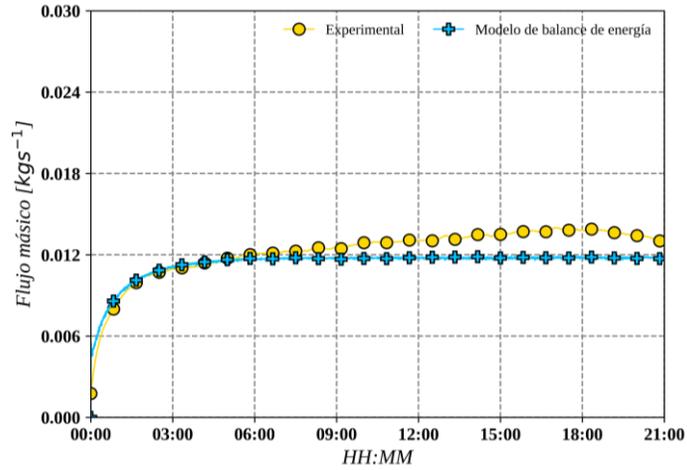
c)

Figura 5.8. Temperatura al interior del canal de aire: a) 100 Wm^{-2} , b) 300 Wm^{-2} , c) 500 Wm^{-2}

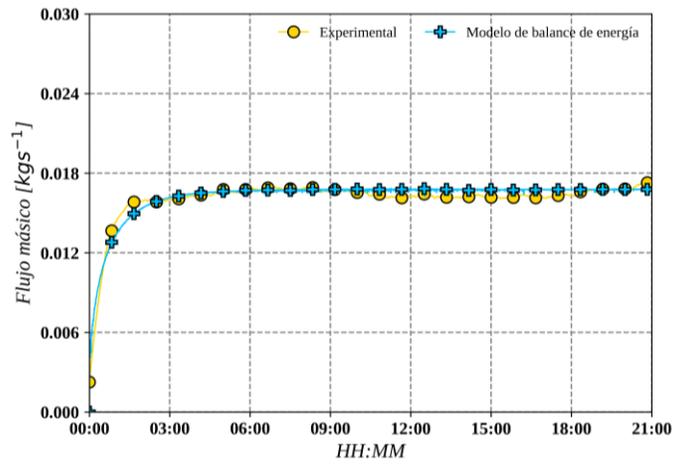
En las tres configuraciones evaluadas para los diferentes flux de calor, los resultados presentados por el modelo teórico empleando diferentes valores de Δt se montaron sin presentar una diferencia significativa. Se obtuvieron los valores de desviación (RMSD, “Root Mean Square Deviation”), para los casos mostrados, por lo que para las configuraciones mostradas en la Fig. 4.10, los valores de RMSD de la temperatura al interior de la placa absorbente fueron 3.20, 7.12 y 9.67% respectivamente; mientras que, para la temperatura al interior del canal de aire, los valores de RMSD fueron de 5.11, 8.75 y 10.13%. Desde la perspectiva de los resultados comparados por las temperaturas estimadas, emplear un $\Delta t = 30$ s es suficiente para obtener los resultados teóricos para estas configuraciones.

En la Fig. 5.9 se presenta la comparación del flujo másico para tres casos del estudio paramétrico con espesor del canal de 0.15 m, los cuales corresponden a los flux de calor evaluados de 100, 300 y 500 Wm^{-2} en la placa absorbente. Para la modelación se empleó un $\Delta t = 30$ segundos.

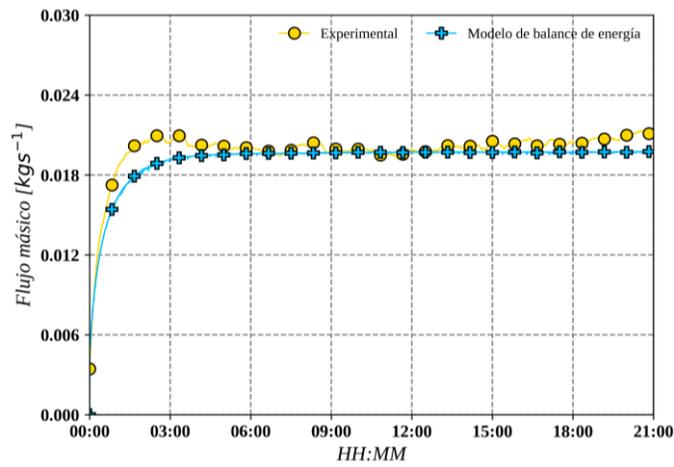
El comportamiento del flujo másico obtenido numéricamente con respecto al registrado experimentalmente es similar en todas las configuraciones. Las menores diferencias durante la etapa de transición se presentaron en la configuración de 100 Wm^{-2} mientras que en la etapa de estabilización o después de alcanzar el estado permanente los casos de 300 y 500 Wm^{-2} mejoraron considerablemente.



a)



b)



c)

Figura 5.9. Flujo másico solución transitorio $d = 0.15\text{ m}$: a) 100Wm^{-2} , b) 300Wm^{-2} , c) 500Wm^{-2}

Los valores de desviación (RMSD, “Root Mean Square Deviation”), para los casos mostrados en la Fig. 5.9 son de 11.79, 5.46 y 5.04%. Por lo tanto, se estableció que los resultados del modelo teórico en estado transitorio y la metodología de solución empleada son satisfactorios. El modelo permite reproducir el fenómeno reduciendo el desfase en la etapa de transición observado en los primeros ejercicios de validación empleando un enfoque 1D al interior del canal de aire.

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos de la evaluación experimental de la ChSo-OC.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS ESTUDIO EXPERIMENTAL

En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación del prototipo experimental construido en CENIDET-Mecánica. Se presentan los resultados del análisis de las constantes de tiempo, las temperaturas al interior del canal de la chimenea solar y las mediciones del flujo de aire generado por la chimenea a diferentes espesores del canal y las condiciones del laboratorio medidas durante la evaluación.

6.1. Evaluación experimental

A través de la construcción del prototipo experimental de ChSo-OC, se estableció un conjunto de pruebas para analizar los fenómenos de la transferencia de calor y mecánica de fluidos que intervienen en configuraciones a fines a los sistemas pasivos conocidos como chimeneas solares. Las pruebas se realizaron dentro de un laboratorio en donde se monitorearon parámetros como la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica.

Se realizó un total 15 pruebas que consistieron en variar el espesor del canal y la energía suministrada a la resistencia de la placa absorbente para emular diferentes flux de calor incidente. Los espesores evaluados son $d = 0.10, 0.15$ y 0.20 m, mientras que los flux de calor evaluados son $q = 100, 200, 300, 400$ y 500 W m⁻².

La zona con más sensores implementados es el interior del canal de aire, principalmente sensores de temperatura justo al centro sobre el eje z y a diferentes alturas desde la entrada hasta la salida. La sonda del anemómetro de aire caliente para el registro de la velocidad del aire se colocó a la entrada del canal.

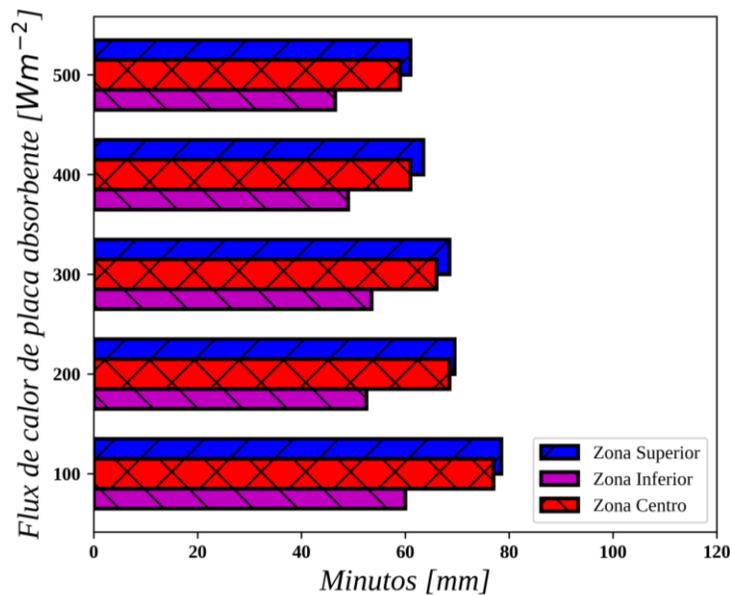
Los sensores de humedad relativa y presión atmosférica se colocaron a la misma altura que el anemómetro, pero a un costado del canal, esto se debe a que ambos sensores son invasivos y su geometría y dimensiones afectan el patrón de flujo a la entrada lo cual se ve reflejado en el comportamiento y medición del fenómeno de interés. Por esta razón, estos parámetros se miden de forma general para conocer los cambios de temperatura, humedad relativa y presión del medio circundante.

El resto de los sensores se implementaron para medir la temperatura puntual y diferencial en las superficies de las envolventes, así como al interior de la placa absorbente o caliente, y a través de termopares con arreglos de conexión en serie se midieron los flux de calor en las componentes aislantes.

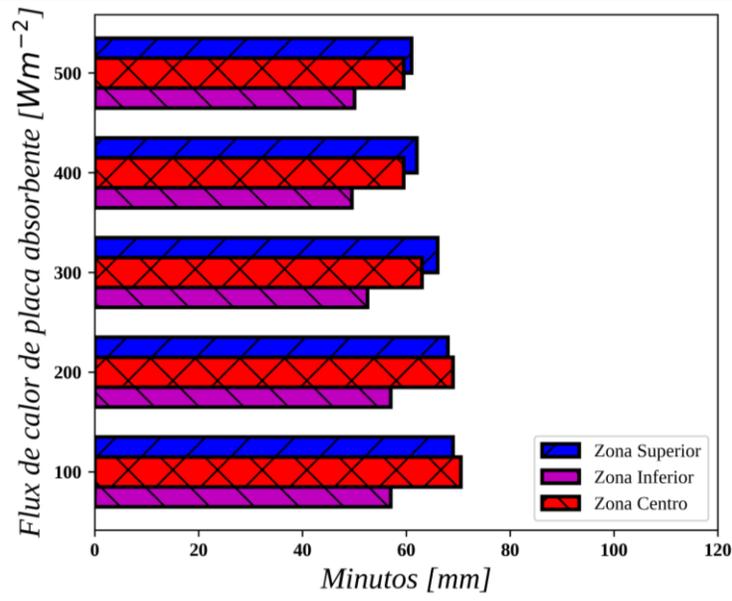
Para conocer el desempeño en estado estable de cada configuración evaluada, se realizó un promedio de los datos de cinco horas de medición después de alcanzar el estado estable. A continuación, se presentan los datos obtenidos de las evaluaciones experimentales iniciando con un análisis de las constantes de tiempo en cada evaluación.

6.2. Constantes de tiempo y calor removido

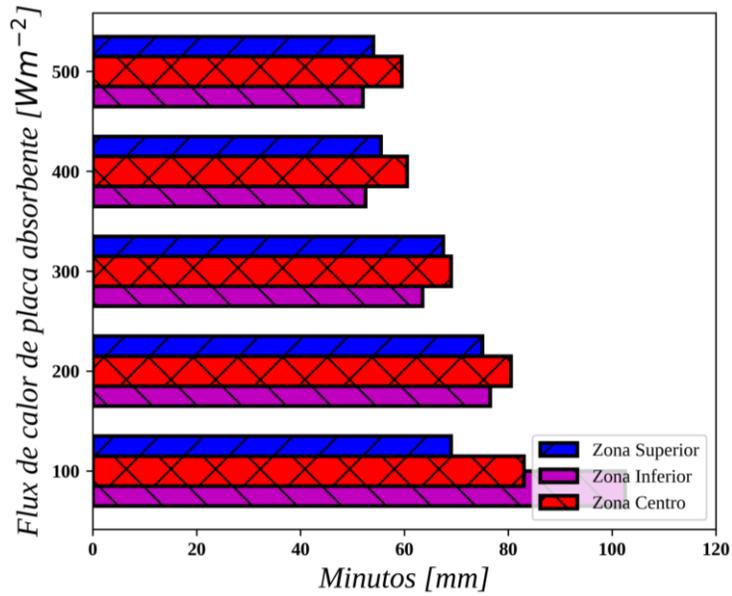
Para conocer el comportamiento y tiempo de respuesta de cada configuración evaluada, en las Figs. 6.1 y 6.2 se presentan las constantes de tiempo estimadas de cada evaluación sobre las temperaturas al interior de la placa absorbente. Ya que al interior de la placa se colocaron mediciones puntuales y arreglos de termopila para temperatura promedio, en la Fig. 6.1 se presentan el comportamiento de las constantes de tiempo observadas desde el punto de vista de las mediciones puntuales mientras que en la Fig. 6.2 se observa el comportamiento de las constantes de tiempo de las mediciones promedio. Las constantes de tiempo se determinaron empleando la metodología descrita por Schmid y Lazos-Martínez (2000) y Nise (2013).



a)

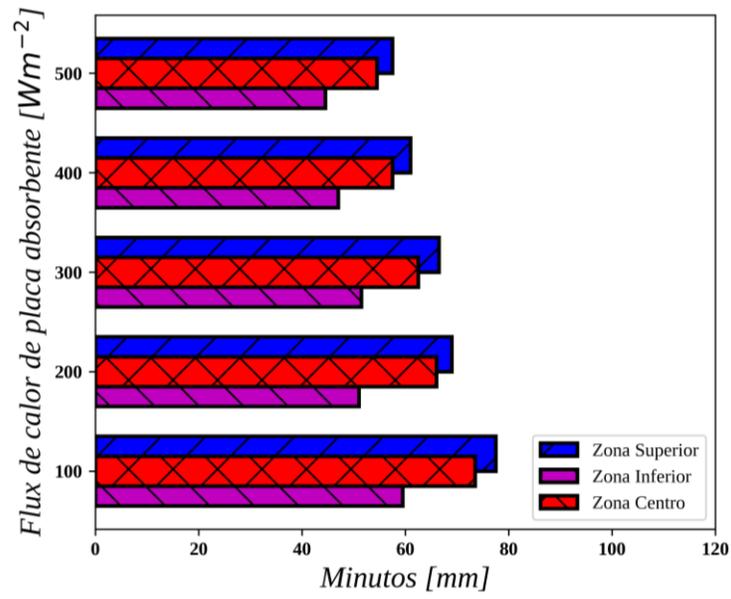


b)

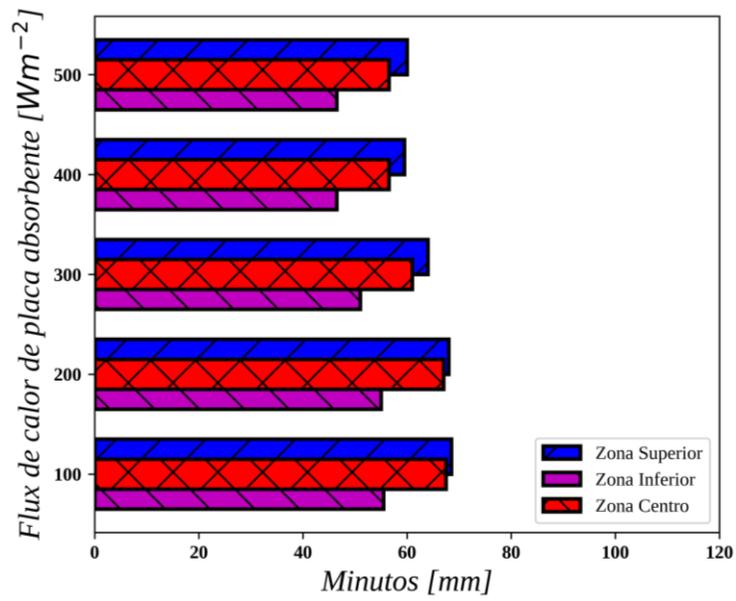


c)

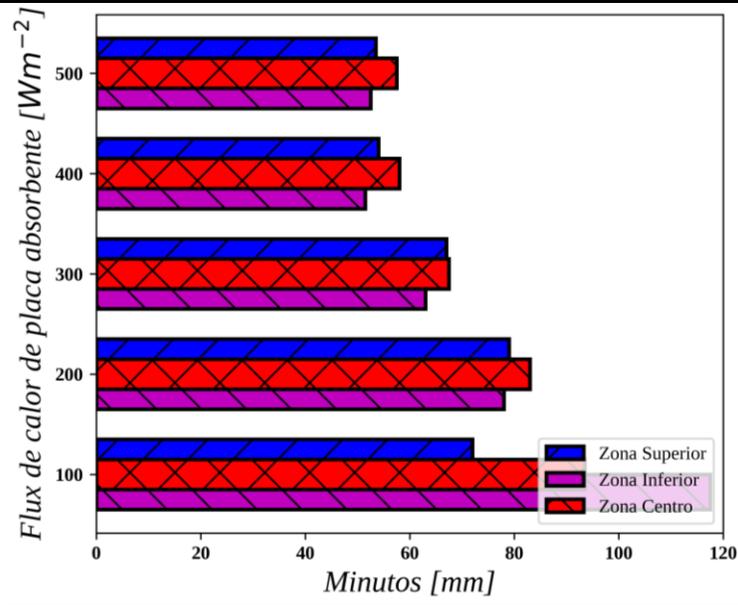
Figura 6.1. Constantes de tiempo a partir de mediciones de temperatura puntual: a) $d = 0.10$ m, b) $d = 0.15$ m, c) $d = 0.20$ m



a)



b)



c)

Figura 6.2. Constantes de tiempo a partir de mediciones de temperatura promedio: a) $d = 0.10$ m, b) $d = 0.15$ m, c) $d = 0.20$ m

La constante de tiempo indica el tiempo necesario para alcanzar el 63.2% de la temperatura final de la placa absorbente en estado estable. Por esta razón, al existir diferentes puntos de medición al interior de la placa caliente, se estimaron de forma individual las constantes de tiempo y se colocaron en grupo para cada configuración evaluada.

En las Figs. 6.1 y 6.2 se observa que las constantes de tiempo en cada punto o zona de medición tienen una relación directa con el incremento de la potencia suministrada. La tendencia en general para los espesores de 0.10 y 0.15 m es que la zona superior alcanza la temperatura máxima en mayor tiempo al presentar las constantes de tiempo más elevadas mientras que, la zona inferior es la que alcanza el 63.2% de la temperatura final más rápido que el resto de las mediciones. Sin embargo, este comportamiento cambia para el espesor de 0.20 m, ya que las mediciones puntuales y promedios mostraron que la zona centro presentó constantes de tiempo más grandes que el resto de las zonas de la placa. El único caso en donde la zona inferior registro constantes de tiempo superiores al resto de las zonas medidas en la placa absorbente fue para un espesor de 0.20 m con un flux de calor de $100 W m^{-2}$.

Las diferencias entre las diferentes constantes de tiempo registradas en cada configuración corresponden al comportamiento de la transferencia de calor entre la placa absorbente y su

entorno, en principal medida, con el intercambio energético debido a la convección y radiación de calor entre la superficie de la placa absorbente y el canal (fluido y superficie cubierta de vidrio). La generación de la capa límite térmica e hidrodinámica influye mucho en el comportamiento de la transferencia de calor por convección, lo cual es un comportamiento presente a lo largo de toda la superficie de la placa absorbente.

El movimiento del fluido al interior del canal de aire ocurre debido a los cambios de densidad del aire, gradiente de densidades, generados por el gradiente de temperatura y que, a través de una fuerza externa de campo, fuerza de gravedad, el fluido con mayor densidad, aire frío, desciende mientras que el fluido menos denso, aire caliente, asciende. Sin embargo, el régimen del fluido en movimiento, aunque suele considerarse como laminar debido a las bajas velocidades, en realidad pasa por una etapa de transición hasta alcanzar un régimen turbulento donde se magnifican todos los efectos como la transferencia de calor y los cambios de velocidad, esto sobre la superficie de la placa donde se estudian los efectos de la capa límite térmica e hidrodinámica o incluso en el flujo libre del fluido. Lo cual permite denotar que de acuerdo con la posición o altura donde se observa el fenómeno se presentan los diferentes comportamientos del fluido. De esta manera, ocurre de la misma forma sobre la superficie de la placa absorbente, en la que se experimentan los mismos efectos de cambios de temperatura y densidad de acuerdo con el régimen del flujo, por lo tanto, esto afecta a la transferencia de calor en la placa absorbente y se refleja en las diferencias de las constantes de tiempo en cada zona instrumentada.

En la Tabla 6.1 se muestran los valores de las constantes de tiempo presentados en las Figs. 6.1 y 6.2.

Tabla 6.1. Constantes de tiempo de placa absorbente

d [m]	Flux de calor [Wm ⁻²]	Mediciones de temperatura puntual			Mediciones de temperatura promedio		
		Constante de tiempo zona inferior [min]	Constante de tiempo zona centro [min]	Constante de tiempo zona superior [min]	Constante de tiempo zona inferior [m]	Constante de tiempo zona centro [min]	Constante de tiempo zona superior [min]
0.10	100	60.0	77	78.5	59.5	73.5	77.5
0.10	200	52.5	68.5	69.5	51.0	66.0	69.0
0.10	300	53.5	66.0	68.5	51.5	62.5	66.5
0.10	400	49.0	61.0	63.5	47.0	57.5	61.0
0.10	500	46.5	59.0	61.0	44.5	54.5	57.5
0.15	100	57.0	70.5	69.0	55.5	67.5	68.5
0.15	200	57.0	69.0	68.0	55.0	67.0	68.0
0.15	300	52.5	63.0	66.0	51.0	61.0	64.0
0.15	400	49.5	59.5	62.0	46.5	56.5	59.5
0.15	500	50.0	59.5	61.0	46.5	56.5	60.0
0.20	100	102.5	83.0	69.0	117.5	93.5	72.0
0.20	200	76.5	80.5	75.0	78.0	83.0	79.0
0.20	300	63.5	69.0	67.5	63.0	67.5	67.0
0.20	400	52.5	60.5	55.5	51.5	58.0	54.0
0.20	500	52.0	59.5	54.0	52.5	57.5	53.5

A partir de la tendencia observada en las Figs. 6.1 y 6.2 así como en los datos de la Tabla 6.1, en la mayoría de los casos los tiempos en alcanzar la constante de tiempo son superiores desde una perspectiva o medición de datos de temperatura puntual. Aunque en realidad, lo correcto es la medición promedio al ser un valor más representativo que incluye el efecto en toda el área de transferencia de calor.

El sistema alcanza la estabilidad en menor tiempo en las configuraciones con menor espesor (0.10 m) empleando la mayor potencia para el flux de calor emulado (500 Wm⁻²), lo cual es un comportamiento esperado ya que, al reducir el volumen de aire al interior del canal, la cantidad de energía que es entregada al aire disminuye. En la Fig. 6.3 se observa el flujo de calor removido por el aire del canal en cada configuración, en el eje de las abscisas se indica el flux de calor emulado en la placa absorbente mientras que en el eje de las ordenadas representa el flujo de calor removido.

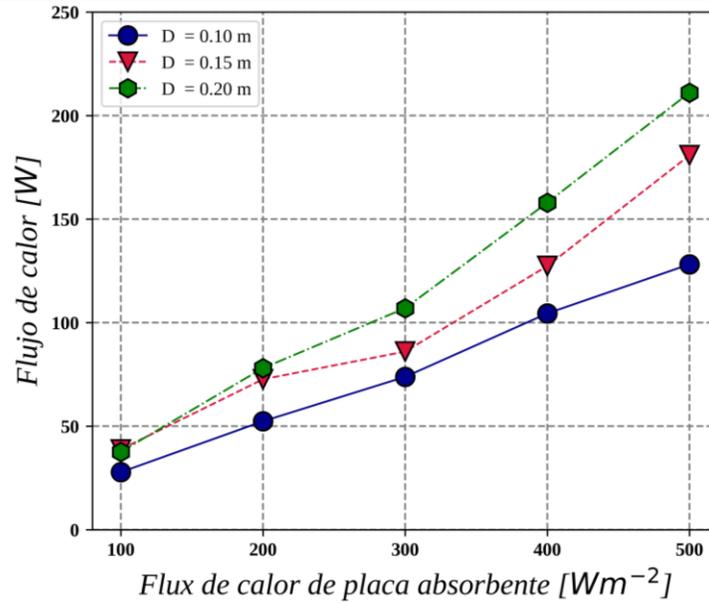


Figura 6.3. Flujo de calor removido por el aire del canal

Como se muestra en la Fig. 6.3, el incremento del flujo de calor es considerable en todos los casos, en los que a mayor volumen de aire (mayor espesor del canal) mayor es el flujo de calor removido. Este aspecto se debe considerar a futuro para el estudio paramétrico en el que se analicen dimensiones mayores tanto en altura como espesor del canal de aire, en chimeneas de un canal y dos canales. En la Ec. 6.1 se presenta el balance para estimar el calor removido por el aire.

$$Q_{air} = \dot{m}(C_{P,salida}T_{salida} - C_{P,entrada}T_{entrada}) \quad (6.1)$$

El flujo de calor removido por el aire (Q_{air}) depende del flujo de aire generado por la ChSo-OC y la temperatura promedio a la entrada y salida. El flujo másico es el mismo a la entrada y a la salida por continuidad. Sin embargo, el calor específico al depender de la temperatura del aire se determinó a partir de los valores promedio a la entrada y salida del canal.

6.3.Placa absorbente

La distribución de los sensores al interior de la placa absorbente se realizó de tal forma que se obtuvieron las mediciones de temperatura puntual y promedio en tres diferentes zonas. En las Figs. 6.4 y 6.5 se presentan las mediciones registradas al interior de la placa absorbente después de alcanzar la estabilidad para cada espesor y flux de calor emulado.

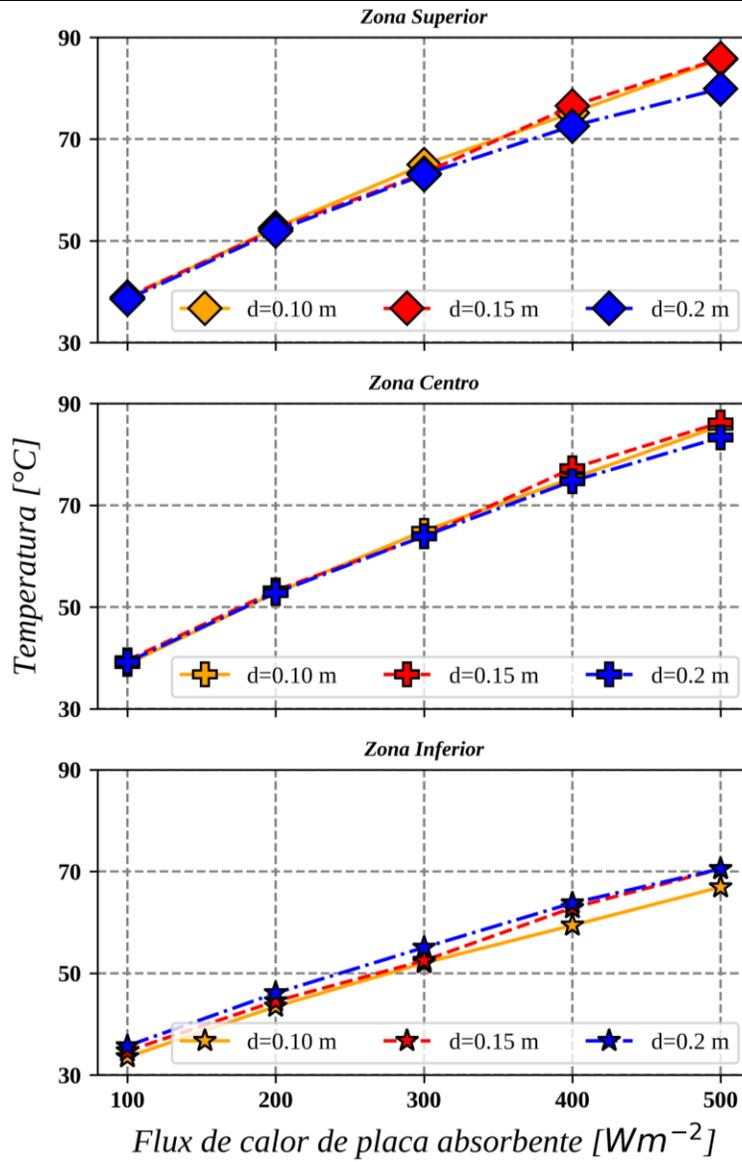


Figura 6.4. Temperaturas al interior de placa absorbente (medición puntual)

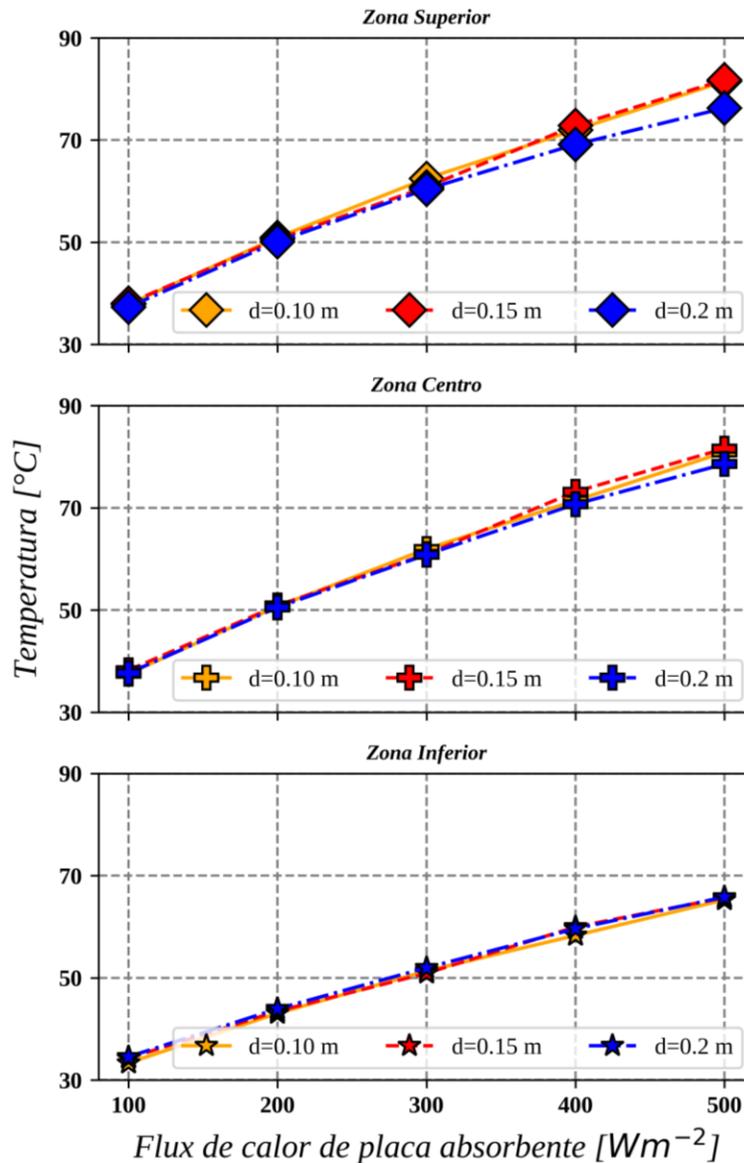


Figura 6.5. Temperaturas al interior de placa absorbente (medición promedio)

La tendencia de las temperaturas registradas ya sea medición puntual o promedio es la misma. Los valores de temperatura más elevados se observan para la medición puntual, lo cual es un efecto esperado ya que los sensores se encuentran en la zona centro de la placa en cada región (inferior, centro y superior), mientras que los valores promedios se basan en un proceso de medición donde los sensores fueron distribuidos a lo largo y ancho de la placa absorbente; por lo tanto, los sensores ubicados en los extremos colindantes con las orillas de la placa absorbente están sujetos a los efectos de borde, lo que significa que el sistema pierde energía o la transfiere a sus alrededores provocando que la temperatura en estas zonas sea menor que

al centro de la placa absorbente. Todo esto afecta a la medición promedio como se observa en la Fig. 6.5.

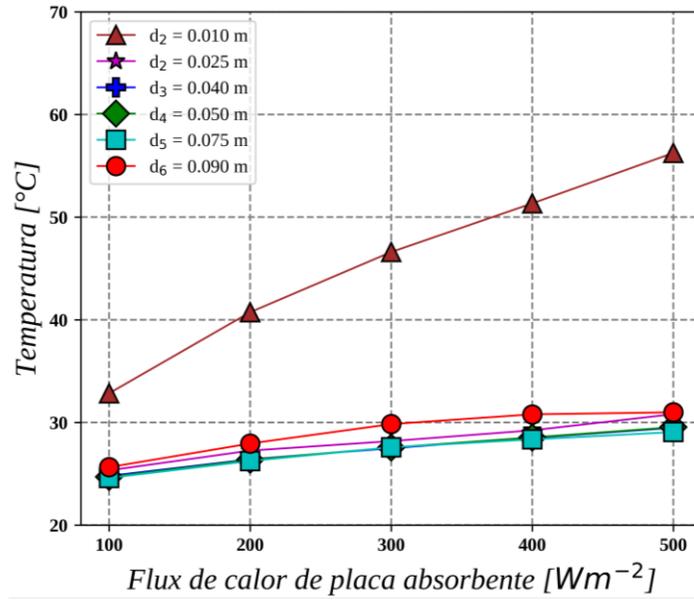
En todos los espesores evaluados se observa una tendencia en donde las zonas centro y superior son aquellas con las mayores elevaciones de temperatura en toda la placa absorbente. Esta diferencia es más notable en cuanto mayor es la potencia de energía suministrada a la resistencia. Las configuraciones de 0.15 m de espesor registraron las temperaturas más altas en la zona centro para los flux de calor de 400 y 500 Wm^{-2} . En el resto de las configuraciones, las mediciones en la zona centro registran temperaturas similares o ligeramente por debajo de la zona superior. Estos comportamientos son esperados ya que la zona centro es la zona más alejada de los bordes con influencia directa por parte de la resistencia eléctrica.

Al analizar las temperaturas registradas desde una perspectiva de espesores evaluados, los casos de 0.10 m y 0.15 m registraron valores más altos de temperatura puntual y promedio para las zonas superior y centro. Sin embargo, ocurre lo opuesto en las mediciones de la zona inferior, ya que en esta zona para el espesor de 0.20 m se observaron las mediciones de temperatura más altas, mientras que al evaluar un espesor de 0.10 m la zona inferior registra las temperaturas más bajas para los flux de calor emulados.

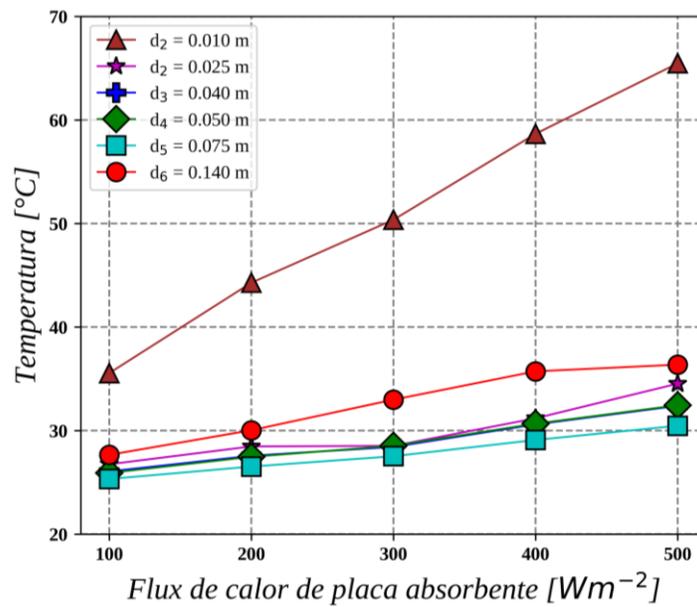
A continuación, se presentan las mediciones estables al centro del canal.

6.4. Temperatura del aire al centro del canal (TACE)

Al mencionar las mediciones de temperatura al centro del canal, se refiere a los datos recabados por los sensores con etiqueta TACE ubicados a una altura de 0.61 m, y a diferentes distancias de la superficie de la placa absorbente. En la Fig. 6.6 se presentan los resultados recabados para los diferentes flux de calor y espesores evaluados.



a)



b)

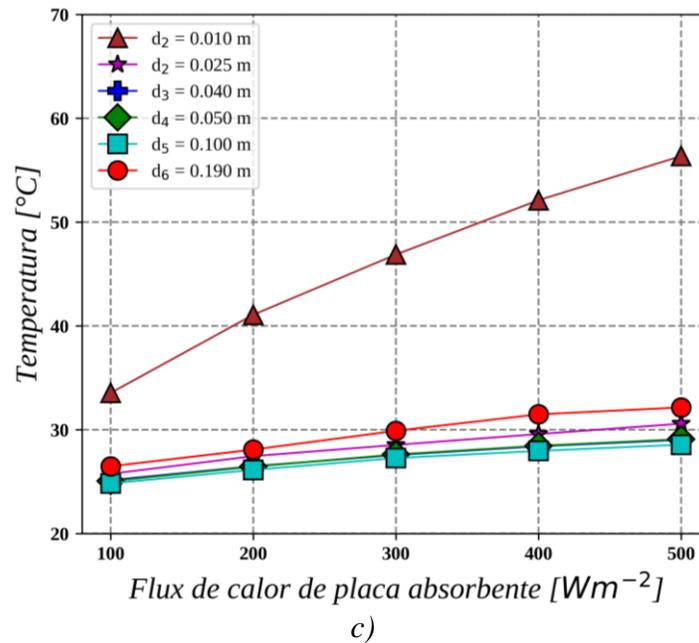


Figura 6.6. Temperatura del aire al centro del canal (TACE): a) $d = 0.10$ m, b) $d = 0.15$ m, c) $d = 0.20$ m

De las mediciones con los sensores TACE, los valores más altos se registraron en el sensor a 0.010 m de la placa absorbente, el cual es el sensor más cercano a la placa absorbente. Este es un comportamiento esperado, ya que este sensor se encuentra en una zona de altos gradientes de temperatura debido a la capa límite térmica, por lo tanto, entre más cercano esté el sensor de la superficie de la placa absorbente mayor es la temperatura registrada. En segundo lugar, se encuentran las mediciones del sensor más alejado de la placa absorbente (d_6), este sensor se encuentra a 0.010 m de la superficie de la cubierta de vidrio el cual se encuentra a una temperatura por encima del centro del canal de aire debido al intercambio radiativo entre placas. Por lo tanto, a través de la convección de calor, el fluido en contacto con esta superficie también elevó su temperatura por encima de la medición al centro del canal.

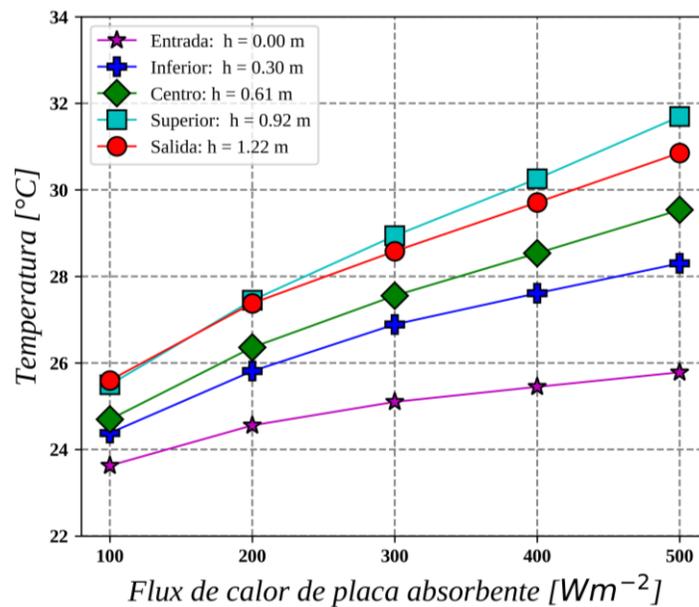
El resto de los sensores TACE mostraron el mismo comportamiento al igual que una ligera variación entre los valores de temperatura. Estas variaciones se deben al intercambio convectivo entre las superficies de la placa y el propio fluido. Aunque las variaciones no son tan significativas, se presenta una clara tendencia de incremento de la temperatura conforme aumenta el flujo de calor suministrado.

En la mayoría de los casos evaluados, la temperatura registrada al centro del canal se encontró entre los valores más bajos de todas las mediciones TACE, observándose que los casos más pronunciados resultaron de la evaluar un espesor de 0.15 m. La elevación de la temperatura en todas las mediciones se debe propiamente a los efectos de la transferencia de calor convectiva y radiativa que ocurre al interior del canal, sin embargo, determinar la proporción en que cada fenómeno afecta directamente a los cambios de temperatura del aire queda fuera del alcance de este trabajo.

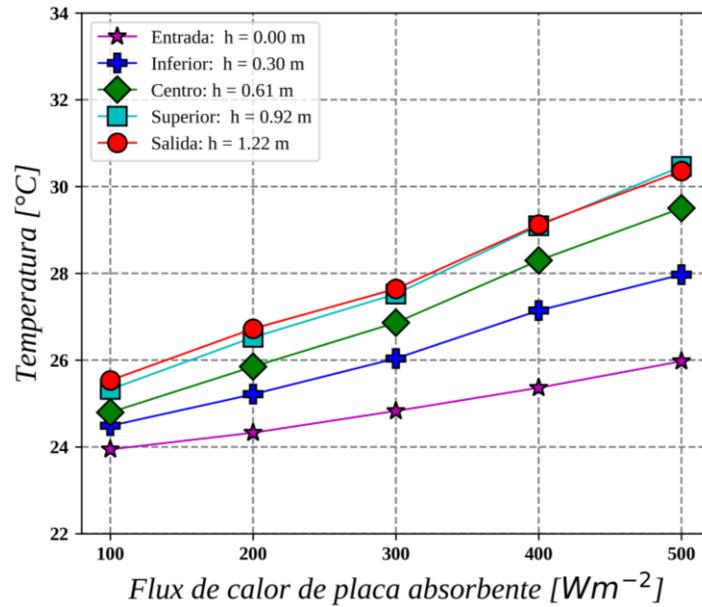
En la siguiente sección se presentan los resultados de los sensores colocados al centro a diferentes alturas del canal de aire.

6.5. Temperatura del aire al centro del canal a lo largo del eje y

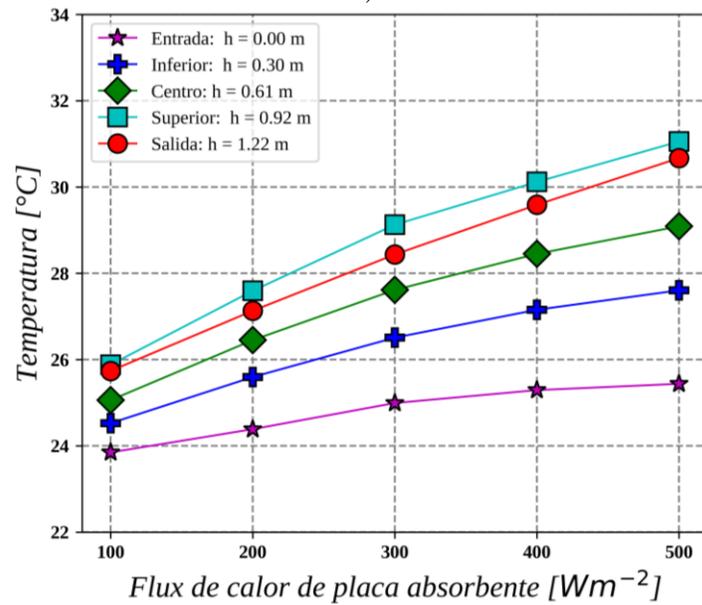
Con el fin de evaluar los cambios de temperatura a diferentes alturas al interior del canal, en la Fig. 6.7 se presentan los datos registrados por los sensores colocados al centro del canal en cada espesor y flux de calor evaluado.



a)



b)



c)

Figura 6.7. Temperatura del aire a diferentes alturas al centro del canal: a) $d = 0.10\text{ m}$, b) $d = 0.15\text{ m}$, c) $d = 0.20\text{ m}$

Los datos registrados muestran que la temperatura del aire a la entrada del canal no depende solamente de la temperatura ambiente en el laboratorio sino también está influenciada por el suministro de energía constante en la placa absorbente, ya que en todos los casos se observa un incremento en el valor de temperatura registrado conforme aumenta el flux de calor emulado en la placa. Sin embargo, esta influencia se ve reducida en cuanto el espesor del

canal aumenta, lo cual es un comportamiento esperado ya que el sensor se encuentra más alejado de la fuente de energía.

Los sensores que se encuentran directamente al interior del canal de aire, incluso el sensor a la salida del canal, presentan un incremento en los valores de temperatura conforme aumenta el flux de calor, lo que indica que a mayor energía suministrada mayor es la transferencia de calor. Las diferencias más notables entre los sensores a diferentes alturas al incrementar el flux de calor se observan en las evaluaciones con espesor de $d = 0.10$ m, lo cual es un comportamiento esperado ya que la transferencia de calor en el fluido es mayor al reducir la distancia en la que ocurre el intercambio energético.

Las temperaturas más altas mostradas en la Fig. 6.7 corresponden a las mediciones al centro del canal y a una altura de 0.92 m, lo cual se considera como zona superior previo a la última línea de sensores ubicados a la salida del canal. Tal como los sensores a la entrada del canal, los sensores a la salida están en el límite visible de forma perpendicular de la superficie de la placa absorbente, sin embargo, el incremento de la temperatura registrado por estos sensores es más notable en contraste a los primeros debido a que estos registran la temperatura del fluido que es extraído del canal, el cual se encuentra a una temperatura superior que el resto del fluido al interior, por lo tanto es normal que las mediciones del fluido en esta zona se encuentren solo por debajo de las mediciones de la zona superior que se encuentra en intercambio energético directo con la superficie de la placa absorbente.

La temperatura del aire registrada a diferentes alturas incrementó conforme mayor fue la potencia suministrada. Aunque las diferencias de temperatura entre la entrada y salida varían en cada espesor evaluado, los sensores de cada zona presentan un orden de intensidad constante en todo el estudio experimental.

A continuación, se presentan los valores registrados de velocidad de aire a la entrada del canal.

6.6. Velocidad del aire a la entrada del canal

El sensor de velocidad de aire o anemómetro de hilo caliente fue colocado justo al centro del canal de aire y al borde de la zona de medición e inicio de la placa absorbente. En la Fig. 6.8 se presentan los valores registrados de velocidad de aire a la entrada del canal.

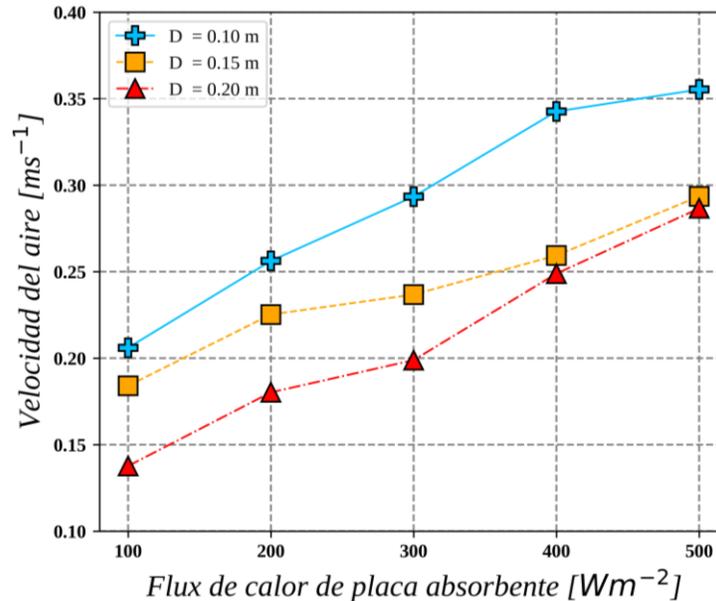


Figura 6.8. Velocidad del fluido a la entrada del canal

Las velocidades más altas registradas corresponden a las evaluaciones con un espesor $d = 0.10$ m, en contraste con las evaluaciones al usar un espesor $d = 0.20$ m. Aunque este comportamiento se intente relacionar directamente al cambio de presión generado a la entrada del canal, ya que a mayor área mayor presión y menor velocidad de aire del aire a la entrada, este análisis corresponde puramente a un fenómeno de convección forzada, cuando en realidad el desplazamiento del fluido se debe enteramente a un efecto de la convección natural. Por lo tanto, desde el punto de vista de convección natural, la disminución de la velocidad del fluido se debe a que la energía entregada al sistema permanece constante mientras que el volumen de aire con el que se realiza la transferencia de energía incrementa conforme aumenta el espesor del canal, incrementando la cantidad de fluido desplazado por la chimenea (flujo másico y volumétrico), lo cual se describe en la siguiente sección, afectando la velocidad del fluido a la entrada del canal. Además, se debe tomar en cuenta que la velocidad registrada corresponde a la zona centro de la entrada del canal al ser una zona

libre de perturbaciones o cambios de presión debido a las envolventes y extensiones del prototipo experimental.

En un estudio a futuro se debe tomar en cuenta la medición de varios puntos a la entrada del canal para determinar el comportamiento en el fluido desplazado por la chimenea solar y así realizar un análisis a mayor profundidad del fenómeno involucrado.

La Fig. 6.8 muestra que existe una tendencia de incremento de la velocidad del aire conforme se aumente la cantidad de energía suministrada a la placa absorbente, lo cual es benéfico en las aplicaciones de chimeneas solares en donde se desea incrementar la capacidad de ventilación de este tipo de sistemas.

En la siguiente sección se presentan los datos registrados de flujo másico y volumétrico estimados a partir de la velocidad del fluido del canal y los diferentes valores de temperatura registrados a la entrada y salida.

6.7. Flujo másico y flujo volumétrico

La estimación del flujo másico y el flujo volumétrico se realizó a partir de los datos de velocidad de aire, el área de entrada y la densidad del aire. En las Ecs. 6.2 y 6.3 se expresan las relaciones para la estimación de los parámetros deseados.

$$\dot{V} = V_{air} \cdot A_{canal} \quad (6.2)$$

$$\dot{m} = \rho_{air} \cdot \dot{V} \quad (6.3)$$

Donde \dot{V} es el flujo volumétrico, V_{air} es la velocidad del aire registrado, A es el área del canal, ρ_{air} es la densidad del aire y \dot{m} es el flujo másico. Por continuidad, la estimación del flujo másico y la densidad del aire toman en cuenta que la cantidad de fluido que entra es la misma que sale del canal, por lo tanto, se emplea el valor de la temperatura del aire a la salida del canal de acuerdo con lo reportado en la literatura (Ong, 2003). Sin embargo, *el valor de la densidad del aire se obtiene a partir de correlaciones en función de la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica (CENAM, 2003), ya que no es medido directamente sino se calcula tomando en cuenta las condiciones del medio.*

Para obtener la densidad del aire, se requiere la masa molar del aire seco M_a , la masa molar del agua M_v , y los datos de temperatura del aire, humedad relativa y presión atmosférica aplicados a la ecuación de estado.

En la Fig. 6.9 se presentan los resultados de flujo másico y flujo volumétrico en todas las configuraciones experimentales evaluadas. Se aclara que el flujo volumétrico se presenta en unidades de m^3h^{-1} y no m^3s^{-1} para facilitar la interpretación de los resultados a futuro ya que es común presentar estos valores en estas unidades en los trabajos reportados en la literatura.

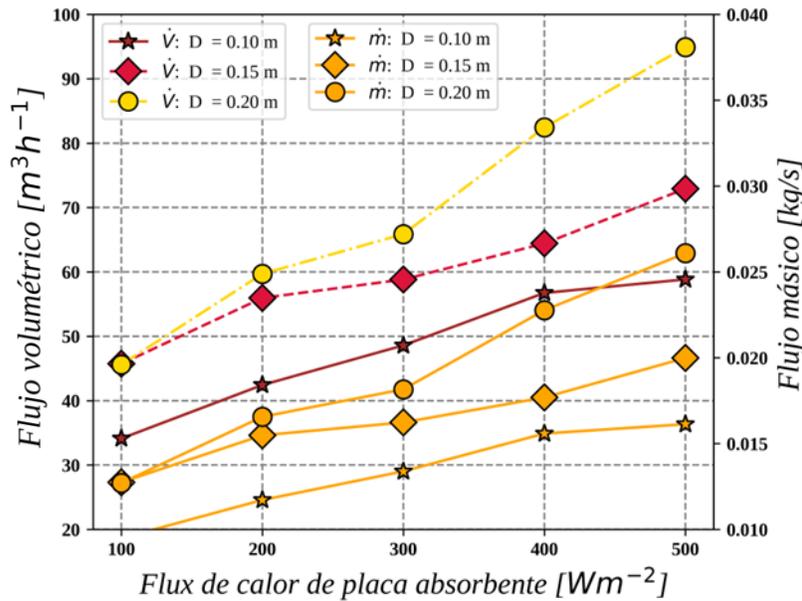


Figura 6.9. Flujo volumétrico y másico

Como se describió anteriormente en la sección de la velocidad del aire, el incremento en el espesor del canal favorece el incremento de flujo de aire extraído, tal como se observa en la Fig. 6.9 en la cual se muestra cómo el flujo de aire extraído por el canal de aire incrementa conforme aumenta el flux de calor en la placa caliente y el espesor del canal. Este comportamiento se desea explotar como potencial de ventilación en las chimeneas solares.

Tal como en el caso de la velocidad, las mediciones de flujo másico y volumétrico presentaron un comportamiento casi lineal en los casos de espesor $d = 0.10\text{ m}$, mientras que, al incrementar el espesor del canal, las variaciones entre flux evaluados presentan una tendencia de incremento, aunque no de forma regular. Este efecto se debe a que el dato de la velocidad del aire no es un valor promedio en toda el área en realidad, aunque se considera

como tal, este valor corresponde a un solo punto, de igual forma para el cálculo de la densidad del aire se toma en cuenta el valor registrado por un sensor al centro del área de descarga, por lo tanto, en realidad no son valores promedio. Sin embargo, debido a las dificultades de realizar una medición precisa de estos parámetros sin agregar perturbaciones mediante los instrumentos de medición, estos parámetros se consideran como valores promedio a la entrada y salida. Además, el flujo másico y volumétrico no cambian a la entrada y salida debido a la conservación de masa en el canal de aire, por esta razón la medición de la velocidad del aire a la entrada se emplea para la estimación del flujo másico con los valores de temperatura a la salida para determinar los cambios de densidad del aire.

En la Tabla 6.2 se presentan los datos de flujo másico y volumétrico mostrados cualitativamente en la Fig. 6.9.

Tabla 6.2. *Flujos másicos y volumétricos*

Espesor [m]	Flux de calor [Wm ⁻²]	Flujo másico [kg s ⁻¹]	Flujo volumétrico [m ³ h ⁻¹]
0.10	100	0.009483	34.114
0.10	200	0.011713	42.429
0.10	300	0.013383	48.584
0.10	400	0.015585	56.734
0.10	500	0.01613	58.834
0.15	100	0.012745	45.716
0.15	200	0.015482	55.951
0.15	300	0.016232	58.816
0.15	400	0.017685	64.421
0.15	500	0.019988	72.922
0.20	100	0.012699	45.595
0.20	200	0.01656	59.692
0.20	300	0.018162	65.865
0.20	400	0.02277	82.430
0.20	500	0.026088	94.915

Los datos de flujo másico y volumétrico promedios mostrados en la Tabla 6.2 se emplearon para la validación de los modelos teóricos desarrollados a través de BE.

A continuación, se presentan los datos registrados de humedad relativa y presión atmosférica durante las evaluaciones experimentales.

6.8. Humedad relativa y presión atmosférica

Al igual que las mediciones de temperatura y velocidad del aire registradas al interior del canal, se realizó la medición de la presión y humedad relativa del medio en el laboratorio donde se encuentra ubicado el prototipo experimental, esto con el fin de tener la mayor cantidad de variables registradas para determinar de forma más precisa los cambios de la densidad del aire y así realizar una mejor estimación del flujo másico, sin embargo, aún se requieren más mediciones de la velocidad del aire a la entrada y salida de la chimenea solar debido a la presencia de recirculaciones. En la Figs. 6.10 y 6.11 se presentan los datos promediados para cada configuración evaluada de humedad relativa y presión atmosférica.

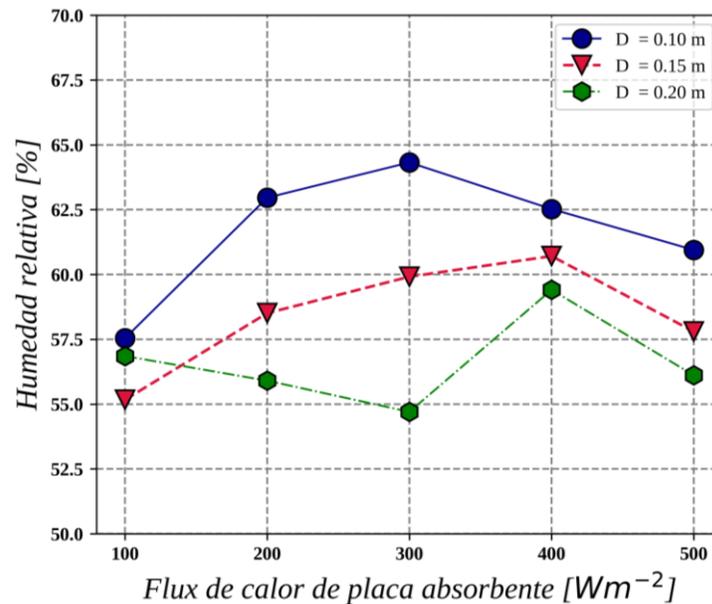


Figura 6.10. Humedad relativa

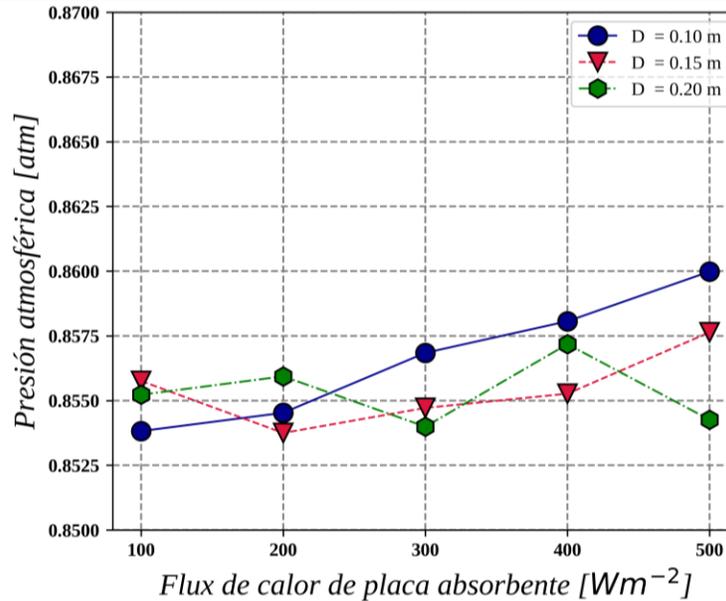


Figura 6.11. Presión atmosférica

Los cambios de humedad relativa y presión atmosférica dependen directamente de las condiciones climáticas del medio que rodea al laboratorio. Durante la realización de las pruebas no se empleó un sistema de control para la humedad relativa, solo se monitoreó durante las pruebas, mientras que las variaciones de la presión atmosférica son afectadas durante los días con lluvia, de lo contrario, estas mediciones se presentan sin variaciones significativas como se presenta en la Fig. 6.11.

Para el control de la humedad relativa es necesario la implementación de un humidificador o en su defecto, mantener en la habitación bandejas o almacenes de agua expuestos que permitan la evaporación y así mantener los niveles de humedad por encima del medio circundante. *La variación de las condiciones de humedad es un parámetro que usualmente no es tema de discusión en los estudios de chimeneas solares, aunque en realidad toma un papel importante en la transferencia de calor al interior del canal, ya que el fluido al presentar condiciones de humedad relativa alta como lo es en zonas con climas tropicales, el medio presenta una mayor capacidad para interactuar como un medio radiativamente participante, lo cual puede afectar las estimaciones de los modelos teóricos.*

Debido a la importancia de la humedad relativa y presión atmosférica en la determinación de la densidad del aire, en la Tabla 6.3 se presentan de forma cuantitativa los datos mostrados

en las Figs. 6.10 y 6.11, además de la temperatura al interior del laboratorio durante las pruebas realizadas, datos empleados para determinar los cambios de la densidad del aire.

Tabla 6.3. Humedad relativa y presión atmosférica

Espesor [m]	Flux de calor [Wm^{-2}]	Humedad relativa [%]	Presión atmosférica [atm]	Temperatura de laboratorio [$^{\circ}C$]
0.10	100	57.539	0.85382	22.338
0.10	200	62.960	0.85452	23.090
0.10	300	64.320	0.85684	23.445
0.10	400	62.523	0.85806	23.417
0.10	500	60.945	0.85998	23.565
0.15	100	55.167	0.85575	22.627
0.15	200	58.507	0.85374	22.809
0.15	300	59.913	0.85471	23.098
0.15	400	60.708	0.85526	23.342
0.15	500	57.798	0.85763	23.748
0.20	100	56.851	0.85522	22.662
0.20	200	55.903	0.85593	22.919
0.20	300	54.702	0.85399	23.269
0.20	400	59.407	0.85717	23.412
0.20	500	56.109	0.85425	23.409

En el siguiente capítulo se exponen las configuraciones evaluadas en el estudio paramétrico, análisis de independencia temporal, independencia de la condición inicial, análisis de la cantidad de secciones en las que se dividen los elementos masivos y los resultados de los modelos teóricos de la ChSo-OC y la ChSo-TC correspondientes al estudio paramétrico.

CAPÍTULO 7

RESULTADOS ESTUDIO TEÓRICO

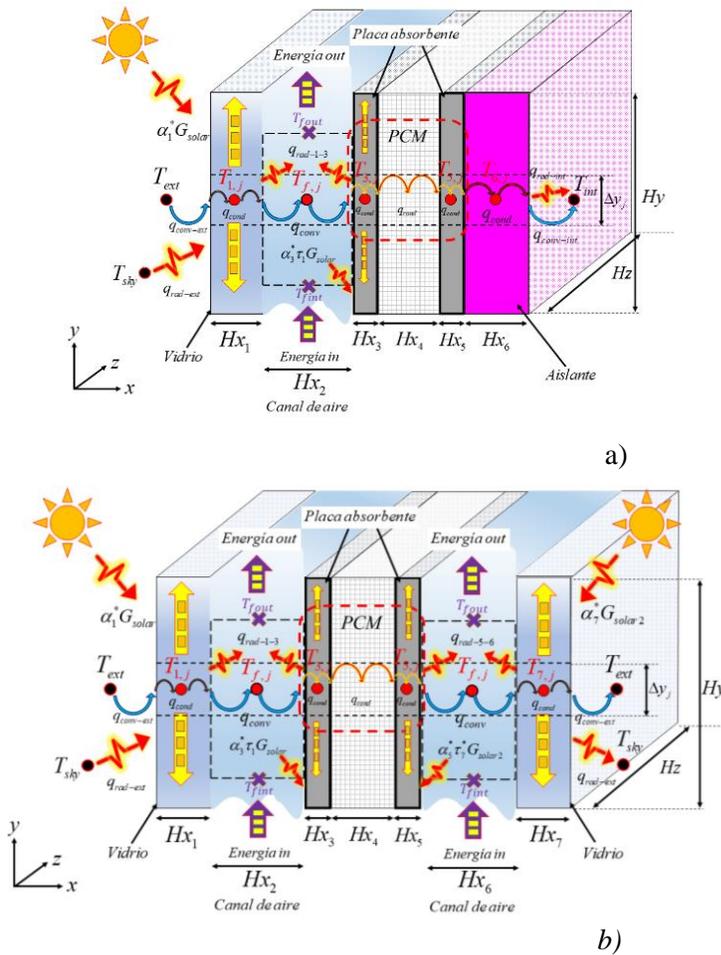
En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación de los modelos teóricos de la ChSo-OC y la ChSo-TC. Se presentan los parámetros de estudio, el análisis de independencia temporal y de la condición inicial. Posteriormente, se presentan los resultados del estudio paramétrico por ciudades los cuales parten del análisis de flujo de aire inducido por los sistemas pasivos. A partir de la ventilación inducida se presenta también un análisis de emisión de contaminantes, consumo eléctrico equivalente y análisis de costo.

7.1. Estudio paramétrico

El estudio paramétrico consistió en la evaluación de los modelos de ChSo-OC y ChSo-TC. Ambos modelos se desarrollaron a partir de BE; el modelo matemático para las configuraciones de materiales sólidos contempla el uso de múltiples nodos para la evaluación de materiales masivos como el concreto o materiales de cambio de fase. Para la modelación de materiales de cambio de fase se empleó el método de “ C_P efectivo” En la Fig. 7.1 se presentan los modelos físicos de ambos sistemas y las condiciones base para su evaluación.

Para el análisis del potencial de ventilación de ambos modelos de chimenea solar, se propuso variar los siguientes parámetros:

- Altura del canal (H_y)
- Espesor del canal (H_x)
- Pinturas de la placa absorbente
- Materiales masivos pared absorbente
- Cubiertas de vidrio
- Orientaciones de la chimenea sobre el plano cartesiano
- Condiciones climáticas de diferentes ciudades de la República Mexicana



a)

b)

Figura 7.1. Modelo físico chimenea solar y condiciones base de estudio paramétrico: a) un canal, b) dos canales

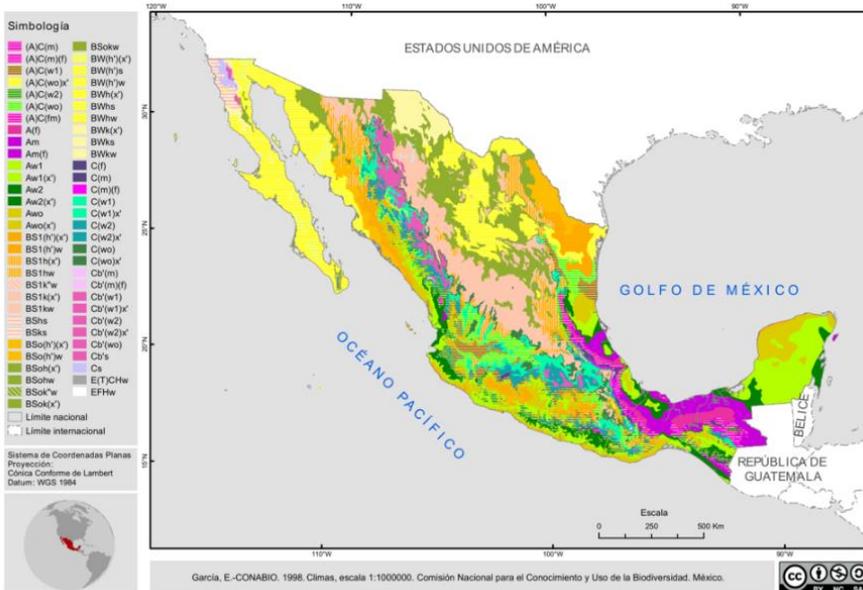
Parámetros base	
Altura	2
Hy [m]:	
Amplitud	1
Hx [m]:	
Espesor del canal	0.15
Hx2 [m]:	
Materiales	
Vidrio:	Comercial 3 mm
Placa absorbente:	Placa de aluminio 3/16" (sin pintura)
Aislante	Poliestireno extruido 2" (foamular)

Parámetros base	
Altura	2
Hy [m]:	
Amplitud	1
Hx [m]:	
Espesor del canal	0.15
Hx2 y Hx4 [m]:	
Materiales	
Vidrio:	Comercial 3 mm
Placa absorbente:	Placa de aluminio 3/16" (sin pintura)

En la Tabla 7.1 se presentan a detalle los parámetros a variar para ambos modelos de chimenea solar. En cuanto a las condiciones climáticas a evaluar, se propusieron seis ciudades de la República Mexicana: Hermosillo (Sonora), Monterrey (Nuevo León), Ciudad de México, Toluca (Estado de México), Villahermosa (Tabasco) y Mérida (Yucatán). En la Fig. 16 se muestra un mapa de la República Mexicana con una distribución de las diferentes condiciones climáticas.

Tabla 7.1. Parámetros de estudio

Altura del canal [m]	Espesor del canal [m]	Pinturas para placa absorbente	Materiales masivos	Cubierta de vidrio	Orientaciones de la chimenea solar
1.00	0.05	Negro mate	1-Metal 2-Ladrillo 3-Concreto	Comercial 3 mm	(Chimenea de un solo canal) Norte Sur Este Oeste
1.50	0.10		PCM: 4-Parafina RT25 HC 5-Parafina RT28 HC 6-Parafina RT35 HC 7-Parafina RT42 8-Parafina Mg29 9-Parafina 46-50	Comercial 6 mm	
2.00	0.15	Gris mate		Comercial 8 mm	(ChSo-TC) Este-Oeste Norte-Sur
2.50	0.20	Blanco mate			
3.00	0.25		Blanco mate	Comercial 8 mm	(ChSo-TC) Este-Oeste Norte-Sur
3.50	0.30	Blanco mate			
4.00	0.35		Blanco mate	Comercial 8 mm	(ChSo-TC) Este-Oeste Norte-Sur
Total: 7	Total: 7	Total: 3			



Hermosillo: BW (Clima seco desértico)

Monterrey: BS (Semiseco), CW (Templado semicálido subhúmedo)

Ciudad de México: CW (Templado subhúmedo), CB (Templado semifrío subhúmedo), SB (Seco templado)

Toluca: CW (Templado subhúmedo), CB (Templado semifrío subhúmedo)

Villahermosa: AM (Cálido semicálido húmedo)

Mérida: AW (Cálido subhúmedo)

Figura 7.2. Climas de la República Mexicana

Actualmente, se cuentan con los datos climáticos de todo un año de estas ciudades. Estos datos se obtuvieron de las estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) correspondientes al año 2018. Para evaluar el desempeño de las chimeneas solares de uno y dos canales se evaluaron el día más cálido y frío de cada mes de todo el año en cada ciudad, lo cual corresponde a evaluar 24 días por ciudad.

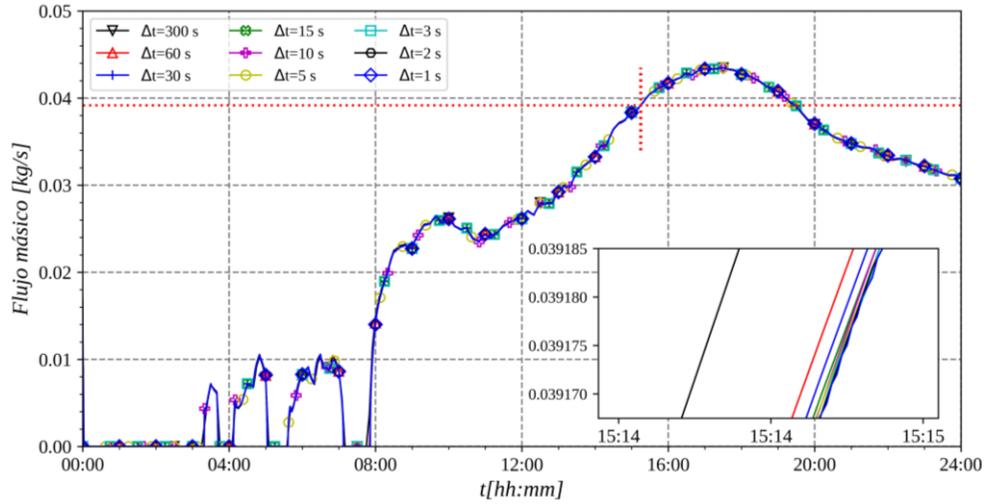
Por lo tanto, englobando los parámetros de la Tabla 7.1 para cada chimenea solar (uno y dos canales), las orientaciones para cada sistema y los días de modelación de acuerdo con los datos climáticos, se tiene una evaluación de 13248 casos para la ChSo-OC y 6624 casos para la ChSo-TC. La suma de todas las evaluaciones propuestas más las configuraciones de referencia da un total de 20448 casos.

En el Anexo A se presentan a detallan las propiedades térmicas y termodinámicas de los elementos que conforman ambas chimeneas solares, así como las gráficas de las condiciones climáticas anuales de las seis ciudades consideradas para el estudio.

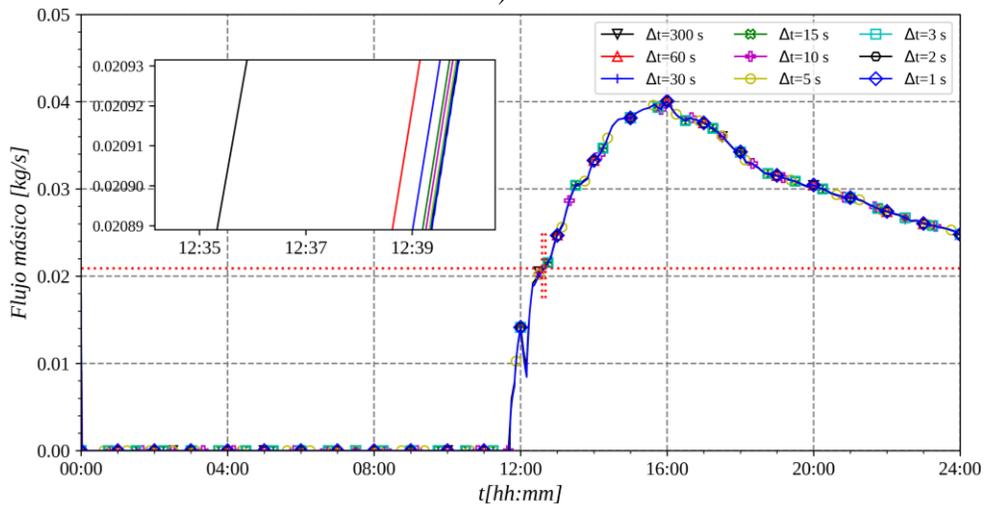
7.2. Independencia temporal

El análisis de independencia temporal se realizó para ambos modelos de chimenea solar. Se evaluaron tres días: el 9 de junio de Hermosillo, Sonora, al ser el día más cálido de las seis ciudades involucradas en el estudio paramétrico propuesto; el 15 de enero de Toluca, Edo. de México, al ser el día más frío de las seis ciudades; y el 25 de julio de Mérida, Yucatán, al ser el día más cálido de todo el año típico de esa ciudad. Se tomaron los datos provistos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA): radiación solar global (horizontal), temperatura ambiente, humedad relativa, presión atmosférica y velocidad del aire.

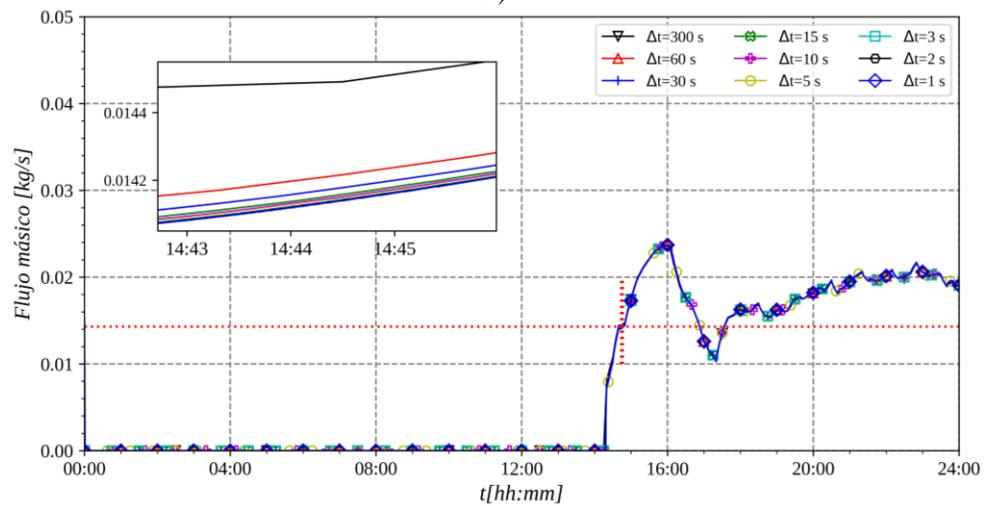
En cuanto a los intervalos de tiempo Δt se evaluaron los modelos cada: 300, 60, 30, 15, 10, 5, 3, 2 y 1 segundos. Los valores de temperatura del campo inicial para todo el sistema se consideraron a temperatura ambiente. La temperatura de entrada a los canales en ambos modelos de chimenea solar corresponde al valor de la temperatura del ambiente, ya que no se está realizando el análisis del sistema acoplado a alguna cavidad o habitación, lo que equivale que el sistema pasivo se encuentre expuesto a condiciones externas tanto a la entrada como salida. En la Fig. 7.3 se muestran los perfiles de flujo másico de las diferentes soluciones para la ciudad de Mérida, Yucatán.



a)



b)

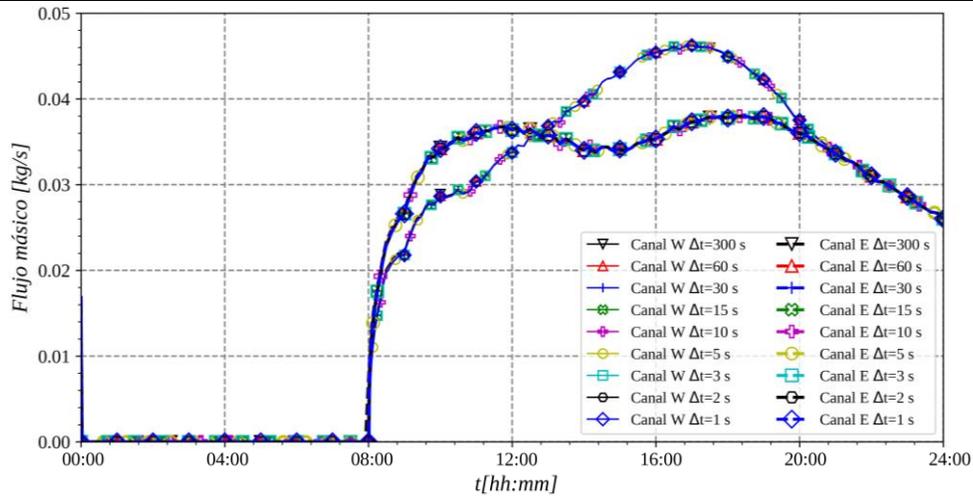


c)

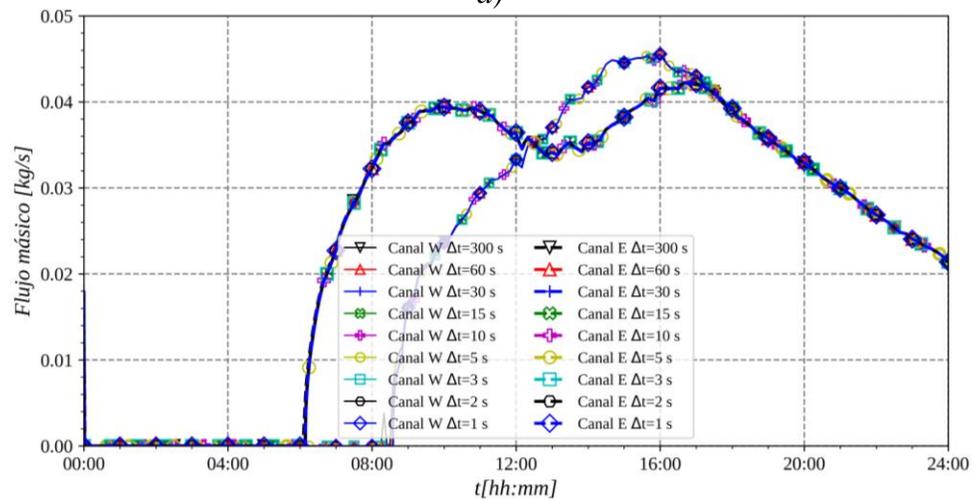
Figura 7.3. Flujo másico caso en ChSo-OC: a) Hermosillo, b) Mérida, c) Toluca

Al igual que para los casos donde se registró la temperatura más alta y baja, Hermosillo y Toluca, respectivamente, los perfiles obtenidos de la modelación usando los datos del día más cálido de Mérida también se superponen de tal forma que a simple vista no se distingue la diferencia a menos que se realice un acercamiento a una sección en específico. En la sección aumentada se observa como los resultados de la modelación con $\Delta t < 15$ segundos presentan una menor diferencia. De forma cuantitativa, al obtener las diferencias porcentuales entre las diferentes soluciones de Δt se observaron variaciones menores a 0.05% en los perfiles de flujo de aire inducido después de emplear $\Delta t \leq 10$ s. Por lo tanto, antes de definir el Δt definitivo para el estudio paramétrico, se presentan los resultados de la independencia temporal para el modelo de ChSo-TC. En la Fig. 7.4 se presentan los perfiles de las diferentes soluciones para el mismo caso de la ciudad de Mérida.

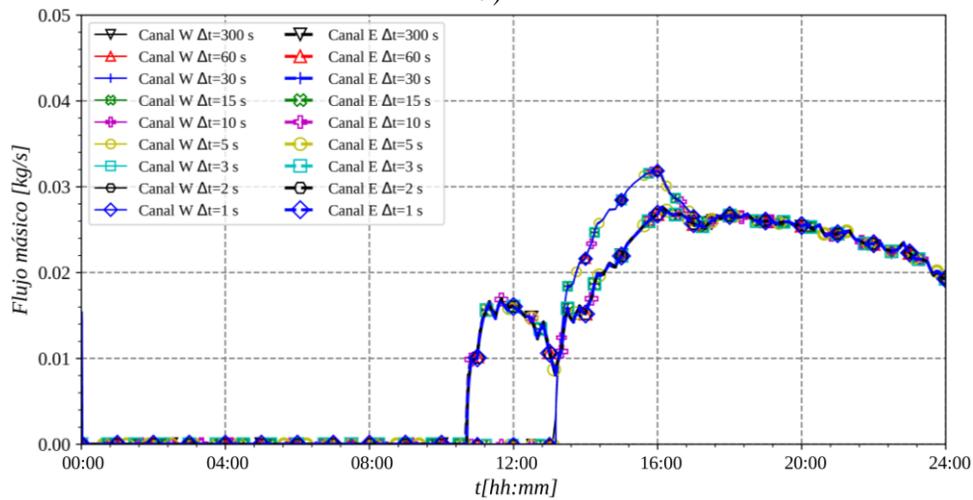
La diferencia horaria de operación de la chimenea solar, Fig. 7.3 y 7.4, se deriva de las condiciones climáticas de cada ciudad y los materiales de la pared absorbente. Para las tres ciudades se consideró ladrillo como pared absorbente, lo cual funcionó como un medio de almacenamiento de energía térmica que permitió proveer energía al canal durante las horas sin radiación solar. Por esta razón, en los resultados mostrados se observó un funcionamiento de la chimenea solar que excede el tiempo de modelación establecido, para lo cual fue necesario realizar un análisis de la condición inicial. El desfase en el tiempo de operación de la chimenea solar entre las ciudades muestra que entre mayor es la energía recibida, mayor es la rapidez de funcionamiento de la chimenea solar. Las condiciones de Toluca corresponden a las del día más frío de todo el estudio paramétrico en contraste con las condiciones de Hermosillo que corresponden a las del día más cálido, por esta razón se observa el efecto retardado de operación de la chimenea solar bajo las condiciones de Toluca respecto a las otras dos ciudades comparadas.



a)



b)



c)

Figura 7.4. Flujo másico caso en ChSo-TC: a) Hermosillo, b) Mérida, c) Toluca

El uso de diferentes intervalos de tiempo sigue sin ser notable a simple vista en el caso de la evaluación de la ChSo-TC para las tres condiciones evaluadas. En cuanto al comportamiento observado respecto al modelo de ChSo-OC es notable el aumento en el flujo másico máximo inducido bajo las mismas condiciones.

Los casos evaluados con el modelo de ChSo-TC muestran que al usar un $\Delta t < 15$ s se obtienen diferencias porcentuales por debajo de 0.05%, lo cual es aceptable. Las diferencias porcentuales más altas se obtuvieron al evaluar el sistema pasivo bajo condiciones más extremas como Toluca y Hermosillo. Tomando en cuenta los resultados obtenidos de la modelación de la chimenea solar de uno y dos canales, los intervalos de tiempo idóneos en ambos casos deben de elegirse en $\Delta t \leq 10$ s. Por lo tanto, para tener en cuenta los mismos pasos de tiempo a evaluar en ambos modelos en el estudio paramétrico, se estableció que el paso de tiempo ideal es $\Delta t = 5$ s para todos los casos futuros.

7.3. Análisis de la condición inicial

Debido al comportamiento observado en el análisis de independencia temporal para el modelo de ChSo-OC, se tomó la decisión de evaluar el efecto de la condición inicial y el tiempo de modelación requerido. En los casos del análisis de la independencia temporal, el campo de temperaturas de todos los elementos se igualó al valor de la temperatura ambiente para el primer instante de tiempo. Por lo tanto, para este ejercicio se añadió un día previo y uno posterior de modelación para analizar el impacto en los diferentes perfiles de temperatura y en los flujos de aire inducido en ambos modelos de chimenea solar. Esto significa que los datos climáticos correspondientes al día a evaluar se replicaron por tres. Sin embargo, debido a la cantidad de información generada, se presentan los resultados de la evaluación del modelo de ChSo-OC bajo las condiciones climáticas del día más cálido de la ciudad de Hermosillo, Sonora. En la Fig. 7.5 se presentan los perfiles de temperatura y flujo másico para los tres días de modelación.

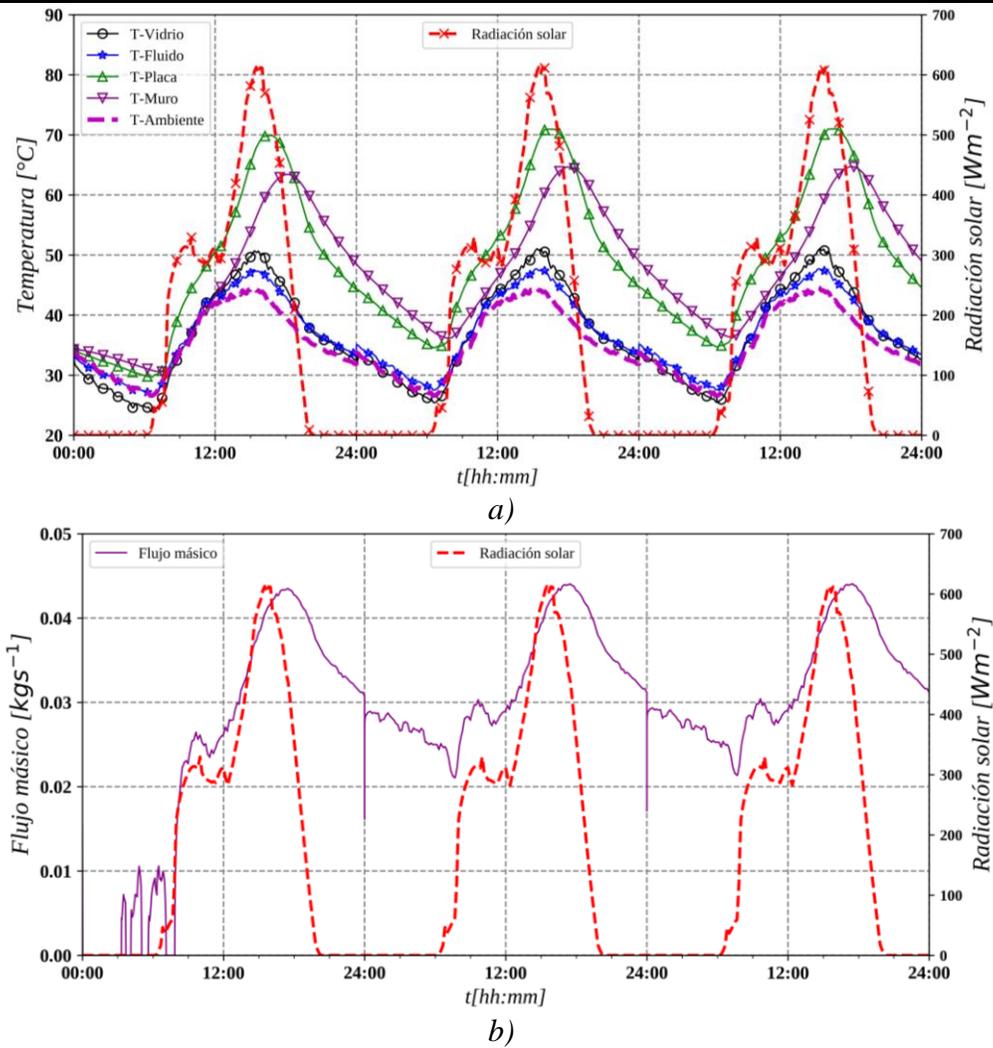


Figura 7.5. Comportamiento de extensión de tiempo (ChSo-OC): a) temperaturas, b) flujo másico

En la Fig. 7.5 se observa que las diferencias en los perfiles de temperatura son más notorias entre el primer y segundo día de modelación en las primeras horas, principalmente en los elementos de la placa absorbente y al interior del muro de ladrillo. Sin embargo, las diferencias entre el segundo y tercer día son imperceptibles, lo cual es un indicativo de que la solución solo requiere un día previo de modelación para que los resultados no se vean afectados por la condición inicial.

En cuanto a los picos máximos, se observa que los comportamientos son muy similares en los tres días, solo se observa una diferencia menor entre el caso del primer y segundo día, lo cual es normal ya que la condición inicial en ambos casos difiere significativamente.

En cuanto al comportamiento del flujo másico, se observa una variación significativa entre el primer y segundo día de modelación antes del mediodía. En cambio, esta diferencia se reduce entre el segundo y tercer día. Es durante este tiempo en el que las intermitencias en el flujo de aire inducido desaparecen y los valores registrados corresponden a una diferencia de temperaturas generado por el calor que el sistema entrega al fluido debido al almacenamiento de energía en el muro masivo durante el día anterior.

En la Tabla 7.2 se presentan de forma cuantitativa las diferencias porcentuales entre las variables presentadas en la Fig. 7.5 del primer día respecto al segundo día, y la diferencia entre los perfiles del segundo día respecto al tercero.

Tabla 7.2. Diferencias porcentuales entre los días de modelación en la ChSo-OC

<i>Tiempo de modelación = 21600 s (6 horas)</i>					
Temperatura vidrio Día 1-2	Temperatura vidrio Día 2-3	Temperatura fluido Día 1-2	Temperatura fluido Día 2-3	Temperatura placa Día 1-2	Temperatura placa Día 2-3
5.4122	0.1770	3.0514	0.0749	14.9410	0.4894
Temperatura muro Día 1-2	Temperatura muro Día 2-3	Flujo másico Día 1-2	Flujo másico Día 2-3	Flujo volumétrico Día 1-2	Flujo volumétrico Día 2-3
17.8902	0.6004	66.8613	1.1152	67.0545	1.1281
<i>Tiempo de modelación = 43200 s (12 horas)</i>					
Temperatura vidrio Día 1-2	Temperatura vidrio Día 2-3	Temperatura fluido Día 1-2	Temperatura fluido Día 2-3	Temperatura placa Día 1-2	Temperatura placa Día 2-3
1.4489	0.0469	0.6404	0.0189	4.3940	0.1423
Temperatura muro Día 1-2	Temperatura muro Día 2-3	Flujo másico Día 1-2	Flujo másico Día 2-3	Flujo volumétrico Día 1-2	Flujo volumétrico Día 2-3
6.7936	0.2217	9.5746	0.2758	9.7690	0.2828
<i>Tiempo de modelación = 64800 s (18 horas)</i>					
Temperatura vidrio Día 1-2	Temperatura vidrio Día 2-3	Temperatura fluido Día 1-2	Temperatura fluido Día 2-3	Temperatura placa Día 1-2	Temperatura placa Día 2-3
0.3984	0.0128	0.1912	0.0057	1.2596	0.0407
Temperatura muro Día 1-2	Temperatura muro Día 2-3	Flujo másico Día 1-2	Flujo másico Día 2-3	Flujo volumétrico Día 1-2	Flujo volumétrico Día 2-3
1.9505	0.0632	1.2115	0.0369	1.2719	0.0370

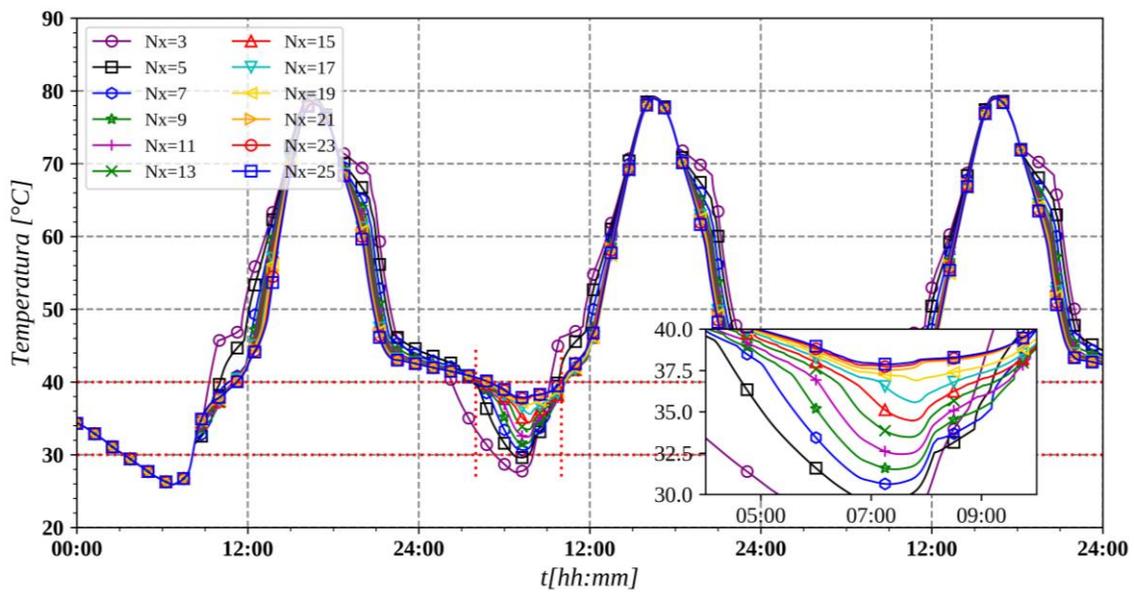
Nota: valores en negritas representan valores porcentuales (%)

Como se observa en la Tabla 7.2, las diferencias más altas se encuentran antes del mediodía al comparar los datos del primer y segundo día. Sin embargo, las diferencias disminuyen conforme aumenta el tiempo de modelación, desde obtener una diferencia porcentual máxima de 17.89% a 1.95%. En cambio, al comparar los datos de la modelación del segundo con el tercer día, se encontró que las diferencias en su mayoría se encuentran por debajo del 1%, siendo el máximo registrado de 1.12% para el caso del flujo volumétrico a las 6 horas de modelación, lo cual es aceptable para el estudio.

Por lo tanto, se establece que para el estudio paramétrico la modelación debe ser de tres días, replicando las condiciones climáticas, y de esta manera tomar los resultados del segundo y parte del tercer día de modelación para analizar el efecto del almacenamiento de energía en materiales masivos.

7.4. Independencia de malla del elemento masivo

Para el análisis de independencia de malla se tomaron en cuenta las condiciones de la ciudad de Hermosillo para el día más cálido de un año típico (9 de junio) y se evaluaron dos tipos de materiales: concreto y PCM RT42. En cuanto a la cantidad de nodos evaluados se consideraron: 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23 y 25 nodos al interior del elemento masivo. A continuación, en la Fig. 7.6 se presentan los perfiles de temperatura al centro del muro y el flujo másico del canal bajo las diferentes soluciones variando el número de nodos.



a)

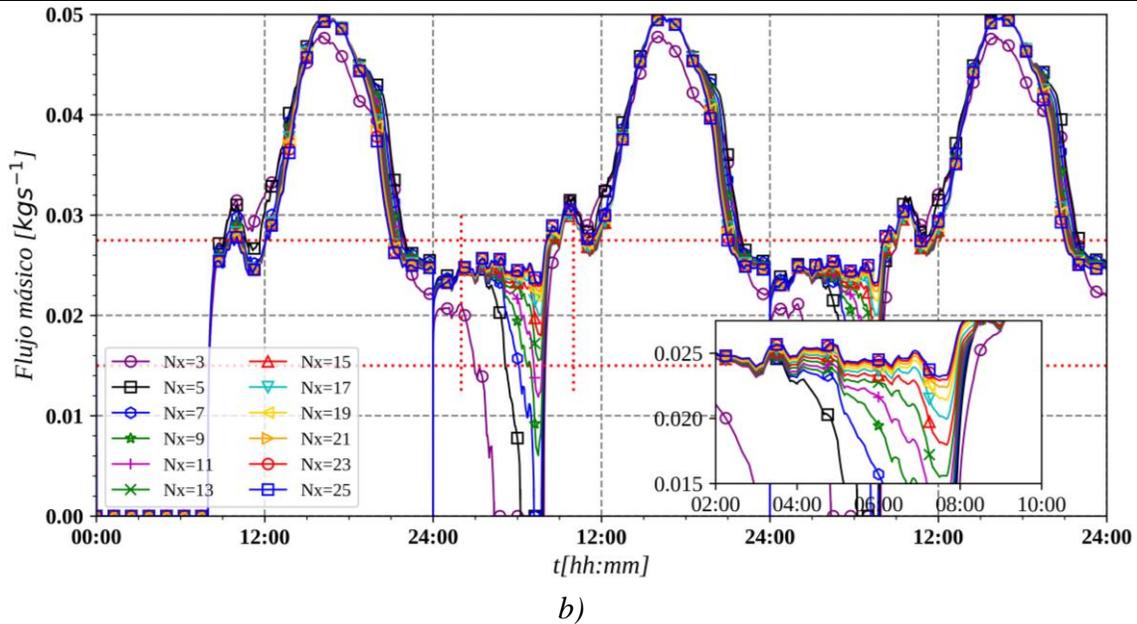


Figura 7.6. Variación de nodos en muro absorbente (PCM-RT42) en ChSo-OC: a) temperatura al centro del muro, b) flujo másico

Las diferencias entre las soluciones en el perfil de temperaturas son visibles a simple vista, sin embargo, al realizar un acercamiento a la zona de mayor variación se observa que las variaciones disminuyen al usar una cantidad de nodos $Nx > 19$. En cuanto al comportamiento del flujo másico se observó una variación más pronunciada pasada la medianoche al igual que en el comportamiento de la temperatura. Como se observa en la Fig. 7.6(b), en el acercamiento a la sección de las primeras horas de modelación del segundo día, las variaciones se reducen considerablemente al usar una cantidad de nodos $Nx > 19$, tal como en el comportamiento de la temperatura.

Para una solución empleando 19 nodos, las diferencias porcentuales son menores al 2.25% mientras que la solución de 21 nodos presenta diferencias porcentuales máximas de 1.31% lo cual es aceptable para la solución numérica. La solución del modelo teórico al emplear $Nx > 17$ nodos permite obtener un comportamiento satisfactorio de la ChSo-OC.

Por lo tanto, considerando los resultados obtenidos en el análisis del concreto y el PCM, se define que el número de nodos a emplear en la división de los materiales masivos es de $Nx = 21$ nodos para todos los casos.

7.5. Resultados de estudio paramétrico

A continuación, se presenta un resumen de los resultados del estudio paramétrico. Se determinó que a través de la variación del espesor del canal se obtuvieron los flujos de aire más altos de todo el estudio. Por lo tanto, en esta sección se describen los resultados de flujo de aire obtenidos a través de la variación del espesor del canal. También se describen el comportamiento del flujo de aire inducido por los diferentes materiales empleados en la pared absorbente al ser de interés el efecto de los materiales de cambio de fase en el flujo de aire inducido en las chimeneas solares.

Debido a la cantidad de información generada para las seis ciudades de estudio, en este capítulo solo se presentan los resultados y el análisis de la ventilación inducida bajo las condiciones de Hermosillo, Sonora. Los respectivos resultados del resto de ciudades evaluadas se presentan en el Anexo C.

Los flujos volumétricos promedios obtenidos fueron comparados con los requerimientos de ventilación total para edificaciones tipo “unidad-habitacional” reportados por las **ASHRAE 62.2-2019**. En la Tabla 7.3 se muestran los valores de flujo de aire mínimos de referencia de acuerdo con la norma para contrastarlos con los flujos volumétricos obtenidos por las chimeneas solares en el estudio paramétrico.

Tabla 7.3. Casos evaluados de acuerdo con ANSI/ASHRAE 62.2-2019

Configuraciones	Parámetros: Area [m ²]	Ventilación por unidad habitacional \dot{V} [m ³ h ⁻¹]
Caso base	9	30.06
Caso 1	18	47.52
Caso 2	36	82.44
Caso 3	54	117.36
Caso 4	72	152.28
Caso 5	90	187.20
Caso 6	108	222.12
Caso 7	126	257.04

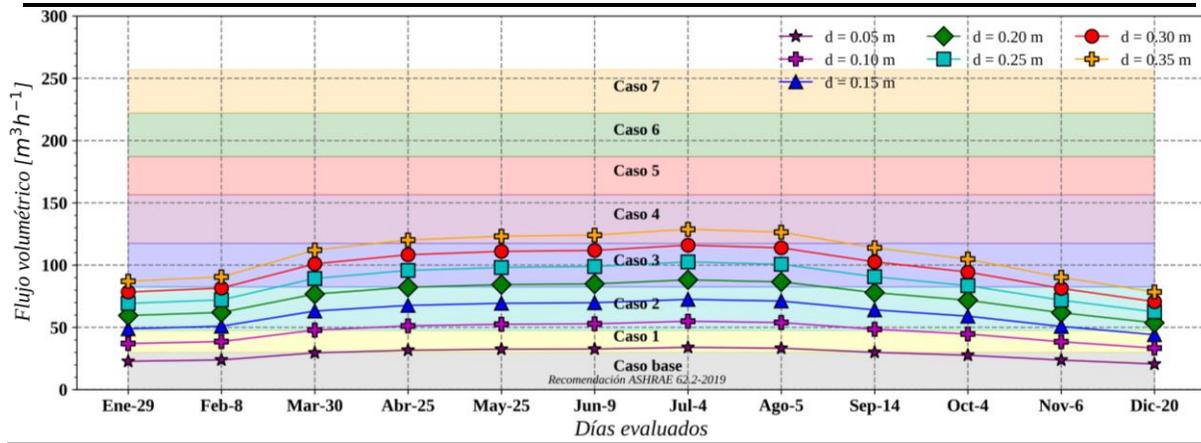
7.5.1. Hermosillo, Sonora

La ciudad de Hermosillo, Sonora, se caracteriza por ser una de las ciudades con las temperaturas más altas de la República Mexicana. Los datos climáticos del año típico presentan la temperatura más alta registrada de hasta 44.1°C. Además, tomando en cuenta

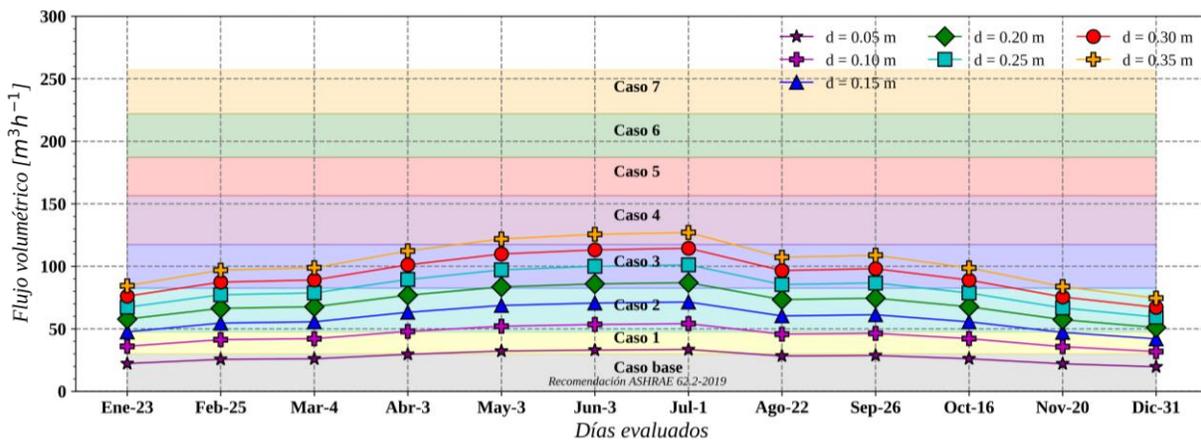
las características del tipo de clima seco desértico, la temperatura más baja registrada durante el invierno fue de 1.79°C , lo cual es característico de un clima extremo. En el Anexo C se presentan las gráficas de las condiciones climáticas anuales. En la Fig. 7.7 se presenta el flujo volumétrico promedio diario inducido durante el año por la ChSo-OC y la ChSo-TC.

La variación del espesor de la ChSo-OC provocó los flujos volumétricos más altos para los días evaluados. Como se muestra en la Fig. 7.7(a), se observa un aumento significativo del flujo de aire al aumentar el espesor del canal, siendo la configuración de $d = 0.35$ m la que presenta los valores de flujo volumétricos más altos. De acuerdo con los datos registrados al evaluar los días cálidos, el flujo de aire máximo inducido fue de $128.75\text{ m}^3\text{h}^{-1}$ (julio) para la orientación Oeste mientras que, entre los días fríos, el flujo de aire máximo inducido fue de $126.98\text{ m}^3\text{h}^{-1}$ (julio) para la orientación Oeste. A excepción de la configuración $d = 0.05$ m, el resto de las configuraciones cumplieron con los requerimientos mínimos de ventilación del Caso base. Sin embargo, el desempeño máximo de la ChSo-OC apenas cubrió los requisitos mínimos del Caso 3.

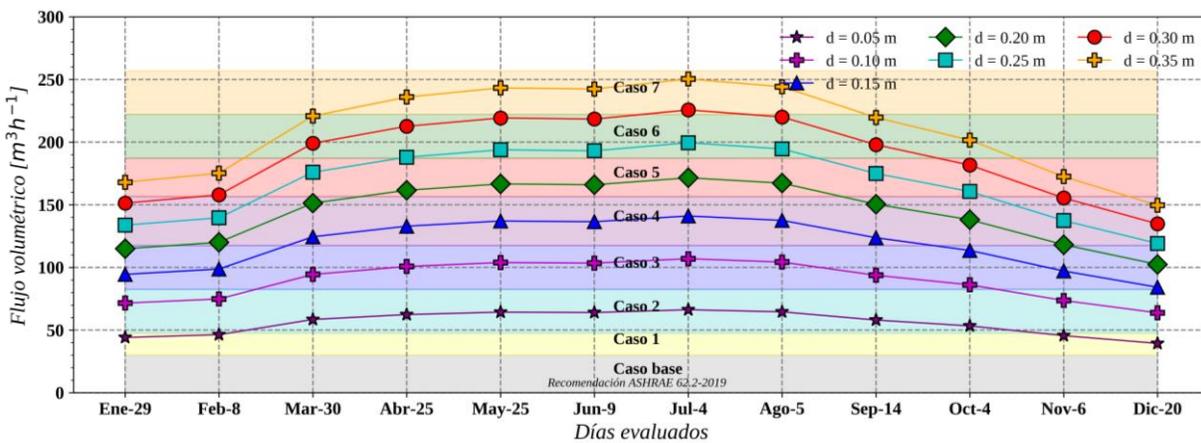
En cuanto al comportamiento de la ChSo-TC, Fig. 7.7(b), al evaluar los días cálidos el flujo de aire máximo inducido fue de $250.38\text{ m}^3\text{h}^{-1}$ (julio) usando un $d = 0.35$ m para la orientación Este-Oeste; entre los días fríos, el flujo de aire máximo inducido fue de $249.18\text{ m}^3\text{h}^{-1}$ (junio) para la orientación Este-Oeste. La capacidad mínima de ventilación de la ChSo-TC fue suficiente para satisfacer la demanda del Caso base, y en la mayoría de las evaluaciones el Caso 1. Los resultados de la ChSo-TC casi duplican lo obtenido por el uso de una ChSo-OC, lo cual se debe a una mayor área de captación de energía y aprovechamiento de la energía recibida. Esto se ve reflejado en su capacidad máxima de inducir ventilación natural ya que tanto para los días cálidos y fríos de primavera-verano, la ChSo-TC satisface las necesidades de ventilación del Caso 6, y solo se queda ligeramente por debajo del Caso 7.



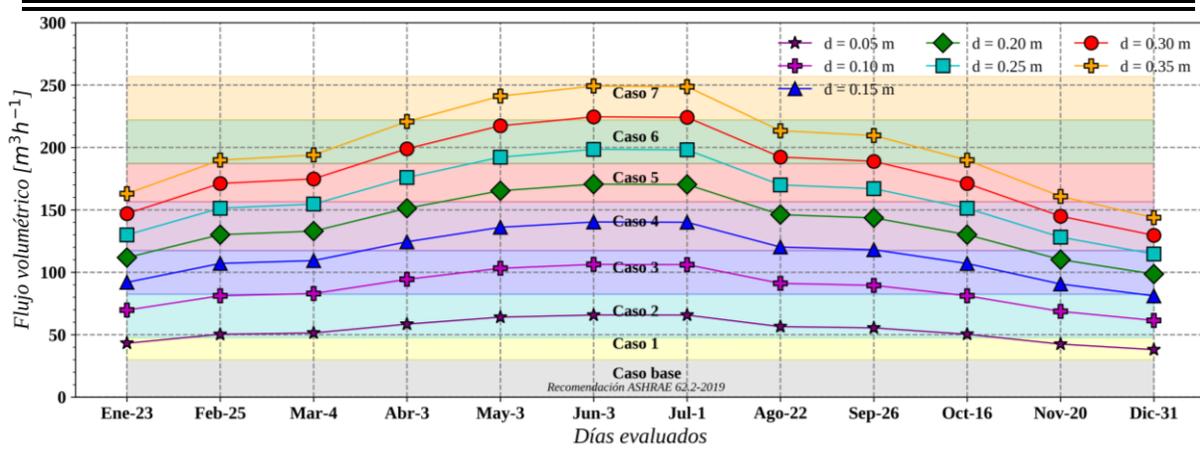
a)



b)



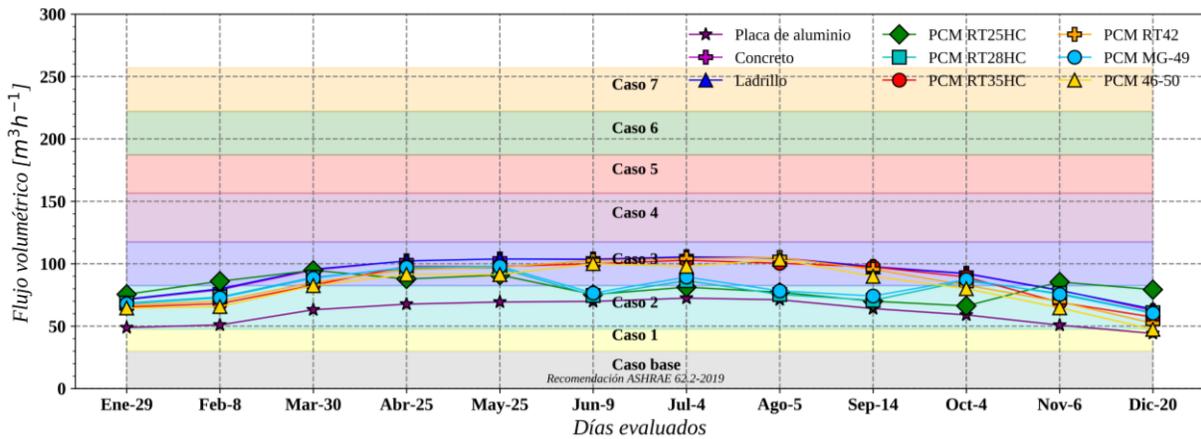
c)



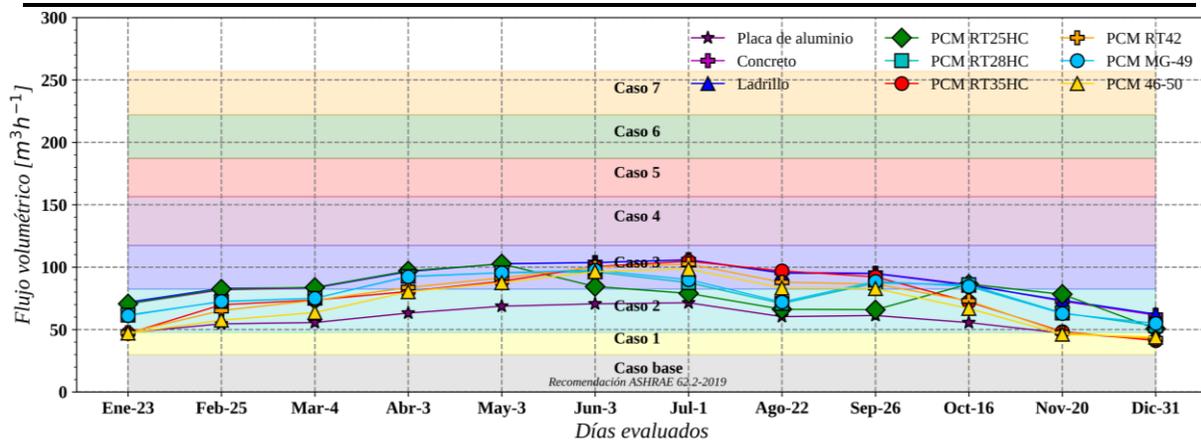
d)

Figura 7.7. Flujo volumétrico-Espesor del canal-Hermosillo: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Oeste-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC

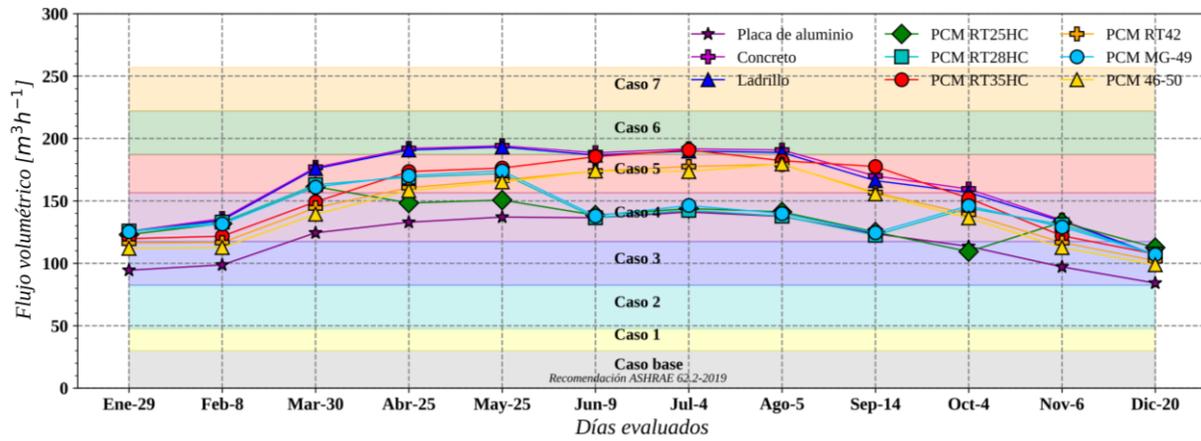
Respecto a la influencia de los materiales de cambio de fase en el comportamiento de las chimeneas solares, en la Fig. 7.8 se presenta el comportamiento anual del estudio paramétrico de materiales empleados en la pared absorbente para las mismas orientaciones: Oeste para la ChSo-OC y Este-Oeste para la ChSo-TC. Todos los casos en los que se evaluaron diferentes materiales masivos se empleó un espesor del canal de 0.15 m, un vidrio de 3 mm y la superficie del contenedor del PCM de color negro mate.



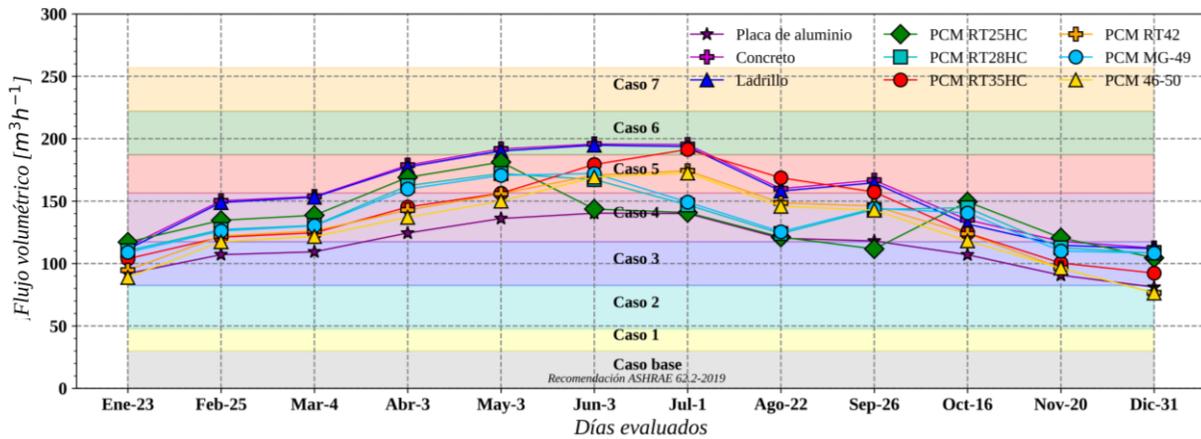
a)



b)



c)



d)

Figura 7.8. Flujo volumétrico-material de pared absorbente-Hermosillo: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Oeste-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC

A diferencia de la evaluación de parámetros como la altura de la chimenea y el espesor del canal, el comportamiento del flujo inducido a lo largo del año para cada PCM presentó variaciones significativas.

Para el caso de la ChSo-OC, Figs. 7.8(a), el flujo de aire promedio más alto inducido fue de $105.95 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ para el día más frío de julio y para la configuración de concreto; también para el PCM RT42 se registraron flujos de aire promedio de hasta $104.93 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ bajo las condiciones del día más cálido del mes de agosto. El uso de materiales como ladrillo y concreto presentaron comportamientos más estables de flujo volumétrico inducido a lo largo del año en comparación a los materiales de cambio de fase. Sin embargo, los flujos de aire generados son superiores a los inducidos por la configuración base y son similares a los inducidos en configuraciones de ladrillo y concreto. En la mayoría de las configuraciones, el uso de materiales masivos permite inducir flujos de aire superiores a los requeridos por el Caso base y Caso 1. La capacidad máxima de ventilación fue suficiente para satisfacer los requerimientos menos al del Caso 3. En cuanto al tiempo de funcionamiento de la ChSo-OC en días cálidos, durante los meses de noviembre-enero (otoño-invierno) los tiempos de operación oscilaron entre los 14.29 y 22.17 horas. El resto de los casos presentaron tiempos superiores a las 23 horas de operación. Los materiales masivos que permitieron mantener el mayor tiempo de operación a la ChSo-OC son: muro de concreto, PCM RT25HC y el muro de ladrillo.

La ChSo-TC indujo flujos de aire superiores a la ChSo-OC a lo largo de todo el año. De nueva cuenta, el flujo volumétrico más alto inducido fue a través de una configuración de concreto; este flujo volumétrico fue de $195.77 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ mientras que el flujo de aire más alto inducido en una configuración de ChSo-TC con PCM fue de $177.53 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, en el que se consideró un PCM RT35 HC. La mayoría de los materiales de cambio de fase no completaron su ciclo de cambio de fase en su totalidad, ya que la temperatura interna de estos materiales masivos se encontró por encima de la región de mezcla la mayor parte del tiempo, esto para los días más cálidos. Durante las épocas con mayores descensos de la temperatura ambiente, algunos materiales de cambio de fase no alcanzaron a fundirse por completo, lo cual también afectó el tiempo de operación del sistema. Configuraciones de PCM como la RT35HC y el RT25HC alcanzaron las 24 horas continuas de operación. Los menores tiempos de operación

se registraron durante los meses de diciembre (invierno) en los que los tiempos oscilaron entre los 19.16 y 19.83 horas. El resto de las configuraciones presentaron tiempos de operación superiores a las 21 horas.

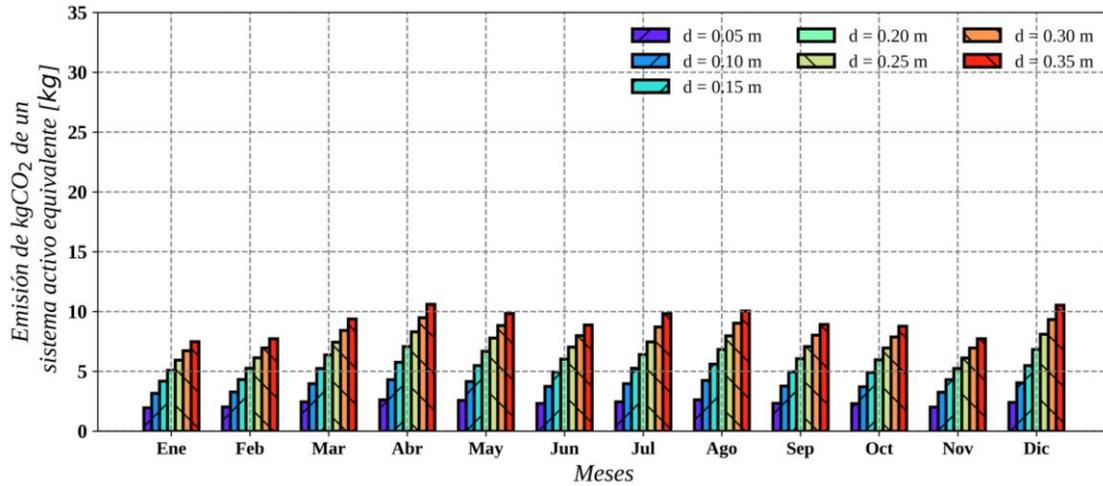
Debido a la cantidad de información generada durante el estudio paramétrico, se procedió a realizar un análisis de regresión lineal multivariable tomando en cuenta no solo los mejores casos como los mostrados en este capítulo, sino todos los elementos analizados en el estudio. La metodología se describe en el Apéndice D.

7.6. Resultados de análisis de emisión de contaminantes, consumo eléctrico y tiempo de recuperación de inversión

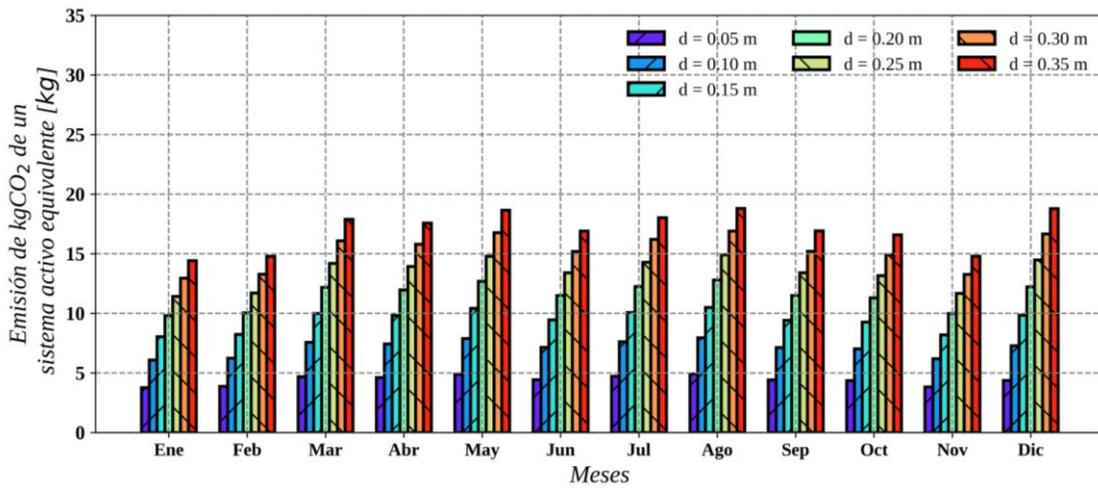
En esta sección se presentan los kgCO₂ emitidos por un sistema activo que provee la misma ventilación que la configuración de chimenea solar en cuestión, el consumo eléctrico en kWh, así como el costo de energía eléctrica equivalente y el tiempo de recuperación con base en el costo invertido para la implementación de la chimenea solar para cada configuración evaluada. A continuación, se presentan los resultados de la evaluación bajo las condiciones de Hermosillo, en donde se muestra el efecto de la ChSo-OC y la ChSo-TC. La metodología empleada para realizar los cálculos correspondientes se presenta en el Anexo E, mientras que los resultados para el resto de las ciudades se presentan en el Anexo F.

7.6.1. Hermosillo, Sonora

La estimación de los kgCO₂ emitidos por un sistema activo que induce la misma ventilación natural que una chimenea solar es directamente dependiente del comportamiento del flujo de aire inducido, por lo que las tendencias máximas se observaron de igual forma en las orientaciones con mejor desempeño. Por lo que, siguiendo el mismo esquema de presentación de resultados, a continuación, se muestran en la Fig. 7.9 el comportamiento anual de las mayores emisiones de dióxido de carbono que se están evitando a través del uso de la ChSo-OC y la ChSo-TC. En primera instancia se presentan los resultados de la variación de espesores del canal, con el cual se obtuvieron los mejores resultados. Como se mencionó en la Fig. 7.1, las condiciones base de la evaluación de las chimeneas solares consistieron en evaluar un vidrio de 3 mm y una placa metálica con recubrimiento negro mate.



a)

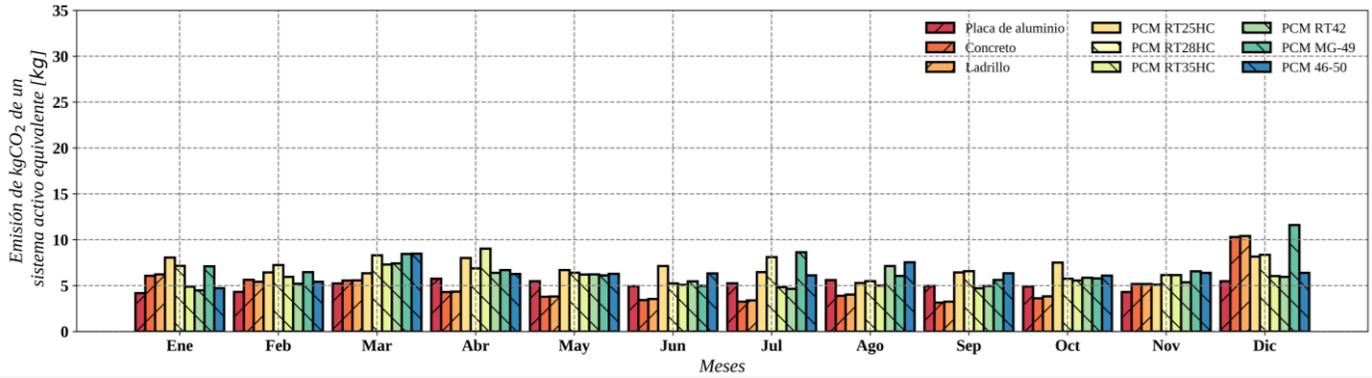


b)

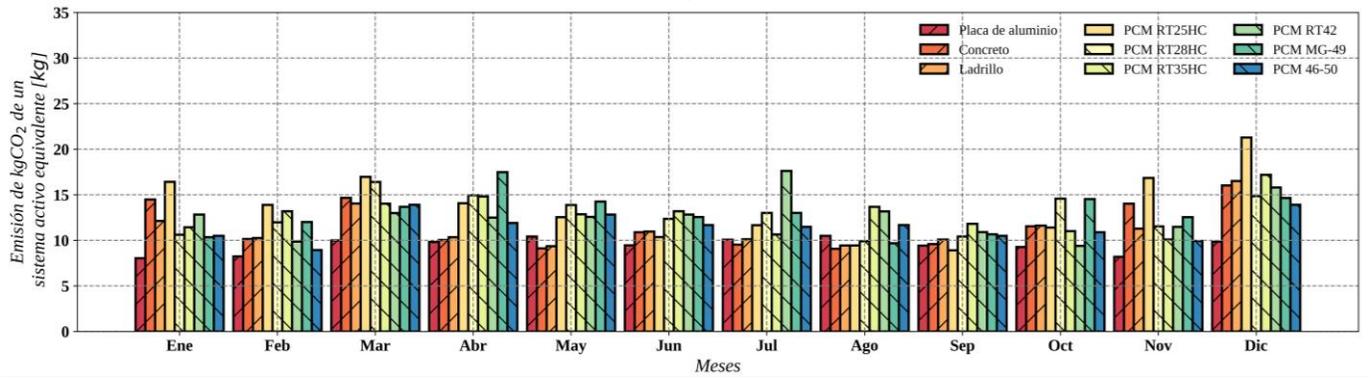
Figura 7.9. Equivalencia de kgCO₂ en chimenea solar variando espesor del canal (Hermosillo): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

Como se muestra en la Fig. 7.9, la capacidad de reducir contaminantes por medio de ChSo-TC es completamente superior al comportamiento de la ChSo-OC. En el estudio paramétrico del espesor del canal se observaron los mayores flujos de aire inducidos de todo el estudio paramétrico, lo que significa que bajo estas configuraciones se observa aún mayor la cantidad de kgCO₂ que no se está emitiendo a través del uso de sistemas activos. Para la ChSo-OC orientado al oeste y empleando un espesor de $d=0.35\text{m}$ se estimaron hasta 109.72 kgCO_{2e} mientras que para la ChSo-TC esto se incrementó hasta 204.15 kgCO_{2e}, esto tomando en cuenta el año completo de evaluación.

En la Fig. 7.10 se muestra el comportamiento de los kgCO₂ desde la perspectiva de las diferentes configuraciones de muro en ambos modelos de chimenea solar. Se empleó un espesor del canal de 0.15 m, un vidrio de 3 mm y la superficie del contenedor del material masivo de color negro mate.



a)



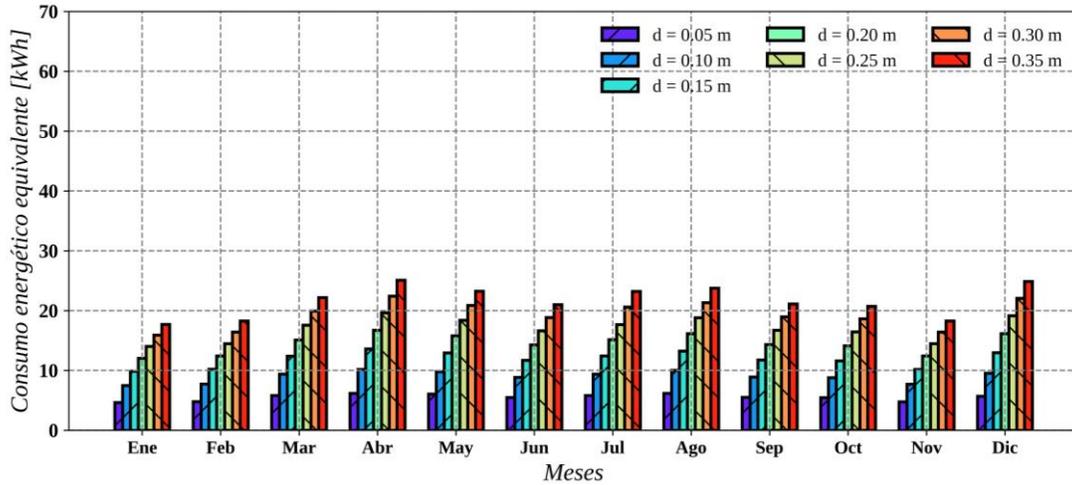
b)

Figura 7.10. Equivalencia de kgCO₂ en chimenea solar variando material de pared absorbente (Hermosillo): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

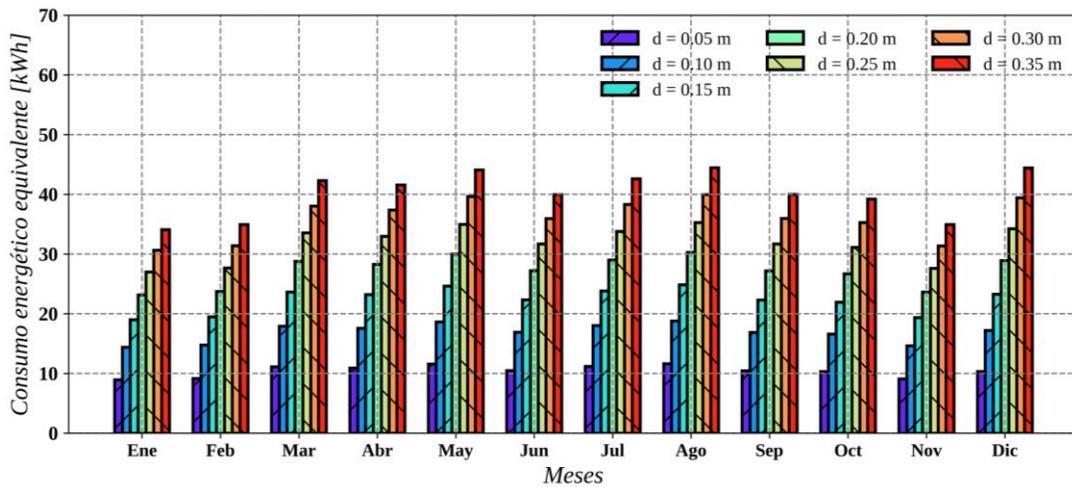
A diferencia del análisis en otros parámetros en ambas configuraciones de chimenea solar, no existe una tendencia a simple vista para determinar que configuración permitió obtener la mayor reducción de kgCO₂. Al considerar el efecto de emisión en todo el año, para el flujo de aire de la configuración de ChSo-OC con PCM MG-49 se estimaron hasta 84.10 kgCO₂ mientras que para la configuración de ChSo-TC con PCM RT25HC se estimaron hasta 163.83 kgCO₂. Lo cual demuestra el impacto positivo de la combinación de sistemas pasivos con materiales de cambio de fase para cubrir las demandas de ventilación en edificaciones.

Con respecto a la potencia eléctrica de un sistema activo equivalente al flujo de aire inducido por las chimeneas solares, en la Fig. 7.11 se muestran nuevamente los comportamientos de

cada mes considerando los resultados con mejores desempeños de todo el estudio paramétrico. Para estas configuraciones se empleó un vidrio de 3 mm y una placa metálica con recubrimiento negro mate.



a)



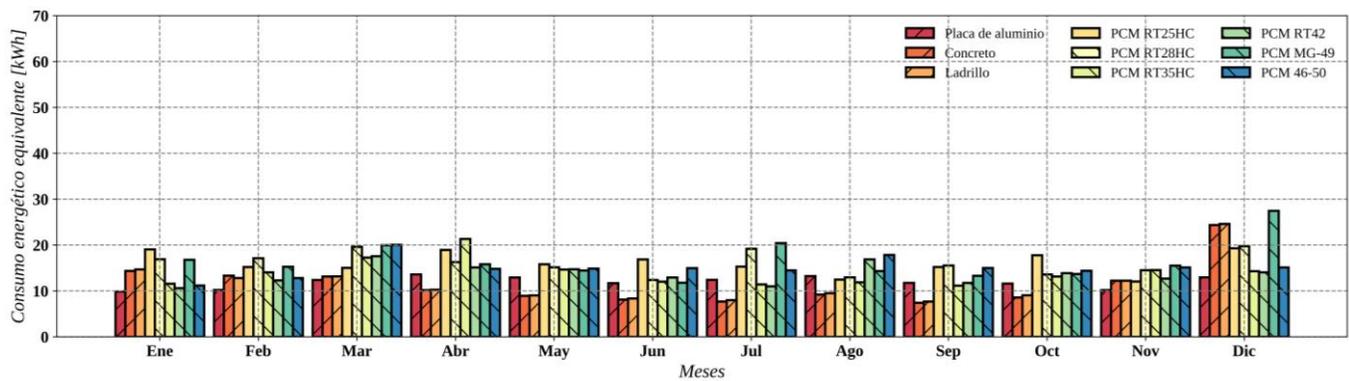
b)

Figura 7.11. Consumo energético equivalente variando espesor del canal (Hermosillo): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

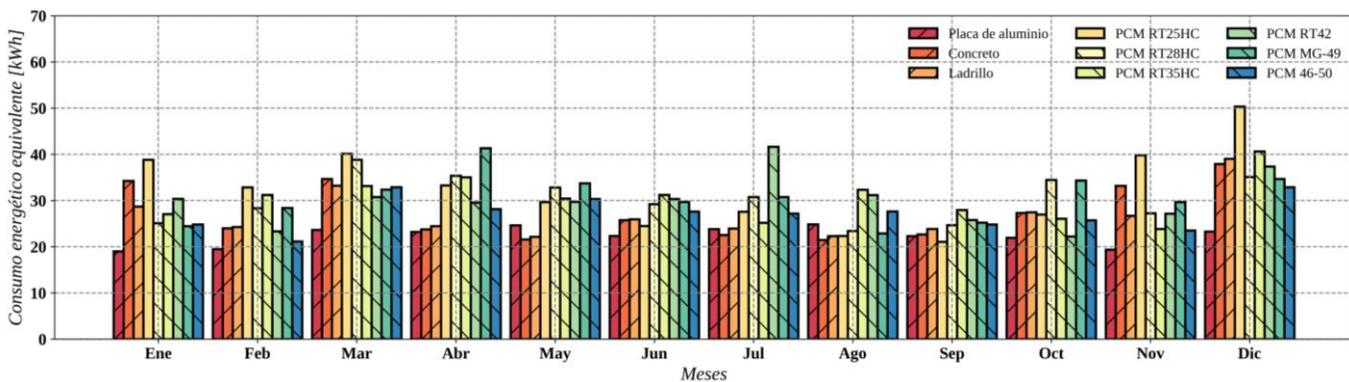
Al estimar el consumo eléctrico equivalente anual para los diferentes espesores evaluados, se determinó que para un espesor de $d = 0.35$ m se obtuvo un consumo total anual de 259.40 kWh para la ChSo-OC en la orientación Oeste, mientras que para la ChSo-TC fue de 482.63 kWh para la orientación Este-Oeste. La ChSo-TC casi duplicó el resultado obtenido por parte

de la ChSo-OC. Estos valores revelan la cantidad de energía requerida para activar un sistema activo que permita satisfacer los niveles de ventilación inducidos por las chimeneas solares.

En la Fig. 7.12 se presentan los resultados correspondientes al estudio paramétrico de los materiales de la pared absorbente. Para estas configuraciones se empleó un espesor del canal de 0.15 m, un vidrio de 3 mm y la superficie del contenedor del material masivo de color negro mate.



a)



b)

Figura 7.12. Consumo energético equivalente variando pared absorbente (Hermosillo): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

Como se muestra en la Fig. 7.12, no es clara la tendencia sobre que configuración presentó un mayor consumo eléctrico equivalente. Sin embargo, al realizar la sumatoria de todos los meses para obtener el consumo anual, se determinó que la ChSo-OC orientada al oeste y al emplear un PCM MG-49 induce suficiente flujo de aire equivalente al de un sistema activo cuyo consumo eléctrico anual es de 198.82 kWh, mientras que para la ChSo-TC el mejor

desempeño se obtuvo a través de un PCM RT25HC equivalente a 387.30 kWh orientada en Este-Oeste. Estos resultados muestran el impacto del consumo eléctrico y ambiental si se estuviese implementando un sistema activo de ventilación mecánica. Además, que el uso de PCM en la pared absorbente permite extender el tiempo de operación a horarios nocturnos donde también se requiere de la ventilación.

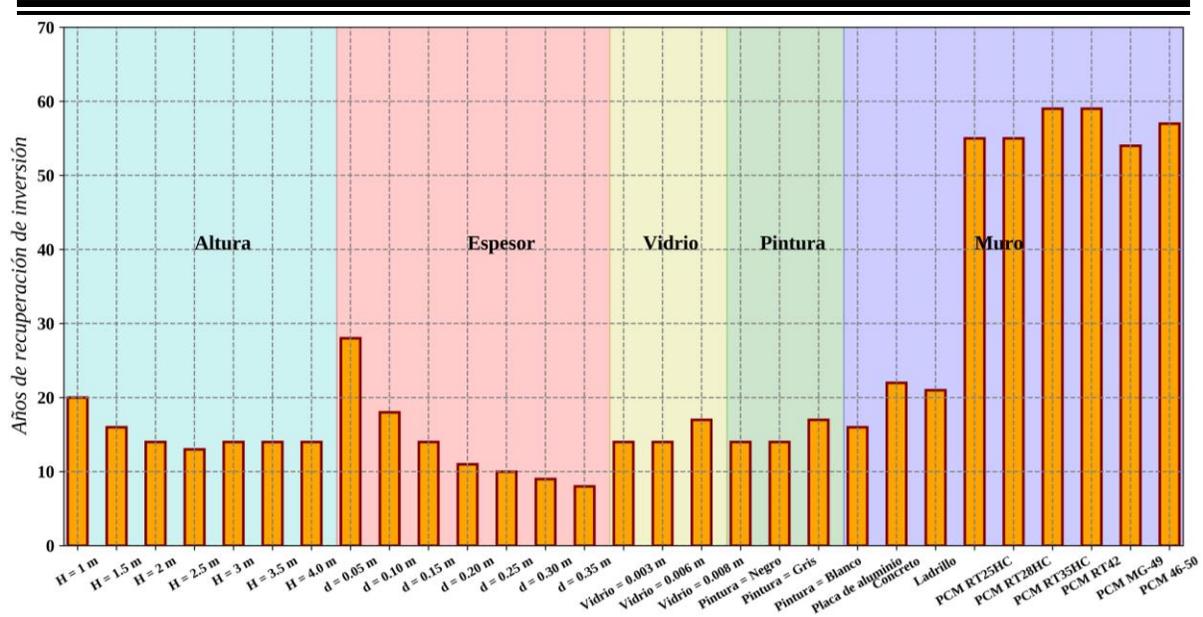
A partir del cálculo del consumo energético equivalente y del costo de construcción para las diferentes configuraciones de chimenea solar mostrado en la Tabla 7.1, se realizó la estimación de los años de recuperación de la inversión inicial para construir una ChSo-OC y ChSo-TC. En la Tabla 7.4 se muestra el impacto económico del consumo energético equivalente por configuración de chimenea solar usando la Tarifa 1F de la CFE en un año para la orientación Oeste de la ChSo-OC y Este-Oeste de la ChSo-TC, mientras que en la Fig. 7.13 se muestran los años de recuperación a partir del costo de inversión y del costo del consumo energético equivalente en todas las configuraciones evaluadas para orientaciones Oeste y Este-Oeste de la ChSo-OC y ChSo-TC respectivamente.

Como se observa en la Tabla 7.4, las configuraciones de ChSo-OC y ChSo-TC con mayor impacto en el consumo energético equivalente para inducir ventilación natural son aquellas donde se varía el espesor de canal (zona naranja), seguido de la altura de la chimenea solar (zona azul) y el material masivo empleado en el muro masivo (zona purpura). El mayor costo del consumo energético equivalente de la ChSo-OC obtenido en un año de operación fue de \$840.72 MXN, mientras que para la ChSo-TC fue de \$1564.09 MXN, ambos valores se obtuvieron para una configuración de espesor de canal $d = 0.35$ m. Se recalca que estos costos representan el consumo energético de un año de un sistema activo como un ventilador mecánico requiere para proveer la ventilación natural generada por la chimenea solar.

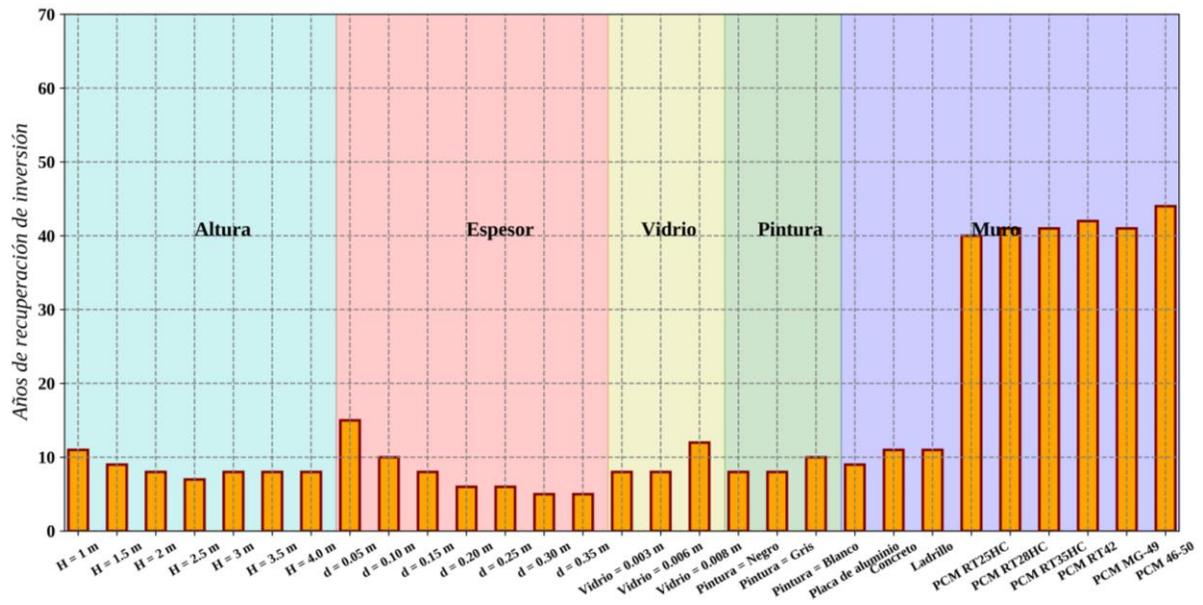
Tabla 7.4. Costo anual del consumo energético equivalente para las configuraciones de chimenea solar (Hermosillo)

Configuración	ChSo-OC (orientación Oeste) Costo de consumo eléctrico [€]	ChSo-TC (orientación Este-Oeste) Costo de consumo eléctrico [€]
H = 1.0 m	302.26	563.06
H = 1.5 m	387.97	725.27
H = 2.0 m	463.12	867.80
H = 2.5 m	531.24	997.21
H = 3.0 m	594.20	1116.98
H = 3.5 m	653.16	1229.27
H = 4.0 m	708.87	1335.52
d = 0.05 m	215.18	405.56
d = 0.10 m	349.23	655.65
d = 0.15 m	463.12	867.80
d = 0.20 m	565.94	1059.08
d = 0.25 m	661.45	1236.58
d = 0.30 m	753.42	1404.15
d = 0.35 m	840.72	1564.09
Vidrio 3mm	463.12	867.80
Vidrio 6mm	468.45	869.74
Vidrio 8mm	463.45	856.24
Pintura negra	463.12	867.80
Pintura gris	429.89	803.97
Pintura blanca	363.36	660.06
Placa Metálica	463.12	867.80
Concreto	446.31	1066.42
Ladrillo	452.47	1043.80
PCM RT25 HC	625.09	1254.71
PCM RT28 HC	625.01	1183.19
PCM RT35 HC	541.77	1179.07
PCM RT42	529.72	1164.50
PCM MG-49	644.70	1190.56
PCM 46-50	585.54	1058.40

Debe resaltarse que, aunque se considere bajo el costo anual del consumo energético equivalente por parte de sistemas activos para satisfacer el flujo de aire generado por ventilación, aún no se incorpora el impacto en el confort térmico. Emplear las chimeneas solares como dispositivos que facilitan alcanzar un estado de confort además de proveer ventilación natural es un aspecto que aumenta el costo-beneficio de implementar estos sistemas pasivos en edificaciones. *Este aspecto debe evaluarse a futuro para cuantificar este impacto en el gasto energético total para las edificaciones.*



a)



b)

Figura 7.13. Años de recuperación de inversión (Hermosillo): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

La Fig. 7.13 muestra que los tiempos de recuperación de la inversión inicial para la construcción de la ChSo-OC y ChSo-TC bajo las condiciones de Hermosillo, Sonora, son prolongados para las configuraciones que emplean PCM. El menor tiempo de recuperación para la ChSo-OC orientada al Oeste fue de ocho años al emplear un espesor $d = 0.35$ m. Entre los tiempos de recuperación más bajos en la evaluación de materiales masivos se encuentra

el uso de concreto y ladrillo como materiales masivos (22 y 21 años respectivamente). El resto de las configuraciones sin PCM presentan un tiempo de recuperación menor a 29 años, mientras que las configuraciones de ChSo-OC con PCM presentan un tiempo de recuperación de 54 años al menos. Un aspecto para evaluar a futuro es reducir la cantidad de PCM empleado en la pared absorbente de tal forma que no se afecte de forma considerable su desempeño para reducir el costo de inversión en configuraciones de ChSo-OC.

En el caso de la ChSo-TC el menor tiempo de recuperación se obtuvo de nueva cuenta con la configuración de espesor de $d = 0.35$ m el cual fue de cinco años. El resto de las configuraciones sin PCM presentaron tiempos de recuperación menores a los 16 años. En el caso de los materiales masivos, las configuraciones de concreto y ladrillo fueron de las configuraciones con materiales masivos que menor tiempo de recuperación presentaron: 11 años. Las configuraciones con PCM presentaron tiempos de recuperación de 40 años al menos. De igual forma que el caso de la ChSo-OC, es necesario buscar una configuración óptima que genere que el uso de los PCM en chimeneas solares sea rentable. Es necesario evaluar el impacto en el costo del sistema pasivo desde la perspectiva del confort térmico; para ello es necesario evaluar el acoplamiento de una chimenea en una edificación y considerar las cargas internas de los ocupantes, así como otros dispositivos que sean fuentes de energía térmica.

El tiempo de recuperación de las configuraciones con PCM debe ser igual o menor al tiempo de vida de este tipo de materiales. De acuerdo con los fabricantes, los PCM considerados en este estudio son de categoría “A” y su tiempo de vida a través de un uso diario y continuo es de 27.4 años (Datasheet PureTemp, 2022; RAL Deutsches Institut für, 2018). Por lo tanto, como una mejora a considerar en estudios futuros es considerar una combinación óptima entre los PCM y los tipos de chimenea solar que sean costeables para su uso con fines de ventilación y confort térmico.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

Se desarrolló un estudio teórico experimental de chimeneas solares con y sin cambios de fase. A partir del diseño, construcción y evaluación de una ChSo-OC bajo condiciones controladas de laboratorio, se procedió a realizar una evaluación del efecto del espesor del canal a diferentes flux de calor emulados en la placa absorbente. Posteriormente, los datos obtenidos fueron empleados para la validación de modelos teóricos propuestos de chimeneas solares en estado permanente y transitorio. Finalmente, se realizó un estudio paramétrico que permitió variar aspectos geométricos, así como tipos de material en la pared absorbente para ver su efecto en la ventilación natural inducida para las edificaciones bajo las condiciones de la República Mexicana. Con base en los resultados experimentales y teóricos obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- La extensión de las aperturas del canal a la entrada y la salida permitió obtener flujos de aire con menores perturbaciones, lo cual se logró observar a través de las mediciones de velocidad del aire a la entrada.
- Para obtener mediciones de velocidad del viento representativas de este tipo de sistemas es necesario tomar lecturas durante un determinado tiempo en la etapa estable en la que se estudia el sistema a diferentes posiciones. Ya que como se observó durante las pruebas experimentales, las zonas cercanas a la placa absorbente muestran cambios más notables de velocidad del fluido dentro de la capa límite de velocidad.
- Es necesario tener sistemas de protección y de reducción de fuentes parásitas de energía que pueden afectar las mediciones ya que el ruido en las mediciones puede superar la incertidumbre expandida de los sensores empleados durante el experimento.
- El uso de aislantes térmicos y protección con aluminio de las envolventes laterales permitió reducir significativamente las pérdidas de energía a través de estos elementos.
- A partir de las configuraciones consideraras para el experimento, se observó que a mayor espesor del canal mayor fue el flujo de aire generado, sin embargo, esta tendencia no presentó un comportamiento completamente lineal, lo cual indica que posiblemente a configuraciones con mayores espesores el incremento en el canal de aire sea contrario al efecto esperado.

-
-
- A través de la información recabada del prototipo experimental durante las pruebas (temperaturas, flujos de calor, velocidad del aire, humedad relativa y presión atmosférica) se validaron los modelos de la chimenea solar desarrollados a partir de BE, dando como resultado RMSD entre 11.79 y 5.04% en el flujo de aire generado. Estos valores de desviación fueron de los más bajos considerando la metodología para estimar la densidad del aire en función de la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en contraste a la metodología convencional reportada en la literatura en la que solo se consideran los cambios de temperatura.
 - Los modelos propuestos tienen la capacidad de evaluar no solo los efectos de la temperatura ambiente, velocidad del viento y la radiación solar incidente, sino también de la humedad relativa y la presión atmosférica.
 - El análisis de la condición inicial reveló la necesidad de evaluar sistemas pasivos como la chimenea solar hasta un día previo de modelación para obtener resultados más cercanos al comportamiento de estos sistemas en la realidad. Sin embargo, emplear solo un día de modelación fue un resultado obtenido para el estudio realizado, se debe realizar el mismo análisis para determinar el tiempo necesario en otras condiciones, así como cuando el modelo o el sistema físico sufren modificaciones.
 - El desempeño de la ChSo-TC fue superior a la ChSo-OC en todo el estudio paramétrico. La ChSo-TC fue capaz de incrementar en más del 70% el flujo de aire generado por la ChSo-OC, incluso en algunas configuraciones el efecto se duplicó.
 - A partir del estudio paramétrico no se encontraron cambios significativos al variar el espesor del vidrio entre los 3 y 6 mm, sin embargo, se afecta el desempeño al aumentar el espesor a 8 mm. Por otro lado, en cuanto a los tipos de pintura evaluados sobre la placa metálica, se encontró que el mejor desempeño fue en aquellas configuraciones donde se cubrió con negro mate.
 - Los cambios más significativos se encontraron al variar la altura y el espesor del canal: a mayor altura y mayor espesor mayor fue el flujo de aire generado para ventilación, esto considerando los parámetros evaluados ($H=1.0-4.0$ m y $d=0.05-0.35$ m respectivamente). La configuración con espesor $d = 0.35$ m fue la configuración con mayores flujos de aire generado en todas las ciudades estudiadas.
-
-

-
-
- El estudio de la orientación de la ChSo-OC y la ChSo-TC mostró que las mejores orientaciones para las ciudades de Monterrey y Hermosillo fueron Oeste y Este-Oeste para la ChSo-OC y la ChSo-TC, respectivamente; mientras que para el resto de las ciudades evaluadas las mejores orientaciones fueron la Este y Este-Oeste para la ChSo-OC y la ChSo-TC, respectivamente. La orientación Sur en algunas configuraciones evaluadas de espesor $d=0.35$ m y altura $H=4.0$ m permitió obtener desempeños de ventilación ligeramente por debajo de las orientaciones Este y Oeste durante el otoño e invierno, por el contrario de las orientaciones Este y Oeste en donde los mayores beneficios se obtuvieron durante la primavera y verano.
 - Las orientaciones Este y Oeste permitieron que ambas chimeneas solares presentaran tiempos de operación continua superiores a las 20 horas. Las configuraciones de la ChSo-OC que permitieron una operación continua fueron aquellas con el muro de concreto, PCM RT25HC y el muro de ladrillo. Durante el invierno, los tiempos de operación del resto de operaciones oscilaron entre los 14.29 y 22.17 horas, siendo las configuraciones antes mencionadas aquellas con los mayores tiempos de operación durante esta temporada. Para la ChSo-TC, las configuraciones con PCM RT35HC y RT25HC permitieron una operación de 24 horas ininterrumpidas; en cuanto al desempeño de la ChSo-TC durante el invierno los tiempos de operación oscilaron entre los 19.16 y 19.83 horas.
 - Todas las evaluaciones permitieron cubrir la demanda de ventilación del caso base ($30.06 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$) de acuerdo con la ASHRAE 62.2-2019, el cual corresponde a un espacio de 9 m^2 , y los desempeños más altos como aquellos con un espesor $d=0.35$ m fueron capaces de satisfacer las necesidades de ventilación del Caso 6 ($222.12 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$) para un espacio de 108 m^2 .
 - Se observaron resultados equilibrados entre las configuraciones con materiales tradicionales de mampostería (ladrillo y concreto) así como con PCM. Los PCM con mejor desempeño fueron los RT25HC, RT35HC y MG-49. Sin embargo, para la ChSo-OC se observaron mejores desempeños con configuraciones de concreto y ladrillo, mientras que los PCM fueron mejor aprovechados en la ChSo-TC.
-
-

-
-
- En el caso de los climas templados, el desempeño de la ChSo-TC con PCM fue inferior a las configuraciones con concreto, sin embargo, la misma configuración en climas cálidos fue superior a las configuraciones con los materiales tradicionales.
 - Del análisis de regresión lineal multivariable se obtuvieron ajustes con variaciones menores al 1% respecto a los resultados obtenidos a partir del estudio paramétrico. Sin embargo, estas relaciones obtenidas solo están en función de la altura, espesor del canal, absorción de la pared absorbente y espesor del vidrio. Añadir el efecto de otros parámetros como la radiación solar incidente y la temperatura ambiente incrementa considerablemente las diferencias (RMSE y R^2).
 - El análisis de emisión de contaminantes mostró que la ChSo-OC es capaz de proveer ventilación natural equivalente al proporcionado por un sistema activo con emisiones de entre 96.78 y 131.73 kgCO_{2e}, mientras que la ChSo-TC evita la emisión de contaminantes entre 191.73 y 241 kgCO_{2e}. Estos datos equivalen a un desempeño continuo anual.
 - En cuanto al análisis de costo y recuperación de la inversión inicial, así como el mantenimiento anual y el costo energético equivalente (estos últimos afectados por inflación anual), reveló que el tiempo mínimo de recuperación por parte de la ChSo-OC fue de 8 años, esto para una configuración $d = 0.35$ m y de 5 años al emplear una ChSo-TC para la misma configuración.

Finalmente, la implementación de una chimenea solar en edificaciones con fines de ventilación bajo las condiciones de la República Mexicana resulta ser una opción viable para reducir el uso de sistemas activos y aprovechar el potencial energético de fuentes renovables de energía.

Recomendaciones para estudios futuros

El estudio experimental como el teórico de las chimeneas solares realizado ha revelado algunos puntos importantes a considerar en estudios futuros. A continuación, se enumeran algunos de ellos:

1. Evaluar el efecto de diferentes condiciones de humedad a través del uso de deshumidificadores para evaluar el efecto en el intercambio radiativo en el aire como medio participante y en la convección natural.

2. Evaluar el efecto de materiales reflectores a la entrada y salida del canal de la chimenea para tratar de reducir las pérdidas radiativas a los alrededores.
3. Considerar el efecto del medio radiativamente participante en el modelo de balances globales ya sea través de un enfoque híbrido entre BE-CFD o BE-soluciones analíticas.
4. Evaluar el efecto de la chimenea solar con materiales masivos (PCM o materiales tradicionales) variando altura y espesor del canal.
5. Aplicar modelos basados en redes neuronales para el desarrollo de modelos de ajuste multivariantes que contemplen variables climatológicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abdallah A.S.H., Passive air cooling system and solar water heater with Phase Change Material for low energy buildings in hot arid climate. *Energy & Buildings*, Vol. 239, Págs. 110854, 2021.
2. Abdeen A., Serageldin A.A., Ibrahim M.G.E., El-Zafarany A., Ookawara S., Murata R., Solar chimney optimization for enhancing thermal comfort in Egypt: An experimental and numerical study. *Solar Energy*, Vol. 180, Págs 524-536, 2019.
3. Abdulhamid F., Tukur R.B., Enhancement of natural ventilation using solar chimney in hospital buildings. *Journal of Environmental Technology*, Vol. 12, Pags. 101-116, 2019.
4. Abraham S.B., Ming T.Z., Building's solar chimney: the performance of width and inlet to in tropical country. *Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 354, Págs. 1-7, 2019.
5. Adam Z., Yamanaka T., Kotani H., Mathematical model and experimental study of airflow in solar chimneys. *Proc. 8th International Conference on Air Distribution in Rooms*, Págs. 621-624, 2002.
6. Afonso C., Oliveira A., Solar chimneys: simulation and experiment. *Energy and Buildings*, Vol. 31, Págs. 71-79, 2000.
7. Al-Kayiem H., Sreejaya K.V., Gilani S.I.U., Mathematical analysis of the influence of the chimney height and collector area on the performance of a roof top solar chimney. *Energy and Buildings*, Vol. 68, Págs. 305-311, 2014.
8. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), ANSI/ASHRAE Standard 62.2-2013: Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality in Low-Rise Residential Buildings. 2013.
9. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal environment conditions for human occupancy. 2017.
10. Amori K.E., Mohammed S.W., Experimental and numerical studies of solar chimney for natural ventilation in Iraq. *Energy and Buildings*, Vol. 47, Págs. 450-457, 2012.
11. Andersen K.T., Theoretical considerations on natural ventilation by thermal buoyancy. *ASHRAE*, Vol. 101, Págs. 1103-17, 1995.

-
-
12. ANSI/ASHRAE 62.2-2019, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality in Residential Buildings, 2019.
 13. Arce J., Jiménez M.J., Guzmán J.D., Heras M.R., Alvarez G., Xamán J., Experimental study for natural ventilation on a solar chimney. *Renewable Energy*, Vol. 34, Págs. 2928-2934, 2009.
 14. Arce J., Xamán J., Alvarez G., Jiménez M.J., Guzmán J.D., Heras M.R., Theoretical study on a diurnal solar chimney with double air flow. 1st international congress on heating, cooling and buildings (EUROSUN), Págs. 1-8, 2008.
 15. Arce J., Xamán J.P., Alvarez G., Jiménez M.J., Enríquez R., Heras M.R., A Simulation of the Thermal Performance of a Small Solar Chimney Already Installed in a Building. *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 135, Págs. 011005-1 – 011005-10, 2013.
 16. Arici M., Bilgin F., Nizetic S., Papadopoulos A.M., Phase change material based cooling of photovoltaic panel: A simplified numerical model for the optimization of the phase change material layer and general economic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 189, Págs. 738-745, 2018.
 17. Asadi S., Fakhari M., Fayaz R., Mahdavi Parsa A., The effect of solar chimney layout on ventilation rate in buildings. *Energy and Buildings*, Vol. 123, Págs 71-78, 2016.
 18. Ashouri M., Hakkaki-Fard A., Improving the performance of the finned absorber inclined rooftop solar chimney combined with composite PCM and PV module. *Solar Energy*, Vol. 228 No.1, Págs. 562-574, 2021.
 19. ASHRAE, Handbook fundamentals. USA: ASHRAE, 1982.
 20. ASTM C578-01, Standard Specification for Rigid, Cellular Polystyrene Thermal Insulation. ASTM Copyright, 2002.
 21. ASTM E230-98, Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples. ASTM Copyright.
 22. Auletta A., Manca O., Heat and fluid flow resulting from the chimney effect in a symmetrically heated vertical channel with adiabatic extensions. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 41, Pags. 1101-1111, 2002.
 23. Awbi H.B., Gan G., Simulation of solar-induced ventilation. *Renewable Energy Technology and the Environment*, Vol. 4, Págs. 2016-2030, 1992.
 24. Awbi H.B., Ventilation of buildings. Spon Press, Primera edición, 2003.
-
-

25. Ayinde T.F., Said S.A.M., Habib M.A., Experimental investigation of turbulent natural convection flow in a channel. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, Pàgs. 169-177, 2006.
 26. Ayinde T.F., Said S.A.M., Habib M.A., Turbulent natural convection flow in a vertical channel with anti-symmetric heating. *Heat and Mass Transfer*, Vol, Pàgs. 1201-1216, 2008.
 27. Azevedo L.F.A., Sparrow E.M., Natural convection in a vertical channel vented to the ambient through an aperture in the channel wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 29, Pàgs. 819-830, 1986.
 28. Babin T., Ramanathan S., Muthukumar S., Arun A. P., Subbiah S., Numerical investigation of backflow in natural draft chimneys. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 45, Pàgs. 1196-1204, 2021.
 29. Bachrum A.S., Ming T.Z., Kurniasih S., Building's solar chimney: ambient obstacle and crosswind in a tropical country. *Advances in Engineering Research*, Vol. 192. Pàgs. 53-60, 2020.
 30. Bachrum A.S., Vidiyanti C., Ismail L.H., Wahab I.A., House's solar chimney a numerical analysis on the thermal performance in Jakarta. *SINERGI*, Vol. 24, Pàgs. 245-252, 2020.
 31. Bai Y., Long T., Li W., Li Y., Liu S., Wang Z., Lu J., Huang S., Experimental investigation of natural ventilation characteristics of a solar chimney coupled with earth-air heat exchanger (SCEAHE) system in summer and winter. *Renewable Energy*, Vol. 193, Pàgs. 1001-1018, 2022.
 32. Balocco C., A simple model to study ventilated facades energy performance. *Energy and Buildings*, Vol. 34, Pàgs. 469-475, 2002.
 33. Bansal N.K., Mathur R., Bhandari M.S., A study of solar chimney assisted wind tower system for natural ventilation in buildings. *Building and Environment*, Vol. 29, Pàgs. 495-400, 1994.
 34. Bansal N.K., Mathur R., Bhandari M.S., Solar Chimney for Enhanced Stack Ventilation. *Building and Environment*, Vol. 28, Pàgs. 373-377, 1993.
 35. Barbera S., Cammarata G., Margani L., Marletta L., Performance analysis of typical Mediterranean buildings retrofitted with solar chimney. *Passive a Low Energy Ecotechniques*, Pàgs. 879-888, 1985.
-
-

-
-
36. Barra O.A, Carratelli E.P., A theoretical study of laminar free convection in 1-D solar induced flows. *Solar Energy*, Vol. 23, Págs. 211-215, 1979.
 37. Belfegas B., Larbi S., Tayebi T., Experimental and Theoretical Investigation on a Solar Chimney System for Ventilation of a Living Room. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, Vol. 8, Págs. 259-266, 2021.
 38. Belhadj O., Benzenine H., Saim R., Experimental Analysis of Height to Base Length Effect in Trapezoidal Prism Inclined Solar Chimney. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, Vol. 65, Págs. 47-55, 2021.
 39. Bin L., Meixia W., Qi W., Shaoli M., Bennacer R., Effect of the Position of the Phase Change Material (PCM Na₂CO₃-10H₂O) on the Solar Chimney Effect. *Energy Procedia*, Vol. 139, Págs. 462-467, 2017.
 40. Birol F., *Key World Energy Statistics*. International Energy Agency, 2017.
 41. Bonacina C., Comini G., Fasano A., Primicerio M., Numerical solution of phase-change problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 16, Págs. 1825-1832, 1973.
 42. Brasche S., Bischof W., Daily time spent indoors in German homes- Baseline data for the assessment of indoor exposure of German occupants. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 208, Págs. 247-253, 2005.
 43. Burek S.A.M., Habeb A., Air flow and thermal efficiency characteristics in solar chimneys and Trombe Walls. *Energy and Buildings*, Vol. 39, Págs. 128-135, 2007.
 44. Cao Y., Aldawi F., Sinaga N., Moria H., Dizaji H.S., Wae-hayee M., Single solar chimney technology as a natural free ventilator; energy-environmental case study for Hong Kong. *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 26, Págs. 101173, 2021.
 45. Cao Y., Pourhedayat S., Dizaji H.S., Wae-hayee M., A comprehensive optimization of phase change material in hybrid application with solar chimney and photovoltaic panel for simultaneous power production and air ventilation. *Building and Environment*, Vol. 197, Págs. 107833, 2021.
 46. Cao Y., Sinaga N., Pourhedayat S., Dizaji H.S., Innovative integration of solar chimney ventilator, solar panel and phase change material; under real transient weather condition of Hong Kong through different months. *Renewable Energy*, Vol. 174, Págs. 865-878, 2021.
-
-

47. Centro Nacional de Metrología (CENAM), Estimación de la incertidumbre en la determinación de la densidad del aire, Págs. 1-23, 2003.
48. Chantawong P., Hirunlabh J., Zeghmati B., Khedari J., Teekasap S., Win M.M., Investigation on thermal performance of glazed solar chimney walls. *Solar Energy*, Vol. 80, Págs. 288-297, 2006.
49. Chen W., Analysis of heat transfer and flow in the solar chimney with the sieve-plate thermal storage beds packed with phase change capsules. *Renewable Energy*, Vol. 157, Págs. 491-501, 2020.
50. Chen Z.D., Bandopadhyay P., Halldorsson J., Byrjalsen C., Heiselberg P., Li Y., An experimental investigation of a solar chimney model with uniform wall heat flux. *Building and Environment*, Vol. 38, Págs. 893-906, 2003.
51. Cheng X., Müller U., Turbulent natural convection coupled with thermal radiation in large vertical channels with asymmetric heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, Págs. 1681-1692, 1998.
52. Cherif Y., Sassine E., Lassue S., Zalewski L., Experimental and numerical natural convection in an asymmetrically heated double vertical facade. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 152, Págs. 106288, 2020.
53. Chungloo S., Limmeechokchai B., Utilization of cool ceiling with roof solar chimney in Thailand: The experimental and numerical analysis. *Renewable Energy*, Vol. 34, Págs. 623-633, 2009.
54. Chungloo S., Limmeechokchai B. Application of passive cooling systems in the hot and humid climate: The case study of solar chimney and wetted roof in Thailand. *Building and Environment*, Vol. 42, Págs. 3341-3351, 2007.
55. Chungloo S., Limmeechokchai B., A field study of free convection in an inclined-roof solar chimney. *ScienceAsia*, Vol. 35, Págs. 189-195, 2009.
56. Cirillo L., Di Ronza D., Fardella V., Manca O., Nardini S., Numerical and experimental investigations on a solar chimney integrated in a building façade. *International Journal of Heat and Technology*, Vol. 33, Págs. 246-254, 2015.
57. Coldwell P.J., Balance Nacional de Energía 2017, Secretaría de energía, 2017.
58. Comisión Federal de Electricidad (CFE), Esquema Tarifario Vigente 2022. <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Casa.aspx>

59. CONABIO:

http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/clima/climas/clima1mgw

60. Correira da Silva J.J., Silva A.M., Oliveira Fernandes E., Passive cooling in livestock buildings. Proceedings of the 7th International IBPSA Conference-Building Simulation, Vol. 1, 215-218, 2001.
61. Curcija C., Vidanovic S., Hart R., Jonsson J., Powless R., Mitchell R., WINDOW Technical Documentation. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2018.
62. Daghistani F.F., Solar chimney street-lighting pole for ventilating polluted urban areas. Sustainable Cities and Society, Vol. 72, Págs. 103057, 2021.
63. Daloglu A., Ayhan T., Natural convection in a periodically finned vertical channel. International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 26, Págs. 1175-1182, 1999.
64. Dash A., Mohanty A., A mathematical study on optimum wall-to-wall thickness in solar chimney-shaped channel using CFD. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Lecture Notes in Mechanical Engineering, Págs. 25-30, 2019.
65. Daverat C., Li Y., Pabiou H., Mènèzo C., Xin S., Transition to turbulent heat transfer in heated vertical channel – Experimental analysis. International Journal of Thermal Sciences, Vol. 111, Pàgs. 321-329, 2017.
66. Davies M.G., Building Heat Transfer. John Wiley & Sons, Inc, 2004.
67. Davis R.S., Equation for the determination of the density of moist air. Metrologia, Vol. 29, Págs. 67-70, 1992.
68. Dhahri M., Nekoonam S., Hana A., Assad M.E.H., Arici M., Sharifpur M., Sammouda H., Thermal performance modeling of modified absorber wall of solar chimney-shaped channels system for building ventilation. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Publicación online, Págs. 1-13, 2020.
69. Duan S, A predictive model for airflow in a typical solar chimney based on solar raditation. Journal of Building Engineering, Vol. 26, Págs.100916, 2019.
70. Elghamry R., Hassan H., An experimental work on the impact of the new combinations of solar chimney, photovoltaic and geothermal air tube on building cooling and ventilation. Solar Energy, Vol. 205, Págs. 142-153, 2020.
-
-

71. Elghamry R., Hassan H., Impact a combination of geothermal and solar energy systems on building ventilation, heating and output power: Experimental study. *Renewable Energy*, Vol. 152. Págs. 1403-1412, 2020.
72. Fabiani C., Pisello A.L., Barbanera M., Cabeza L.F., Palm oil-based bio-PCM for energy efficient building applications: Multipurpose thermal investigations and life cycle assessment. *Journal of Energy Storage*, Vol. 28, Pág. 101129, 2020.
73. Fernández-Zayas J.L., Villa-Medina J.F., Chargoy-del Valle N., Porta-Gándara M.A., Experimental análisis of natural ventilation of an office building in Mexico city. *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 28, Págs. 101661, 2021.
74. Fikry A., Elsayed A., Improving the indoor air quality (IAQ) in naturally ventilated lecture hall with a single façade by solar chimneys. *Journal of Engineering and Applied Science*, Vol. 68, Págs. 1-18, 2021.
75. Flourentzou F., Van der Maas J., Roulet C-A. Natural ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients. *Energy and Buildings*, Vol. 27, Págs. 283-292, 1998.
76. Frédéric D., Fabien T., Sandrine S., Ruddy B., Two-dimension experimental study of the reverse flow in a free convection channel with active walls differentially heated. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 47, Pàgs. 150-157, 2013
77. Frutos-Dordelly J.C., Mankibi M.E., Roccamena L., Remion G., Arce J., Experimental análisis of a PCM integrated solar chimney under laboratory conditions. *Solar Energy*, Vol. 188, Págs. 1332-1348, 2019.
78. García E., Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México, 2004.
79. Gau C., Yih K.A., Aung W., Measurements of heat transfer and flow structure in heated vertical channels. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 6, Pags. 707-712, 1992.
80. Giacomo P., Equation for the determination of the density of moist air. *Metrologia*, Vol. 18, Págs. 33-40, 1982.
81. Godoy-Vaca L., Almaguer M., Castillo J., Martínez J., Lobato-Cordero A., Dynamic-physical model to predict the performance of a solar chimney in a warm-humid climate

-
-
- with different absorbent materials. Proceedings of the 15th international building performance simulation association, USA, Págs. 2069-2078, 2017.
82. Gong J., Cheng K.X., Liu H., Chew L.W., Lee P.S., A novel staggered split absorber design for enhanced solar chimney performance. *Building and Environment*, Vol. 225, Págs. 109569, 2022.
83. Habib M.A., Said S.A.M., Ahmed S.A., Asghar A., Velocity characteristics of turbulent natural convection in symmetrically and asymmetrically heated vertical channels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 26, Págs. 77-97, 2002.
84. Halldorsson J., Byrjalsen C., Chen Z.D., Bandopadhyay P., Heiselberg P., Experimental and theoretical studies of a solar chimney with uniform heat flux. Proc. 8th International Conference on Air Distribution in Rooms, Págs. 597-600, 2002.
85. Hammadi S.H., Freshwater production by combination of solar still, earth-air heat exchanger and solar chimney for natural air draft. *International Journal of Sustainable Engineering*, Págs. 1-12, 2021.
86. Hamood B.A.K., Nima M.A., Experimental investigation of thermal performance of a solar chimney provided with a porous absorber plate. *Journal of Engineering*, Vol. 26, Págs. 1-20, 2020.
87. Hashim H.S., Kassim M.S., Kadhim H.H., Numerical investigation for natural ventilation enhancement in different models of solar chimney inside a room elicited from the concepts of the conventional chimney model. *Journal of Mechanical Engineering Research and Development*, Vol. 43, Págs. 436-450, 2020.
88. Hayt H. Jr., Kemmerly J.E., Durbin S.M., *Análisis de circuitos en ingeniería*. McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2012.
89. He G., Wu Q., Zhengguang L., Ge W., Lv D., Cong L., Ventilation performance of solar chimney in a test house: Field measurement and validation of plume model. *Building and Environment*, Vol. 193, Págs. 107648, 2021.
90. He G., Zhang J., Hong S., A new analytical model for airflow in solar chimneys based on thermal boundary layers. *Solar Energy*, Vol. 136, Págs. 614-621, 2016.
91. Heaton H.S., Reynolds W.C., Kays W.M., Heat transfer in annular passages. Simultaneous development of velocity and temperature fields in laminar flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 7, págs. 763-781, 1964.
-
-

-
-
92. Hirunlabh J., Kongduang W., Namprakai P., Khedari J., Study of natural ventilation of houses by a metallic solar wall under tropical climate. *Renewable Energy*, Vol. 18, Págs. 109-119, 1999.
 93. Hong S., He G., Ge W., Wu W., Lv D., Li Z., Annual energy performance simulation of solar chimney in a cold winter and hot summer climate. *Building Simulation*, Vol. 12 No. 5, Págs. 847-856, 2019.
 94. Hou Y., Li H., Li A., Experimental and theoretical study of solar chimneys in buildings with uniform wall heat flux. *Solar Energy*, Vol. 193, Págs. 244-252, 2019.
 95. Howell J.R., Mengüç M.P., Daun K., Siegel R., *Thermal Radiation Heat Transfer*. CRC Press, 2021.
 96. Huang S., Lu J., Li Y., Xie L., Yang L., Cheng Y., Chen S., Zeng L., Li W., Zhang Y., Wang L., Experimental study on the influence of PCM container height on heat transfer characteristics under constant heat flux condition. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 172, Pág. 115159, 2020.
 97. Huang T.M., Gau C., Aung W., Mixed convection flow and heat transfer in a heated vertical convergent channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, Págs. 2445-2456, 1995.
 98. Hung Y.H., Perng S.W., An experimental technique for measuring transient natural/forced convective heat fluxes in a vertical channel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, Págs. 305-313, 1988.
 99. Imran A.A., Jalil J.M., Ahmed S.T., Induced flow for ventilation and cooling by a solar chimney. *Renewable Energy*, Vol. 78, Págs. 236-244, 2015.
 100. Incropera F.P., DeWitt D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4ta edición, John Wiley, 1996.
 101. INEGI, Datos básicos de la geografía de México, 1991.
 102. INEGI, Guía para la Interpretación de Cartografía Climatológica, 2005.
 103. INEGI: <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/default.html#Mapa>
 104. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática 2005, Guía para la interpretación de cartografía. Climatológica. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825231781>
-
-

-
-
105. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Primera Encuesta Nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares (ENCEVI), 2018, Pags. 1-28.
 106. International Energy Agency, Energy efficiency 2020. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2020>
 107. International Energy Agency, Energy efficiency 2021. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2021>
 108. International Energy Agency, Key World Energy Statistics. Paris: International Energy Agency, 2019.
 109. Jafari M., Alipour A., Aerodynamic shape optimization of rectangular and elliptical double-skin façades to mitigate wind-induced effects on tall buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 213, págs. 104586, 2021.
 110. Jahangir M.H., Nateghi S.K., Environmental and Economic Impact of Employing Solar Chimney and Photovoltaic Cells in Buildings with Various Climates. *Advanced Energy Conversion Materials*, Vol. 2, Págs. 45-59, 2021.
 111. Jalil J.M., Salih H.M., Ayaal A.H., Three-dimensional numerical study for laminar natural convection within a rectangular solar chimney. *University of Thi Qar Journal for Engineering sciences*, Vol. 10.2, Págs. 1-7, 2019.
 112. Jianliu X., Weihua L., Study on solar chimney used for room natural ventilation in Nanjing. *Energy and Buildings*, Vol. 66, Págs. 467-469, 2013.
 113. Jiménez-Xamán C., Xamán J., Gijón-Rivera M., Zavala-Guillén I., Noh-Pat F., Simá E., Assessing the thermal performance of a rooftop solar chimney attached to a single room. *Journal of Building Engineering*, Vol. 31, Págs. 101380-101400, 2020.
 114. Jing H., Chen Z., Li A., Experimental study of the prediction of the ventilation flow rate through solar chimney with large gap-to-height ratios. *Building and Environment*, Vol. 89, Págs. 150-159, 2015
 115. Kalkan N., Dagtekin I., Passive cooling technology by using solar chimney for mild or warm climates. *Thermal Science*, Vol. 20, Págs. 2125-2136, 2016.
 116. Kaneko Y., Sagara K., Yamanaka H., Kotani T., Sharma S.D., Ventilation performance of solar chimney with built-in latent heat storage. *Proceedings of 10th international conf. On thermal energy storage*, USA: ECOSTOCK, 2006.
-
-

-
-
117. Kara Y.A., Diurnal performance analysis of phase change material walls. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 102, Pàgs. 1-8, 2016.
 118. Kashyap S., Chandra P.K., Gaba V.K., Tiwari A.K., Enviro-Economic Technical Analysis of Solar chimney Integrated with Soil Air Heat Exchanger: Creating Passive Thermal Comfort for Hot Subtropical Regions. 2nd International Conference on Mechanical Materials and Renewable Energy (ICMMRE 2019), Pàgs. 050042-1-050042-7, 2020.
 119. Ke W., Ji J., Wang C., Zhang C., Xie H., Tang Y., Lin Y., Comparative analysis on the electrical and thermal performance of two CdTe multi-layer ventilated windows with and without a middle PCM layer: A preliminary numerical study. *Renewable Energy*, Vol. 189, Pàgs. 1306-1323, 2022.
 120. Ke W., Ji J., Xie H., Wang C., Yu B., Annual performance analysis of a dual-air-channel solar wall system with phase change material in different climate regions of China. *Energy*, Vol. 235, Pàgs. 121359, 2021.
 121. Ke W., Ji J., Xu L., Yu B., Tian X., Wang J., Numerical study and experimental validation of a multi-functional dual-air-channel solar wall system with PCM. *Energy*, Vol. 227, Pàgs. 120434, 2021.
 122. Khanal R., Lei C., Flow reversal effects on buoyancy induced air flow in a solar chimney. *Solar Energy*, Vol. 86, Pàgs. 2783-2794, 2012.
 123. Khedari J., Rachapradit N., Hirunlabh J., Field study of performance of solar chimney with aire-conditioned building. *Energy*, Vol. 28, Pàgs. 1099-1114, 2003.
 124. Khosravi M., Fazelpour F., Rosen M., Improved application of a solar chimney concept in a two-story building: An enhanced geometry through a numerical approach. *Renewable Energy*, Vol. 143, Pàgs. 569-585, 2019.
 125. Kim K.M., Nguyen D.H., Shim G.H., Jerng D.W., Ahn H.S., Experimental study of turbulent air natural convection in open-ended vertical parallel plates under asymmetric heating conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 159, Pàgs. 1-13, 2020.
 126. Kong J., Niu J., Lei C., A CFD based approach for determining the optimum inclination angle of a roof-top solar chimney for building ventilation. *Solar Energy*, Vol. 198, Pàgs. 555-569, 2020.
-
-

-
-
127. Kosny J., PCM-Enhanced building components- An application of phase change materials in building envelopes and internal structures. Springer, 2015.
 128. Kumaran M., Final Report, Volume 3, Task 3: Material Properties, International Energy Agency, 1996.
 129. La Pica A., Rodonò G., Volpes R., An experimental investigation on natural convection of air in a vertical channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, Pàgs. 611-616, 1993.
 130. Lamberg P., Lehtiniemi R., Henell A.M., Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 43, Pàgs. 277-287, 2004.
 131. Layeni A.T., Waheed M.A., Adewumi B.A., Nwaokocha C.N., Sharifpur M., Tongo S.O., Okeze R.C., Mboreha C.A., Computational and sensitivity analysis of a dual purpose solar chimney for buildings. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 47, Pàgs.4126-4136, 2021.
 132. Lee K.H., Strand R.K., Enhancement of ventilation in buildings using a thermal chimney. *Energy and Buildings*, Vol. 41, Pàgs.615-621, 2009.
 133. Leng P.C., Aw S.B., Ali N.E.H., Ling G.H.T., Lee Y.K., Ahmad M.H., Solar chimneys as an effective ventilation strategy in multi-storey public housing in the post-covid-19 era. *Buildings*, Vol. 12, Pàgs. 1-18, 2022.
 134. Li W., Li Z., Xie L., Li Y., Long T., Huang S., Lu J., Wang Z., Evaluation of the thermal performance of an inclined solar chimney integrated with a phase change material. *Energy and Buildings*, Vol. 270, Pàgs. 112288, 2022.
 135. Li Y., Liu S., Experimental study of thermal performance of a solar chimney combined with PCM. *Applied Energy*, Vol. 114, Pàgs. 172-178, 2014.
 136. Li Y., Liu S., Lu J., Effects of various parameters of a PCM on thermal performance of a solar chimney. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 127, Pàgs. 1119-1131, 2017.
 137. Li Y., Liu S., Numerical study on thermal behaviors of a solar chimney incorporated with PCM. *Energy and Buildings*, Vol. 80, Pàgs. 406-414, 2014.
 138. Li Y., Liu S., Shukla A., Experimental analysis on use of thermal conductivity enhancers (TCEs) for a solar chimney applications with energy storage layer. *Energy and Buildings*, Vol. 116, Pàgs. 35-44, 2016.
-
-

139. Li Y., Long T., Bai X., Wang L., Li W., Liu W., Li J., Cheng Y., Ye K., Huang S., An experimental investigation on the passive ventilation and cooling performance of an integrated solar chimney and earth-air heat exchanger. *Renewable Energy*, vol. 175, págs. 486-500, 2021.
140. Li. Y., Liu S., Numerical study of thermal behaviors of a solar chimney incorporated with PCM. *Energy and Buildings*, Vol. 80, Págs. 406-414, 2014.
141. Liu B., Ma X., Wang X., Dang C., Wang Q., Bennacer R., Experimental study of the chimney effect in a solar hybrid double wall. *Solar Energy*, Vol. 115, Págs. 1-9, 2015.
142. Liu S., Li Y., An experimental study on the thermal performance of a solar chimney without and with PCM. *Renewable Energy*, Vol. 81, Págs. 338-346, 2015.
143. Long T. Zhao N., Li W., Wei S., Li Y., Lu J., Huan S., Qiao Z., Numerical simulation of diurnal and annual performance of coupled solar chimney with earth-to-air heat exchanger system. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 214, Págs. 118851, 2022.
144. Long T., Li W., Lu Y., Li Y., Liu S., Lu J., Huang S., Zhang Y., Benefits of integrating phase-change material with solar chimney and earth-to-air heat exchanger system for passive ventilation and cooling in summer. *Journal of Energy Storage*, Vol. 48, Págs. 103037, 2022(a).
145. Long T., Zhao N., Li W., Wei S., Li Y., Lu J., Huang S., Qiao Z., Natural ventilation performance of solar chimney with and without earth-air heat exchanger during transition seasons. *Energy*, Vol. 250, Págs. 123818, 2022(b).
146. Long T., Zheng D., Li W., Li Y., Lu J., Xie L., Huang S., Numerical investigation of the working mechanisms of solar chimney coupled with earth-to-air heat exchanger (SCEAHE). *Solar Energy*, Vol. 230, Págs. 109-121, 2021.
147. Lu J., Gao X., Li Q., Li Y., Thermal Storage Capacity and Night Ventilation Performance of a Solar Chimney Combined with Different PCMs. *International Journal of Photoenergy*, Págs. 1-10, 2017.
148. Mahdi M.S., Mahood H.B., Campbell A.N., Khadom A.A., Natural convection improvement of PCM melting in partition latent heat energy storage: Numerical study with experimental validation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, Págs. 105463, 2021.

-
-
149. Manu S., Brager G., Rawal R., Geronazzo A., Kumar D., Performance evaluation of climate responsive buildings in India – Case studies from cooling dominated climate zones. *Building and Environment*, Vol. 148, Págs. 136-156, 2019.
 150. Martí-Herrero J., Heras-Celemin M.R., Dynamic physical model for a solar chimney. *Solar Energy*, Vol. 81, Págs. 614-622, 2007.
 151. Mathur J., Bansal N.K., Mathur S., Jain M., Experimental investigations on solar chimney for room ventilation. *Solar Energy*, Vol. 80, Págs. 927-935, 2006.
 152. Mc Adams W.H., *Heat Transmission*. 3^{er} edición, New York, M Graw-Hill, 1994.
 153. Mehling H., Cabeza L.F., *Heat and cold storage with PCM*. Springer, 2008.
 154. Mithun B.D., Hoque Md.S., Van Brakel M.L., Hasan Md. M., Akter S., Islam M.R., Comparative quality assessment of traditional vs improved dried Bombay duck (*Harpodon nehereus*) under different storage conditions: Solar chimney dryer a low-cost improved approach for nutritional dried fish. *Food Science & Nutrition*, Págs. 1-12, 2021.
 155. Mitra A., Dutta T.K., Ghosh D.N., Natural convective heat transfer in water enclosed between pairs of differentially heated vertical plates. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, Págs. 187-192, 2008.
 156. Miyazaki T., Akisawa A., Kashiwagi T., The effects of solar chimneys on thermal load mitigation of office buildings under the Japanese climate. *Renewable Energy*, Vol. 31, Págs. 987-1010, 2006.
 157. Mohammed A. H., Al-zuwaini H., Sergeev V., Socolova E., Skulkin S., Mukhametova L., Passive cooling by integrate solar chimney with earth to air heat exchanger. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, Vol. 10, Págs. 1375-1390, 2019.
 158. Mohammed H.J., Jubear A.J., Obaid H., Natural ventilation in passive system of vertical two-stores solar chimney. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, Vol. 69, Págs. 130-146, 2020.
 159. Moosavi L., Zandi M., Bidi M., Behroozizade E., Kazemi I., New design for solar chimney with integrated windcatcher for space cooling and ventilation. *Building and Environment*, Pág. 106785, 2020.
-
-

-
-
160. Morgan K., Lewis R.W., Zienkiewicz C., An improved algorithm for heat conduction problems with phase change. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 12, Págs. 1191-1195, 1978.
 161. Nateghi S., Jahangir M.H., *Cleaner Materials*, Vol. 5, Págs. 1-13, 2022.
 162. Nguyen T.V., Nguyen Y.Q., Performance of a solar chimney configuration to achieve equal flow rate for ventilation of three-story building. *Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1109, Págs. 012001, 2021.
 163. Nguyen V.T., Nguyen Y.Q., Forced and natural ventilation of a room with a combined solar chimney and Earth – to – Air Heat Exchanger system. *Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1109, Págs. 012009, 2021.
 164. Nguyen Y.Q., Huynh T.N., Influence of outlet/inlet area ratio on performance of a vertical solar chimney for natural ventilation of buildings. *Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1109, Págs. 012011, 2021.
 165. Nguyen Y.Q., Wells J.C., A numerical study on induced flowrate and thermal efficiency of a solar chimney with horizontal absorber surface for ventilation of buildings. *Journal of Building Engineering*, Vol. 28, Págs. 101050, 2019
 166. Nguyen Y.Q., Wells J.C., Effects of wall proximity on the airflow in a vertical solar chimney for natural ventilation of dwellings. *Journal of Building Physics*, Vol. 44, Págs. 1-26, 2020.
 167. Nise N.S., *Sistemas de Control para Ingeniería*. Grupo Editorial Patria, 9na impresión, 2013
 168. Oliveira M.M., Carlo J.C., Evaluation of thermal comfort and air changes in indoor environments with solar chimneys. *Ambiente Construído, Porto Alegre*, Vol. 21, 2021.
 169. Ong K.S., A mathematical model of a solar chimney. *Renewable Energy*, Vol. 28, Págs. 1047-1060, 2003.
 170. Ong K.S., Thermal performance of solar air heaters: mathematical model and solution procedure. *Solar energy*, Vol. 55, págs. 93-109, 1995.
 171. Ospir D., Popa C., Chereches C., Polidori G., Fohanno S., Flow visualization of natural convection in a vertical channel with asymmetric heating. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, Págs. 486-493, 2012.
 172. Özisik M.N., *Heat Conduction*. John Wiley & Sons, Inc, 1993.
-
-

-
-
173. Özisik M.N., Heat Transfer: A basic approach. McGraw-Hill Book Company, 1985.
 174. Pouranian F., Akbari H., Hosseinalipour S.M. Performance assessment of solar chimney coupled with earth-to-air heat exchanger: A passive alternative for an indoor swimming pool ventilation in hot-arid climate. *Applied Energy*, Vol. 299, Págs. 117201, 2021.
 175. Pourshab N., Tehrani M.D., Toghraie D., Rostami S., Application of double glazed facades with horizontal and vertical louvers to increase natural air flow in office buildings. *Energy*, vol. 200, págs. 117486, 2020.
 176. PureTemp, PureTemp® Thermal Energy Storage Material (Datasheet). USA, 2022.
 177. Rabani M., Cooling performance of a passive hybrid system consisted of domed roof and solar chimney: A numerical approach. *International Journal of Green Energy*, Págs. 1-20, 2021.
 178. Rabani M., Kalantar V., Rabani M., Rabani R., Cooling Performance of a New Designed Trombe Wall Integrated with Solar Chimney, Water Spraying System, and Rectangular Thermal Fin Arrays: An Experimental Approach. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, Vol 15, Pàgs. 373-391, 2020.
 179. Rabani M., Performance analysis of a passive cooling system equipped with a new designed solar chimney and a water spraying system in an underground channel. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 35, Págs. 204-219, 2019.
 180. Rabin Y., Korin E., An efficient numerical solution for the multidimensional solidification (or melting) problem using a microcomputer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, Págs. 673-683, 1993.
 181. RAL Deutsches Institut für, Phansenwechselmaterial. Stuttgart, Germany, 2018.
 182. Raman P., Mande S., Kishore V.V.N., A passive solar system for thermal comfort conditioning of buildings in composite climates. *Solar Energy*, Vol. 70, Págs.319-329, 2001.
 183. Rattanongphisat W., Imkong P., Khunkong S., An experimental investigation on the square steel solar chimney for building ventilation application. *Energy Procedia*, Vol. 138, Págs. 1165-1170, 2017.
-
-

184. Reddy V.S., Premelatha M., Ranjan K.R., Experimental studies on solar chimney for enhanced ventilation. *International Journal of Sustainable Energy*, Vol. 31, Págs. 35-42, 2012.
 185. Rubitherm Technologies GmbH, Data sheet RT42, 2020.
 186. Rymys M., Lewandowski W.M., Evaluating the influence of radiative heat flux on convective heat transfer from a vertical plate in air using an improved heating plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 173, Págs. 121232, 2021.
 187. Sakhri N., Menni Y., Chamkha A.J., Lorenzini G., Ameer H., Kaid N., Bensafi M., Experimental study of an earth-to-air heat exchanger coupled to the solar chimney for heating and cooling applications in arid regions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 145, Págs. 1-10, 2020.
 188. Sakhri N., Menni Y., Inc M., Ameer H., Lorenzini G., Chu Y., Thermal analysis for an experimental study of a cylindrical vertical solar chimney with internal PVC obstacles. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Págs. 1-8, 2021.
 189. Sakhri N., Moussaoui A., Menni Y., Sadeghzadeh M., Ahmadi M.H., New passive thermal comfort system using three renewable energies: Wind catcher, solar chimney and earth to air heat exchanger integrated to real-scale test room in arid region (Experimental study). *International Journal of Energy Research*, Vol. 45, Págs. 2177-2194, 2021.
 190. Salari A., Ashouri M., Hakkaki-Fard, A., On the performance of inclined rooftop solar chimney integrated with photovoltaic module and phase change material: A numerical study. *Solar Energy*, Vol. 211, Págs. 1159-1169, 2020.
 191. Salehi A., Fayaz R., Bozorgi M., Asadi S., Costanzo V., Imani N., Nocera F., Investigation of thermal comfort efficacy of solar chimneys under different climates and operation time periods. *Energy & Buildings*, Vol. 205, Págs. 109528, 2019.
 192. Samsudin S.S.A., Shaari A.M., Abdullah K., Batcha M.F.M., Potential of utilizing solar chimney as an energy efficiency measure in Malaysian hospitals. *CFD Letters*, Vol. 12, Págs. 90-99, 2020.
 193. Sarper B., Saglam M., Aydin O., Experimental and numerical investigation of natural convection in a discretely heated vertical channel: Effect of the blockage ratio of the heat sources. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, Págs. 894-910, 2018.
-
-

-
-
194. Schmid W.A., Lazos Martínez R.J., Guía para estimar la incertidumbre de la medición. Centro Nacional de Metrología, 2000.
 195. Scikit-learn: Machine Learning in Python, Pedregosa *et al.*, JMLR 12, pp. 2825-2830, 2011.
 196. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Registro Nacional de Emisiones: Factor de emisión del sistema eléctrico nacional 2021. Registro Nacional de Emisiones, México, 2022.
 197. Serageldin A., Abdeen A., Ahmed M.M.S., Radwan A., Shmroukh A.N., Ookawara S., Solar chimney combined with earth to-air heat exchanger for passive cooling of residential buildings in hot areas. *Solar Energy*, Vol. 206, Pàgs. 145-162, 2020.
 198. Sharma S.D., Kotani Y., Yamanaka T., Sagara K., Design, development of a solar chimney with built-in latent heat storage material for natural ventilation. *International Journal of Green Energy*, Vol. 4, Pàgs. 313-324, 2007.
 199. Shbailat S.J., Nima M.A., Possible energy saving of evaporative passive cooling using a solar chimney of metal foam porous absorber. *Energy Conversion and Management: X*, Vol. 12, Pàgs. 100118, 2021.
 200. Shi L., Ziem A., Zhang G., Li J., Setunge S., Solar chimney for a real building considering both energy-saving and fire safety- A case study. *Energy and Buildings*, Vol. 221, Pàg. 110016, 2020.
 201. Shinada Y., Kimura K., Katsuragi H., Song S., Natural ventilation system for a school building combined with solar chimney and underground pit. *Proceedings of Clima*, Vol. 2, Pàgs. 539-546, 2007.
 202. Sivalakshmi S., Raja M., Mahudeswaran R., Gowtham G., Thermal performance of wall solar chimney integrated with a room under warm and humid conditions. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 43, Pàgs. 1892-1895, 2021.
 203. Sivalakshmi S., Sethupathi V., Pachiyannan M., A comparative analysis on the thermal performance of solar chimney with smooth and dimpled absorber plate. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 43, Pàgs. 1124-1127, 2021.
 204. Solomon A.D., An easily computable solution to a two-phase Stefan problem. *Solar Energy*, Vol. 23, Pàgs. 525-528, 1979.
-
-

205. Soto A., Martínez P., Martínez P., Tudela J.A., Simulation and experimental study of residential building with north side wind tower assisted by solar chimneys. *Journal of Building Engineering*, Vol. 43, págs. 102562, 2021.
 206. Su C., Li X., Numerical study on performance of solar chimney for building ventilation. *ASME 2012 Summer Heat Transfer Conference*, Págs. 1049-1055, 2012.
 207. Sudprasert S., Luukkanen J., Comparison of ventilation with moist and dry air in the room connecting to a solar chimney. *International Journal of Building, Urban, Interior and Landscape Technology*, Vol. 10, Págs. 7-16, 2017.
 208. Sugini S., Mufida E., Significance of the position and high at solar chimney performance on dense low-cost house in warm humid climate. *Journal of Design and Built Environment*, Vol. 19, Págs. 24-30, 2019.
 209. Suhendri S., Hu M., Su Y., Darkwa J., Riffat S., Parametric study of a novel combination of solar chimney and radiative cooling cavity for natural ventilation enhancement in residential buildings. *Building and Environment*, Vol. 225, Págs. 109648, 2022.
 210. Swaminathan C.R., Roller V.R., On the Enthalpy Method. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, Vol. 3, Págs. 233-244, 1993.
 211. Swinbank W.C., Long-wave radiation from clear skies. *Quartely Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 89, Págs. 339-348, 1963.
 212. Taghdisi A., Ghanbari Y., Eskandari M., Energy-conservation considerations through a novel integration of sunspace and solar chimney in the terraced rural dwellings. *International Journal of Energy Economics and Policy*, Vol. 10, Págs. 1-13, 2020.
 213. Tan A.Y.K., Wong N.H., Natural ventilation performance of classroom with solar chimney system. *Energy and Buildings*, Vol. 53, Págs. 19-27, 2012.
 214. Tariq R., Torres-Aguilar C.E., Sheikh N.A., Ahmad T., Xamán J., Bassam A., Data engineering for digital twining and optimization of naturally ventilated solar façade with phase changing material under global projection scenarios. *Renewable Energy*, Vol. 187, Págs. 1-20, 2022.
 215. Tiji M.E., Eisapour M., Yousefzadeh R., Azadian M., Talebizadehsardari P., A numerical study of a PCM-based passive solar chimney with a finned absorber. *Journal of Building Engineering*, Vol. 32, Págs. 101516, 2020.
-
-

-
-
216. Tlatelpa-Becerro A., Estudio de la Transferencia de Calor en una Chimenea Solar para Uso Diurno con Doble Canal de Aire. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, CENIDET, Cuernavaca, Mor. (México), 2011.
 217. Tlatelpa-Becerro A., Rico-Martínez R., Cárdenas-Manríquez M., Urquiza G., Alarcón-Hernández F.B., Fuentes-Albarran M.C., Prediction of the Dynamic behavior of a solar chimney by means of artificial neural networks. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, Vol. 21 No.1, Págs. 1-16, 2022.
 218. Vargas-López R., Xamán J., Hernández-Pérez I., Arce J., Zavala-Guillén I., Jiménez M.J., Heras M.R., Mathematical models of solar chimneys with a phase change material for ventilation of buildings: A review using global energy balance. *Energy*, Vol. 170, Págs. 683-708, 2019.
 219. Vazquez-Ruiz A., Navarro J.M.A., Hinojosa J.F., Xamán J.P., Computational Fluid Dynamics and Experimental Analysis of the Heat Transfer in a Room With a Roof Solar Chimney. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 14, Págs. 1-12, 2021.
 220. Vazquez-Ruiz A., Navarro J.M.A., Hinojosa J.F., Xamán J.P., Effect of the solar roof chimney position on heat transfer in a room. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 209, Págs. 106700, 2021.
 221. Villar-Ramos M.M., Macias-Melo E.V., Aguilar-Castro K.M., Hernández-Pérez I., Arce J., Serrano-Arellano J., Díaz-Hernández H.P., López-Manrique L.M., Parametric analysis of the thermal behavior of a single-channel solar chimney. *Solar Energy*, Vol. 209, Págs. 602-617, 2020.
 222. Wan H., Cao T., Hwang Y., Radermacher R., Anderser S.O., Chin S., A comprehensive review of life cycle climate performance (LCCP) for air conditioning systems. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 130, Págs. 187-198, 2021.
 223. Wang D., Hu L., Du H., Liu Y., Huang J., Xu Y., Liu J., Classification, experimental assessment, modeling methods and evaluation metrics of Trombe Walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 124, Pág. 109772, 2020.
 224. Wang H., Lei C., Theoretical modeling of combined solar chimney and water wall for buildings. *Energy & Buildings*, Vol. 187, Págs. 186-200, 2019.
-
-

-
-
225. Wang Q., Zhang G., Li W., Shi L., External wind on the optimum designing parameters of a wall solar chimney in building. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 42, Págs. 100842, 2020.
226. Xamán J., Gijón-Rivera M., *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. Palibrio, 2016.
227. Xamán J., Vargas-López R., Gijón-Rivera M., Zavala-Guillén I., Jiménez M.J., Transient thermal analysis of a solar chimney for buildings with three different types of absorbing materials: Copper plate/PCM/concrete wall. *Renewable energy*, Vol. 136, Págs. 139-158, 2019.
228. Yilmaz T., Fraser S.M., Turbulent natural convection in a vertical parallel-plate channel with asymmetric heating. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, Págs. 2612-2623, 2007.
229. Yu J., Kang Y., Zhai Z.J., Advances in research for underground buildings: Energy, thermal comfort and indoor air quality. *Energy & Buildings*, Vol. 215, Pág. 109916, 2020.
230. Zamora B., Morphological comparative assessment of a rooftop solar chimney through numerical modeling. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 227, Págs. 107441, 2022.
231. Zavala-Guillén I., Xamán J., Álvarez G., Arce J., Hernández-Pérez I., Gijón-Rivera M., Computational fluid dynamics for modeling the turbulent natural convection in a double air-channel solar chimney system. *International Journal of Modern Physics C*, Vol. 27, Págs. 1650095-1-1650095-19, 2016.
232. Zavala-Guillén I., Xamán J., Hernández-Pérez I., Hernandez-López I., Gijón-Rivera M., Chávez Y., Numerical study of the optimum width of 2a diurnal double air-channel solar chimney. *Energy*, Vol. 147, Págs. 403-417, 2018.
233. Zha X., Zhang J., Qin M., Experimental and Numerical Studies of Solar Chimney for Ventilation in Low Energy Buildings. *Procedia Engineering*, Vol. 205, Págs 1612-1619, 2017.
234. Zhang H., Tao Y., Nguyen K., Han F., Li J., Shi L., A wall solar chimney to ventilate multi-zone buildings. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 47, Págs. 101381, 202.
-
-

235. Zhang H., Tao Y., Zhang G., Li J., Setunge S., Shi L., Impacts of storey number of buildings on solar chimney performance: A theoretical and numerical approach. *Energy*, Vol. 261 Part A, Págs. 125200, 2022.
236. Zhang H., Tao Y., Zhang G., Tam V.W.Y., Fan C., Shi L., Ventilation performance of solar chimney integrated into a multi-storey building. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 54, Págs. 102868, 2022.
237. Zhou G., Pang M., Experimental investigations on the performance of a collector-storage wall system using phase change materials. *Energy Conversion and Management*, Vol. 105, Págs 178-188, 2015.

ANEXO A

DATOS Y PROPIEDADES DE MATERIALES

En las Tabla A.1 se muestran las propiedades generales empleados para los modelos de ChSo-OC y ChSo-TC, mientras que en la Tabla A.2 se muestran las propiedades térmicas y termodinámicas de los PCM empleados, así como su temperatura de fusión.

Tabla A.1. Propiedades del sistema

Cubierta de vidrio	Placa de metal (aluminio) superficie color negro	Material masivo: ladrillo	Información adicional
$H_x = 0.003, 0.006$ y 0.008 m	$H_x = 0.0015875$ m	$H_x = 0.115$ m	$H_y = 2.0$ m $H_z = 1.0$ m $g = 9.81$ ms ⁻²
$\lambda = 1.40$ W(kg°C) ⁻¹ $C_p = 750.0$ J(kg°C) ⁻¹ $\rho = 2500.0$ kg m ⁻³	$\lambda = 177.0$ W(kg°C) ⁻¹ $C_p = 875.0$ J(kg°C) ⁻¹ $\rho = 2770.0$ kg m ⁻³	$\lambda = 0.98$ W(kg°C) ⁻¹ $C_p = 920.0$ J(kg°C) ⁻¹ $\rho = 1980.0$ kg m ⁻³	$h_{int} = 10.0$ W m ⁻² °C ⁻¹ $h_{ext} = 2.8 + 3.0V_{wind}$ W m ⁻² °C ⁻¹
Vidrio de 3 mm $\varepsilon = 0.840$ $\alpha^* = 0.085$ $\tau^* = 0.838$ Vidrio de 6 mm $\varepsilon = 0.840$ $\alpha^* = 0.076$ $\tau^* = 0.849$ Vidrio de 8 mm $\varepsilon = 0.846$ $\alpha^* = 0.089$ $\tau^* = 0.805$	Pintura negra $\varepsilon = 0.9$ $\alpha^* = 0.97$ Pintura gris $\varepsilon = 0.92$ $\alpha^* = 0.75$ Pintura gris $\varepsilon = 0.94$ $\alpha^* = 0.30$	$N_x = 21$	Orientaciones para ChSo-OC: Norte, Sur, Este y Oeste. Orientaciones para ChSo-TC: Norte-Sur, Este-Oeste
Poliestireno extruido (foamular)	Canal de aire	Material masivo: concreto	
$H_x = 0.025$ m	$H_x = 0.05-0.35$ m	$H_x = 0.12$ m	
$\lambda = 0.0001T + 0.0262$ W(kg°C) ⁻¹ $C_p = 1210.0$ J(kg°C) ⁻¹ $\rho = 21.0$ kg m ⁻³ $\varepsilon = 0.82$	$\lambda, C_p, \rho =$ Relaciones empíricas (Arce et al., 2013; CENAM, 2003)	$\lambda = 1.21$ W(kg°C) ⁻¹ $C_p = 840.0$ J(kg°C) ⁻¹ $\rho = 2200.0$ kg m ⁻³	
	$N_y = 21$	$N_x = 21$	

Nota: Datos obtenidos de Incropera y DeWitt (1996), Kumaran (1996), CENAM (2003), Arce et al. (2013)

Tabla A.2. Propiedades de los PCM

PCM	λ [W(kg°C) ⁻¹]	C_p [J(kg°C) ⁻¹]	ρ [kg m ⁻³]	$T_{\text{cambio de fase}}$ [°C]	h [J kg ⁻¹]
RT25 HC	0.20	2000.0	880-770	22-26	230000
RT28 HC	0.20	2000.0	880-770	27-29	250000
RT35 HC	0.20	2000.0	880-770	34-36	240000
RT42	0.20	2000.0	880-760	38-43	165000
MG-49	0.21	2230.0	850	27-29	205000
Parafina 46-50	0.21	2480.0-2760.0	829-765	41-43	228000

Nota: Rubitherm® (2020)

ANEXO B

DATOS CLIMÁTICOS DE CIUDADES EVALUADAS

En la Fig. B.1 se presentan las condiciones climáticas anuales de la ciudad de Hermosillo, Sonora.

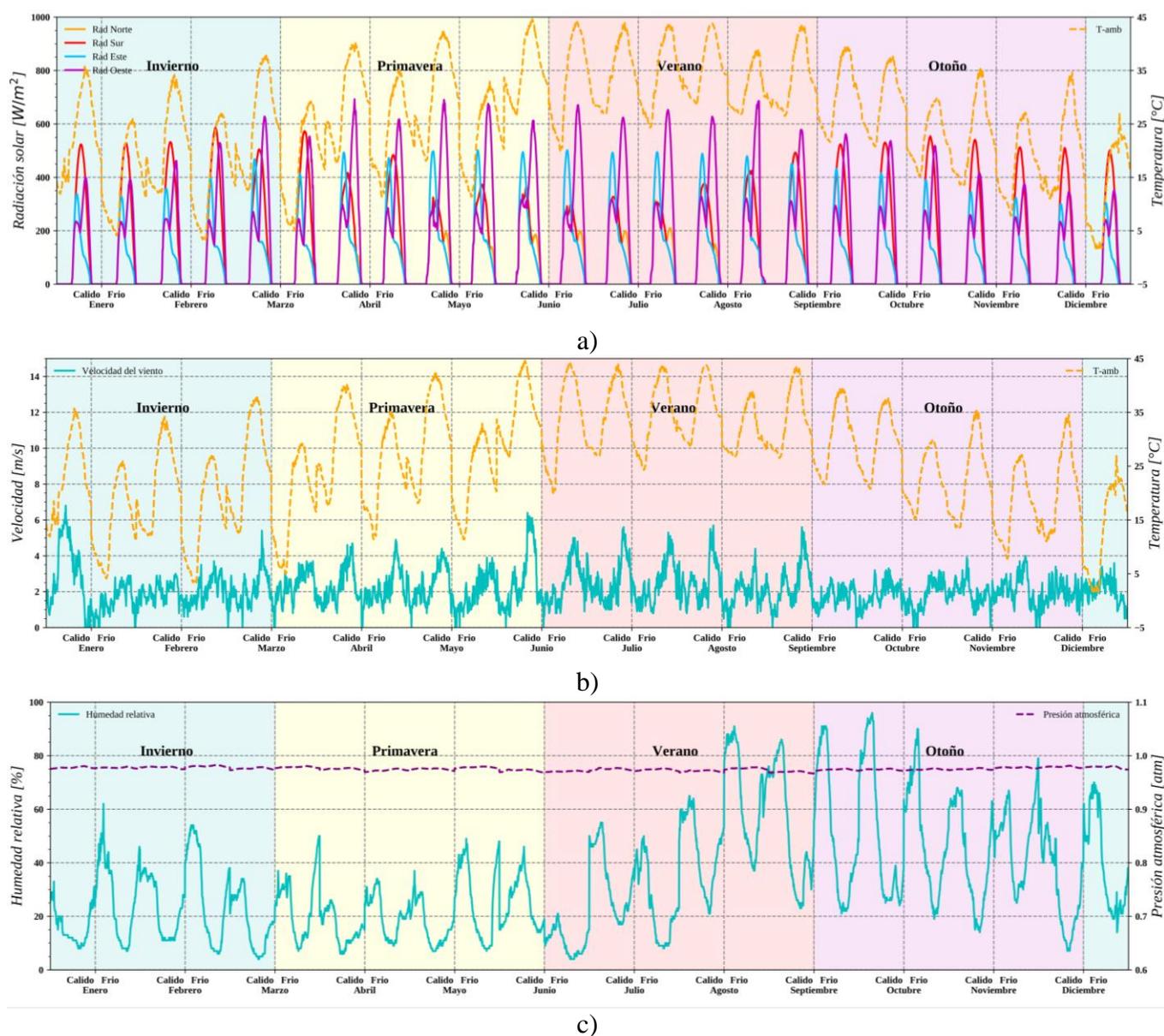


Figura B.1. Condiciones climáticas anuales de Hermosillo, Sonora: a) Radiación solar y temperatura ambiente, b) velocidad del viento, c) humedad relativa y presión atmosférica

En la Fig. B.2 se presentan las condiciones climáticas anuales de la ciudad de Monterrey, Nuevo León.

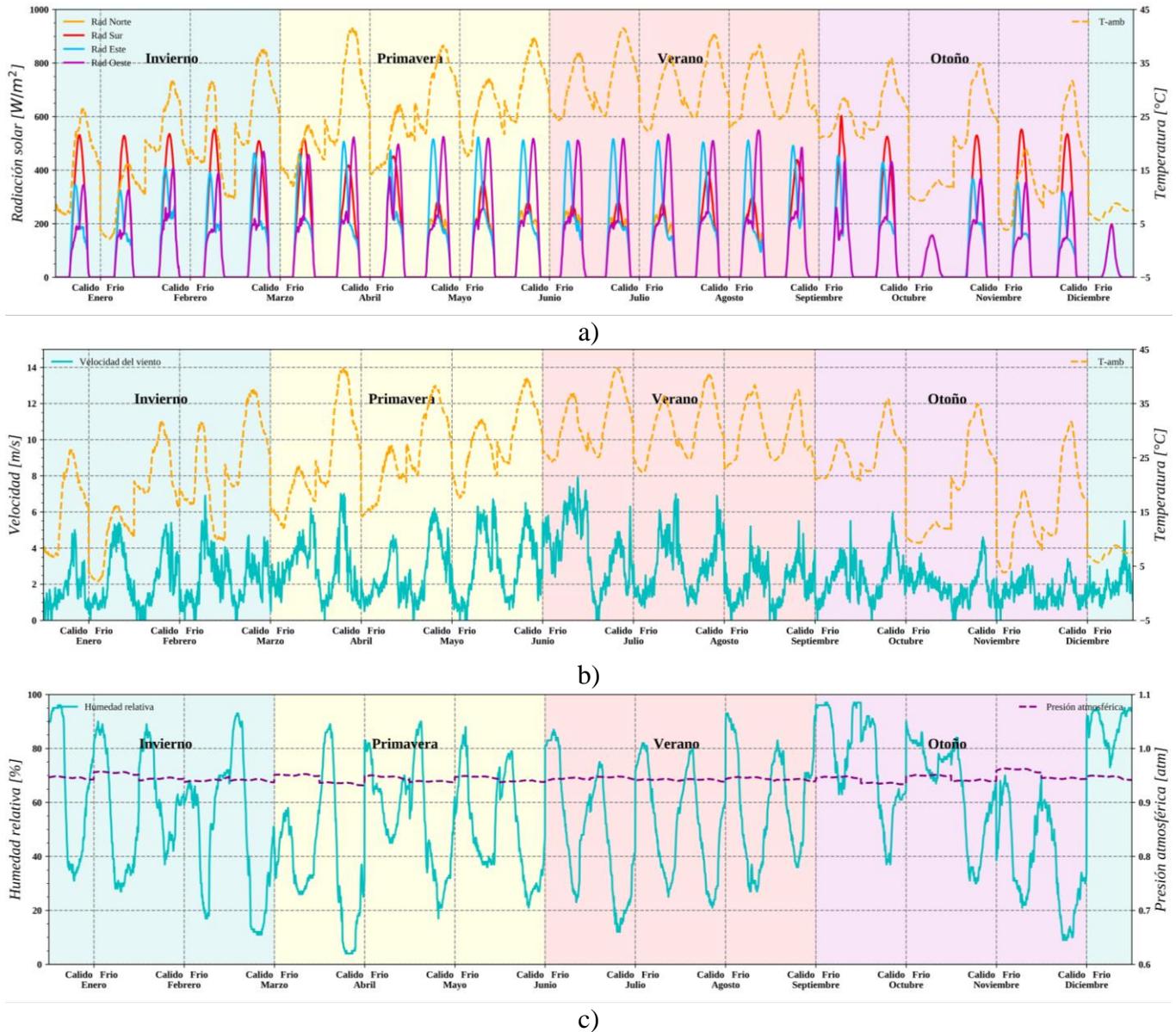


Figura B.2. Condiciones climáticas anuales de Monterrey, Nuevo León: a) Radiación solar y temperatura ambiente, b) velocidad del viento, c) humedad relativa y presión atmosférica

En la Fig. B.3 se presentan las condiciones climáticas anuales de Ciudad de México.

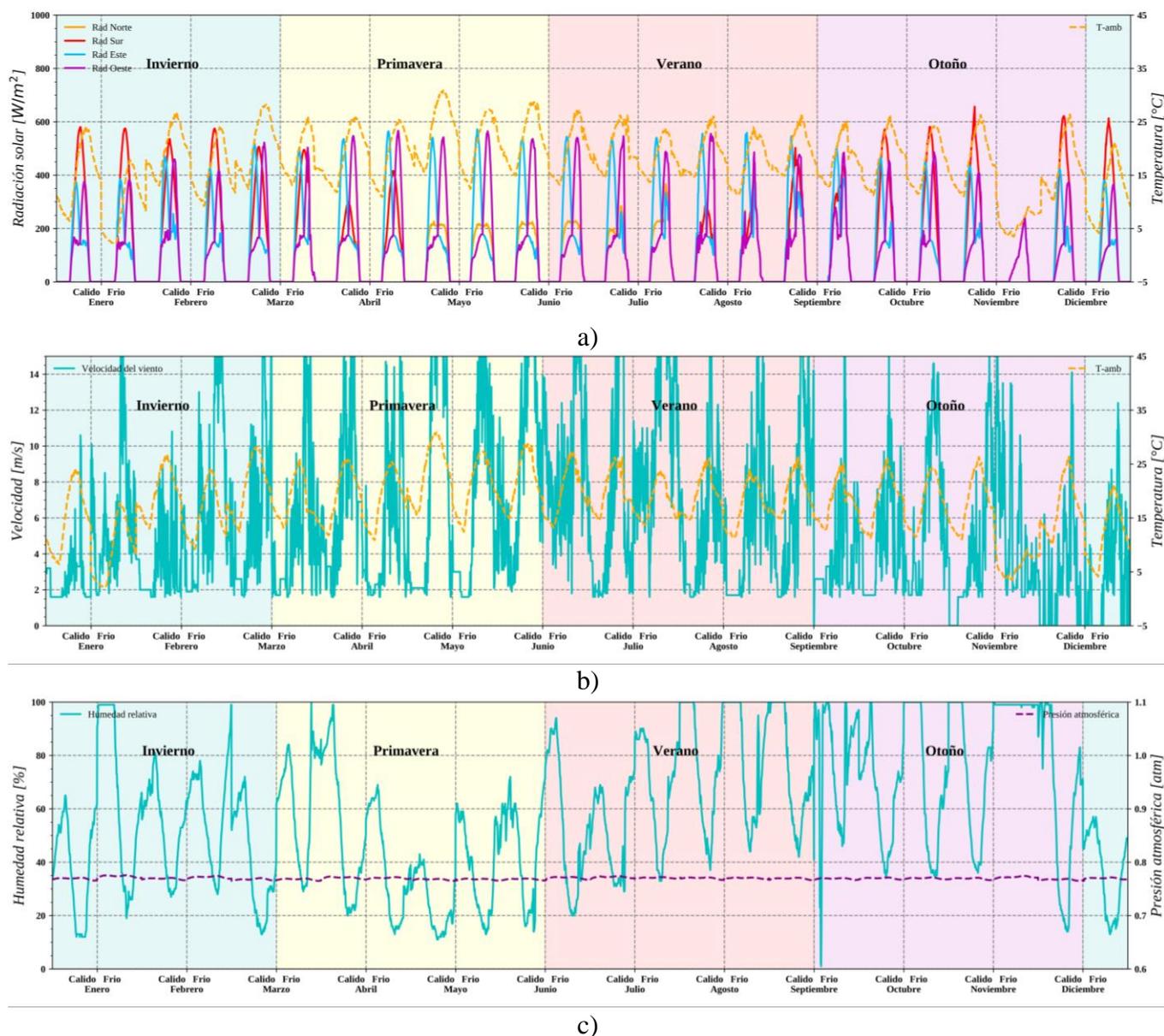


Figura B.3. Condiciones climáticas anuales de Ciudad de México: a) Radiación solar y temperatura ambiente, b) velocidad del viento, c) humedad relativa y presión atmosférica

En la Fig. B.4 se presentan las condiciones climáticas anuales de Toluca, Edo. de México.

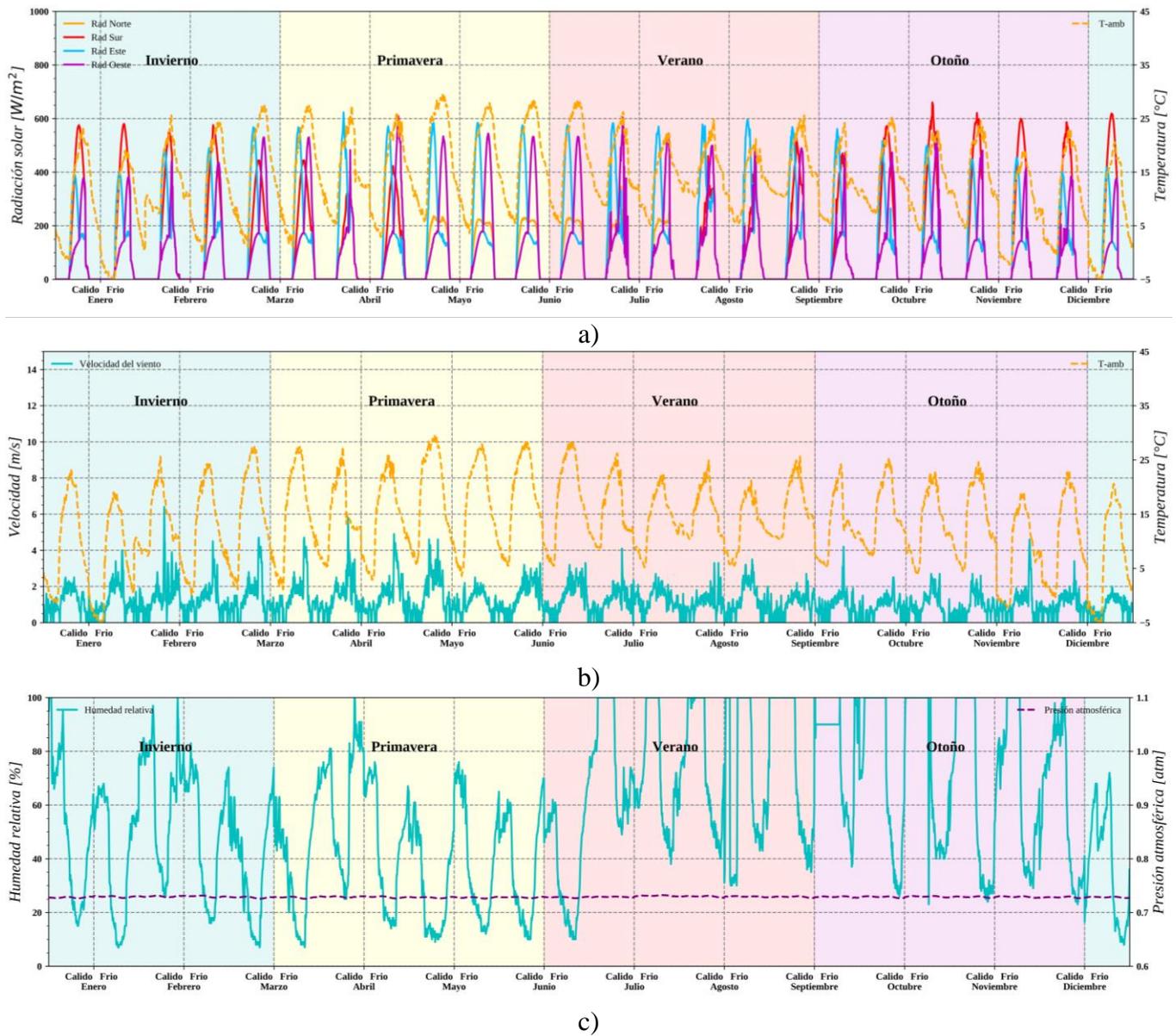


Figura B.4. Condiciones climáticas anuales de Toluca, Edo. de México: a) Radiación solar y temperatura ambiente, b) velocidad del viento, c) humedad relativa y presión atmosférica

En la Fig. B.5 se presentan las condiciones climáticas anuales de Villahermosa, Tabasco.

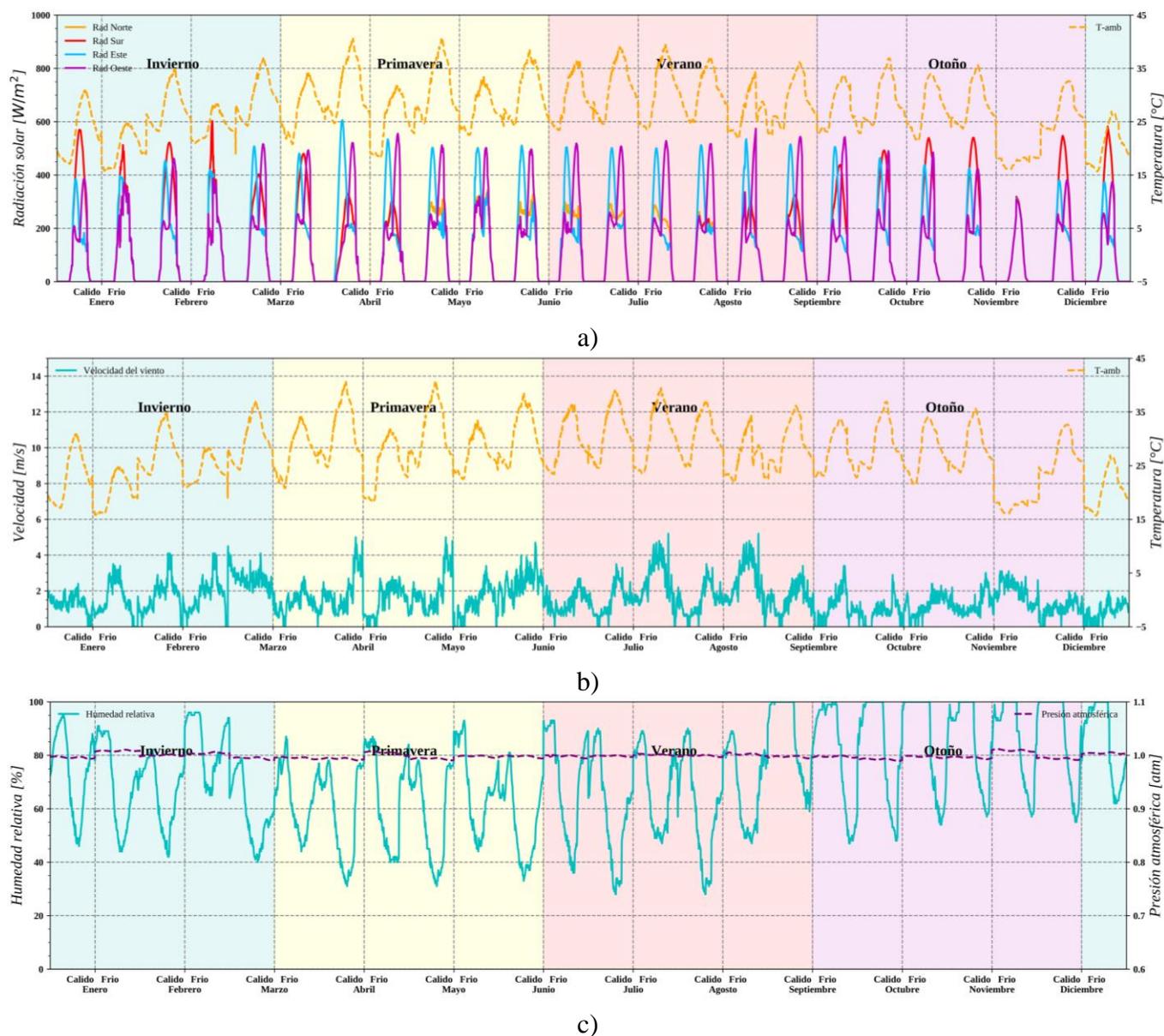


Figura B.5. Condiciones climáticas anuales de Villahermosa, Tabasco: a) Radiación solar y temperatura ambiente, b) velocidad del viento, c) humedad relativa y presión atmosférica

En la Fig. B.6 se presentan las condiciones climáticas anuales de Mérida, Yucatán

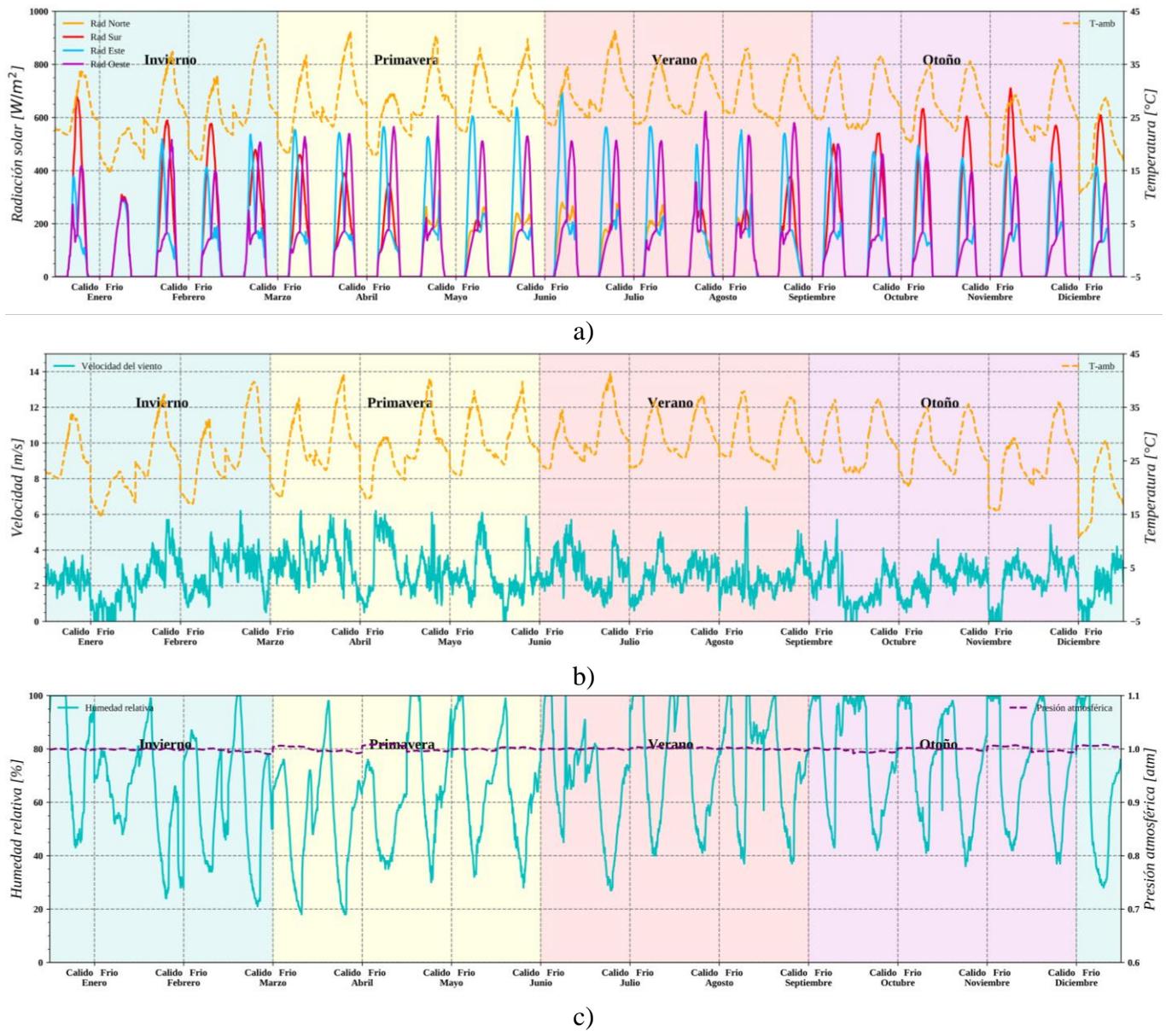


Figura B.6. Condiciones climáticas anuales de Mérida, Yucatán: a) Radiación solar y temperatura ambiente, b) velocidad del viento, c) humedad relativa y presión atmosférica

ANEXO C**RESULTADOS DE ESTUDIOS PARAMÉTRICOS: OTRAS CIUDADES**

En esta sección se presentan los resultados del estudio paramétrico de la ciudad de Monterrey, Ciudad de México, Toluca, Villahermosa y Mérida.

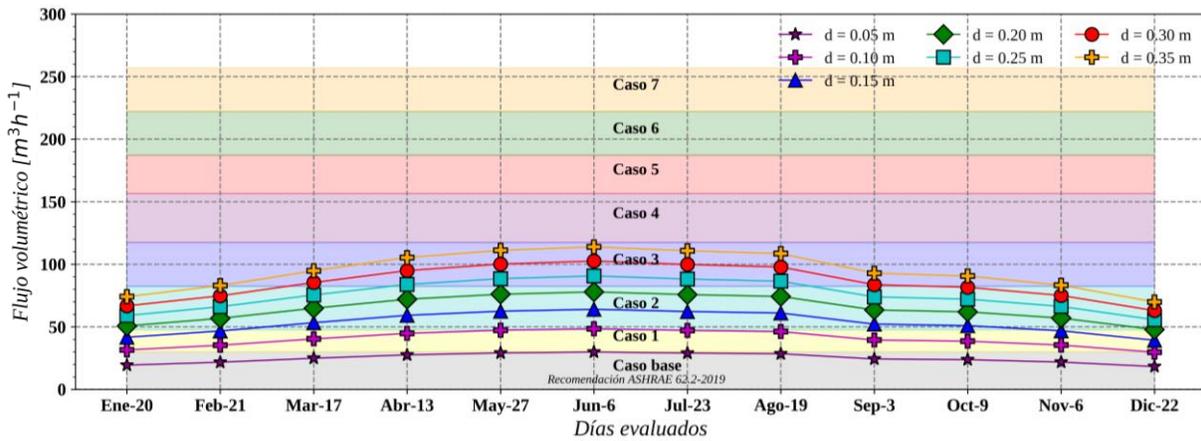
C.1. Monterrey, Nuevo León

La ciudad de Monterrey presentó una temperatura máxima registrada durante el año 2018 de 41.45°C. Mientras que la temperatura más baja fue durante del invierno de 2.22°C. En el Anexo C se presentan las condiciones climáticas anuales para el estudio paramétrico. En las Figs. 7.9 y 7.10 se presentan los flujos de aire promedio obtenido a través de todo el año para la evaluación del espesor del canal y el material de la pared absorbente, respectivamente.

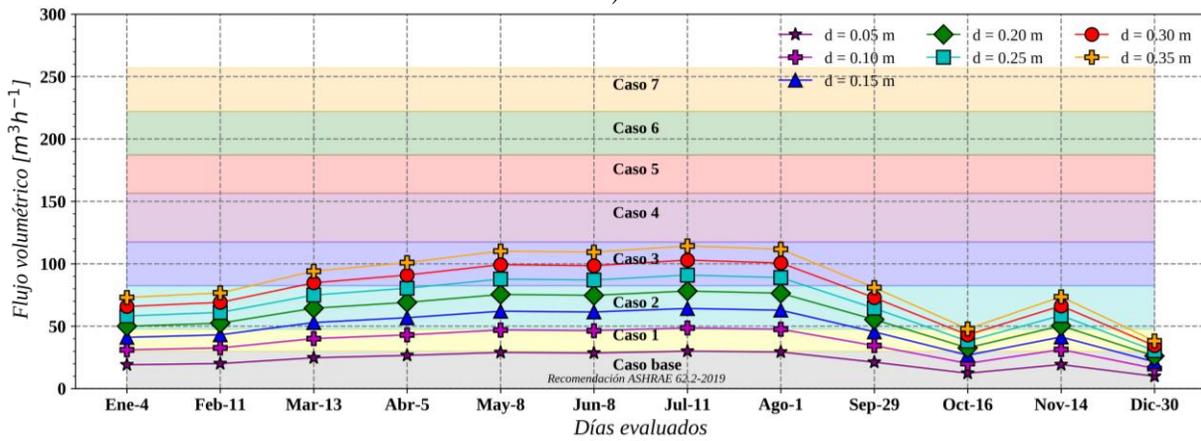
En las Figs. C.1(a,b) se presenta el comportamiento anual de la ChSo-OC. Se observa que los flujos de aire promedio más altos que se encontraron fueron de 114.22 y 113.88 m³h⁻¹ el día frío de julio y el día cálido de junio respectivamente; este comportamiento se obtuvo para la orientación Oeste y empleando el espesor de canal más grande de todo el estudio paramétrico ($d = 0.35$ m). La capacidad máxima de ventilación de la ChSo-OC permitió satisfacer la ventilación total requerida para el Caso 2 y como mínimo el Caso base en la mayor parte del año empleando una configuración $d = 0.05$ m. Los flujos volumétricos más altos usando la orientación Oeste se obtuvieron durante los meses de mayo-agosto (primavera-verano).

En cuanto al comportamiento de la ChSo-TC, Figs. C.1(c,d), se encontró que los flujos más altos para los días cálidos y fríos fueron de 243.51 y 244.69 m³h⁻¹ respectivamente. Ambos flujos de aire máximo se registraron en la orientación Oeste y para los meses de julio y junio. El flujo de aire inducido por la ChSo-TC casi duplicó los flujos de aire inducidos por la ChSo-TC, de tal forma que la ChSo-TC cubrió la ventilación total requerida por el Caso 6. El desempeño mínimo registrado reveló un flujo de aire superior al requerido por el Caso base durante la mayor parte del año. En general, las orientaciones Oeste y Este permitieron obtener los flujos de aire más altos durante las estaciones de primavera y verano, lo cual puede

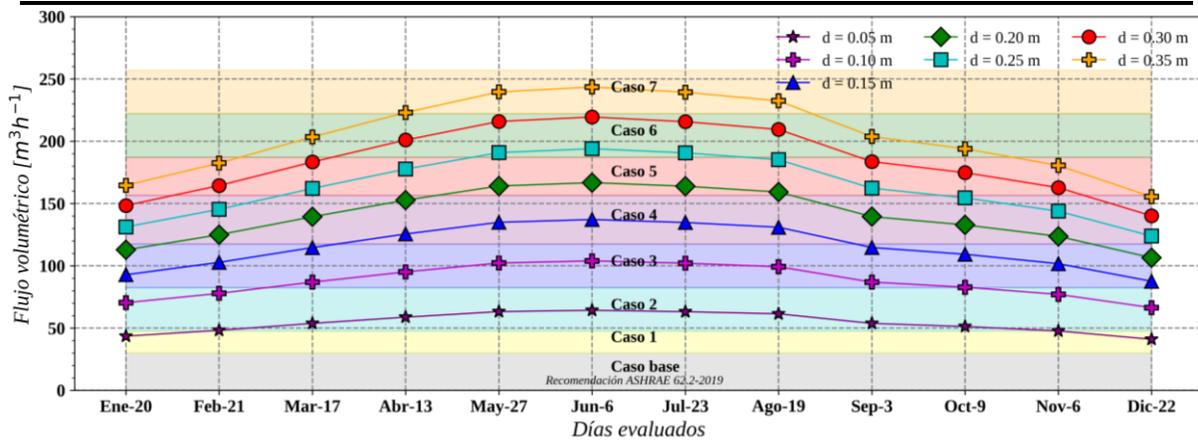
aprovecharse con sistemas de acondicionamiento de aire para mejorar el confort térmico al interior de las edificaciones además de la ventilación natural.



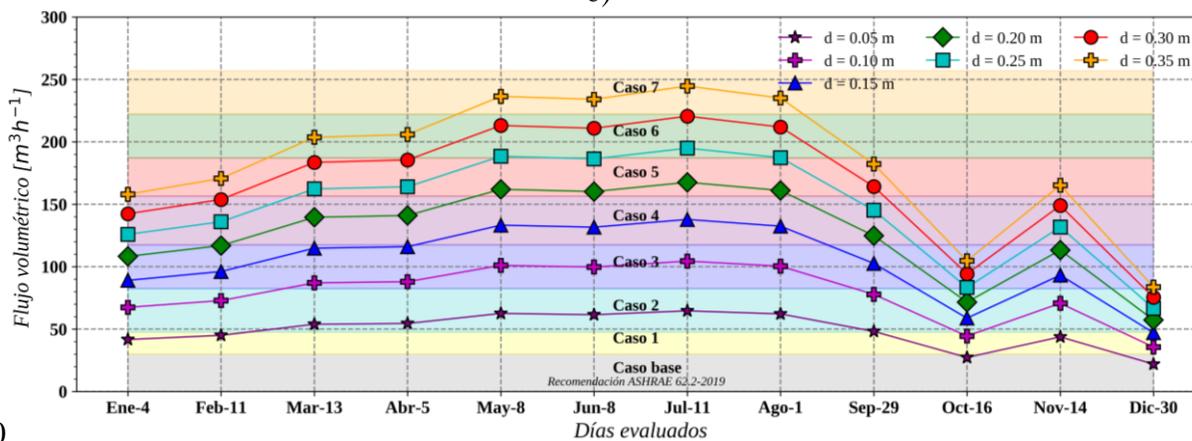
a)



b)



c)

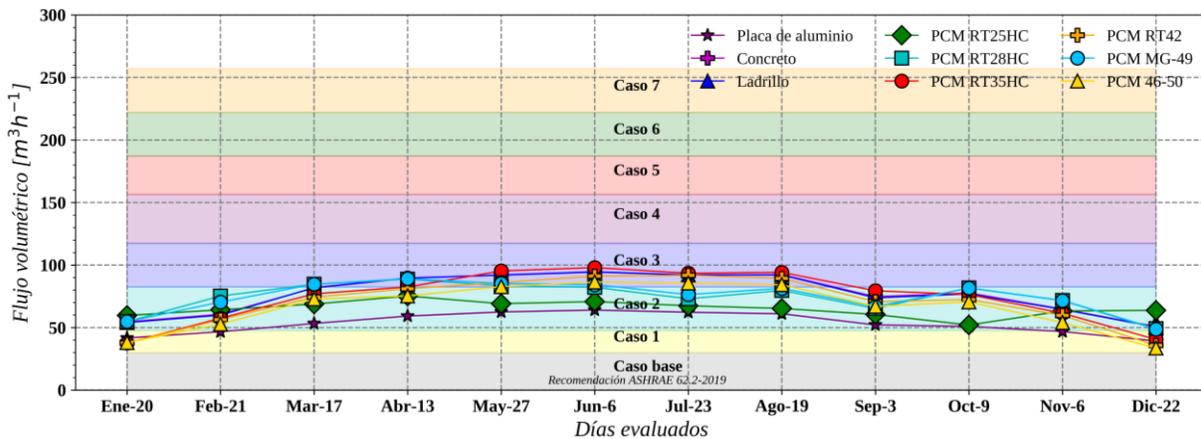


d)

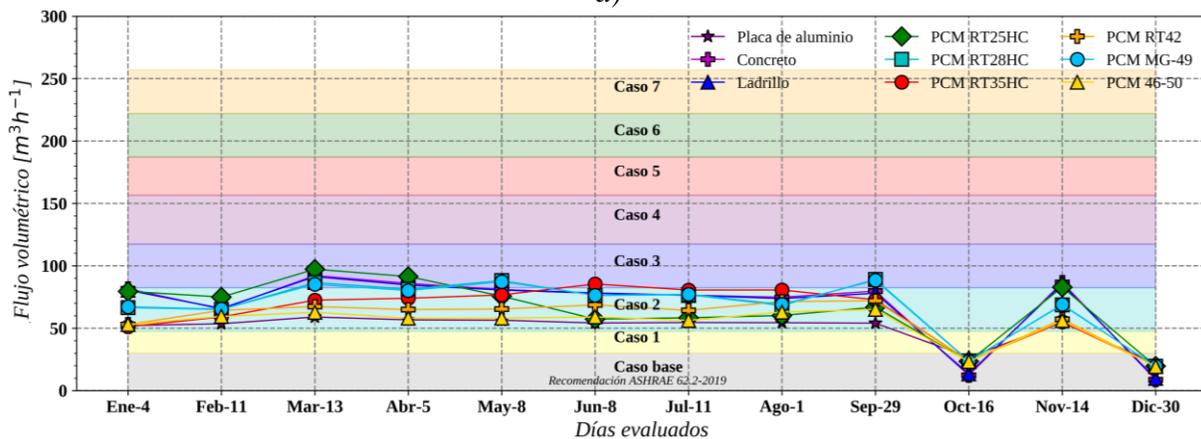
Figura C.1. Flujo volumétrico-Espesor del canal-Monterrey: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Oeste-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC

En cuanto a la evaluación del comportamiento de los materiales masivos en ambos modelos de chimenea solar, la Fig. C.2(a,b) muestra que para la ChSo-TC con un PCM RT35 HC y RT25HC se obtuvieron flujos de aire de 97.97 y 97.28 m^3h^{-1} para el día cálido de junio y día frío de marzo respectivamente. Las respectivas orientaciones de ambos flujos máximos fueron Oeste y Sur; por esta razón la diferencia en las fechas en las que se observaron estos comportamientos, ya que, durante los primeros y últimos meses del año, la radiación solar incidente en la orientación Sur alcanza sus valores máximos, en cambio, las orientaciones Este y Oeste presentan mayores beneficios durante la transición de la primavera y el verano. Aunque la capacidad máxima de ventilación de la ChSo-OC con las dimensiones base y los materiales masivos apenas cubre la ventilación total del Caso 2, durante la mayor parte del año mantiene una ventilación estable capaz de cubrir lo necesario para el Caso base.

La evaluación de la ChSo-TC con materiales masivos, Figs. C.2(c, d), reveló que los flujos de aire más altos fueron de 187.90 y 182.56 m³h⁻¹ para el día cálido de junio y el día frío de julio. En ambos casos la orientación Este-Oeste fue la que permitió inducir mayor ventilación en combinación con el concreto como material masivo de la pared absorbente. En segundo lugar, el material con mejor desempeño fue el RT35HC con un flujo de aire promedio de 164.85 m³h⁻¹ suficiente para satisfacer la ventilación total del Caso 4. Aunque los flujos de aire más altos se presentaron a través de una configuración de concreto como pared absorbente, en general el uso de materiales de cambio de fase en la ChSo-TC permitió inducir suficiente ventilación para cubrir el Caso 2 durante la mayor parte del año, solamente durante los meses de octubre y noviembre descendieron drásticamente los flujos de aire debido a la baja radiación solar incidente sobre las chimeneas solares.



a)



b)

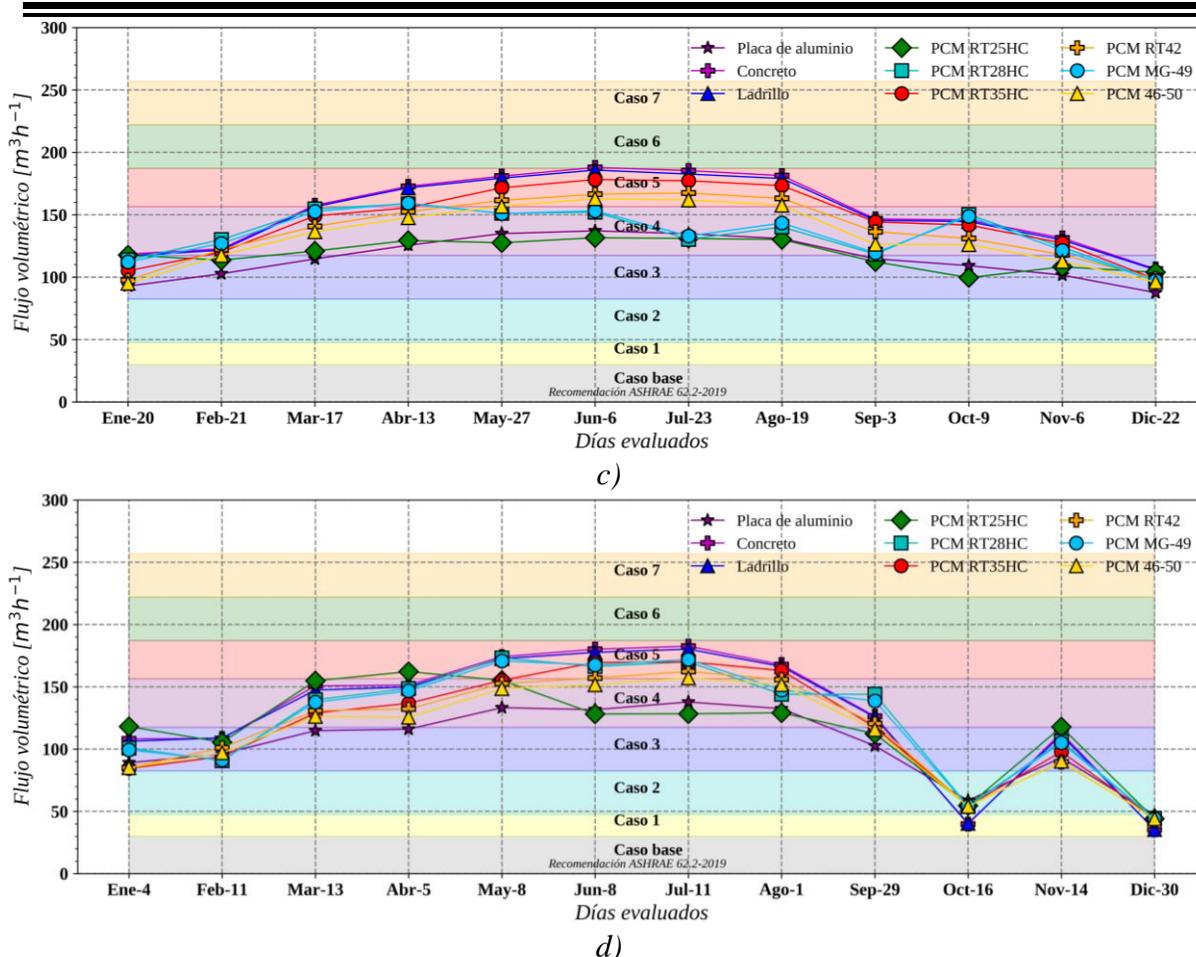


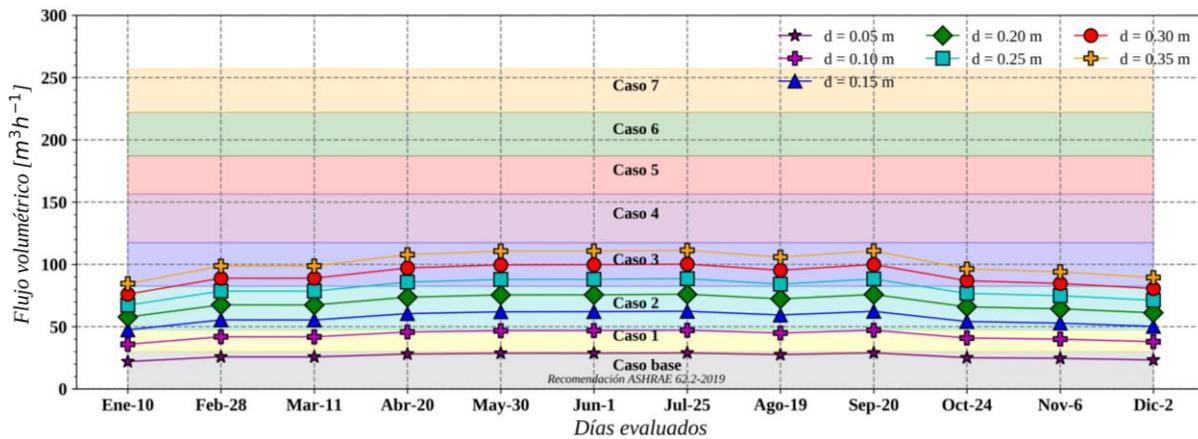
Figura C.2. Flujo volumétrico-material de pared absorbente-Monterrey: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Sur-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC

C.2. Ciudad de México

La Ciudad de México presenta tres tipos de climas que dificultan establecer un solo estado climático. Sin embargo, de acuerdo con la base de datos de la CONAGUA, el clima que predomina en la región corresponde a un clima templado subhúmedo (CW). La temperatura máxima en todo el año de acuerdo con los datos de la CONAGUA es de 30.78°C con una mínima 2.07°C. Estas condiciones no son tan extremas como en el caso de la ciudad de Hermosillo, Sonora, por lo que el potencial de ventilación es alto a través del uso de chimeneas solares sin necesidad de un previo acondicionamiento del aire a la entrada. En el Anexo C se muestra el comportamiento anual de las condiciones climáticas de la Ciudad de México. En las Figs. C.3 y C.4 se muestra el comportamiento anual del estudio paramétrico del espesor del canal y los materiales masivos considerando los flujos de aire más altos.

La ChSo-OC, Fig. C.3(a, b), presentó flujos de aire de 116.36 y 111.30 m³h⁻¹ para el día más frío y cálido de julio en la orientación Este. Al igual que en los análisis anteriores, el uso de orientaciones Este y Oeste presenta mayores flujos de aire durante la transición de primavera y verano al presentarse la radiación incidente en su punto máximo en estas orientaciones durante estas épocas del año. La capacidad máxima de ventilación se obtuvo para el mayor espesor del canal evaluado ($d = 0.35$ m). La capacidad máxima de ventilación cubrió la ventilación total del Caso 2 satisfactoriamente, mientras que el desempeño mínimo permitió cubrir lo necesario para el Caso base durante la mayor parte del año.

El desempeño de la ChSo-TC, Fig. C.3(b, c), fue superior al de la ChSo-SC al punto de duplicar el flujo de aire máximo de este sistema. Los flujos de aire promedio más altos fueron de 243.24 y 242.83 m³h⁻¹ para el día frío de mayo y el día cálido de junio, respectivamente; en ambos casos la mejor orientación fue la Oeste. De tal forma que se cubrió la ventilación total del Caso 6, mientras que el desempeño mínimo del sistema se mantuvo superior a la ventilación total necesaria del Caso 1 durante la mayor parte del año. Incluso a pesar de que la radiación solar incidente del mes de noviembre fue menor comparado al resto de los meses evaluados, la ChSo-TC indujo un flujo de aire superior a 30.06 m³h⁻¹ (Caso base).



a)

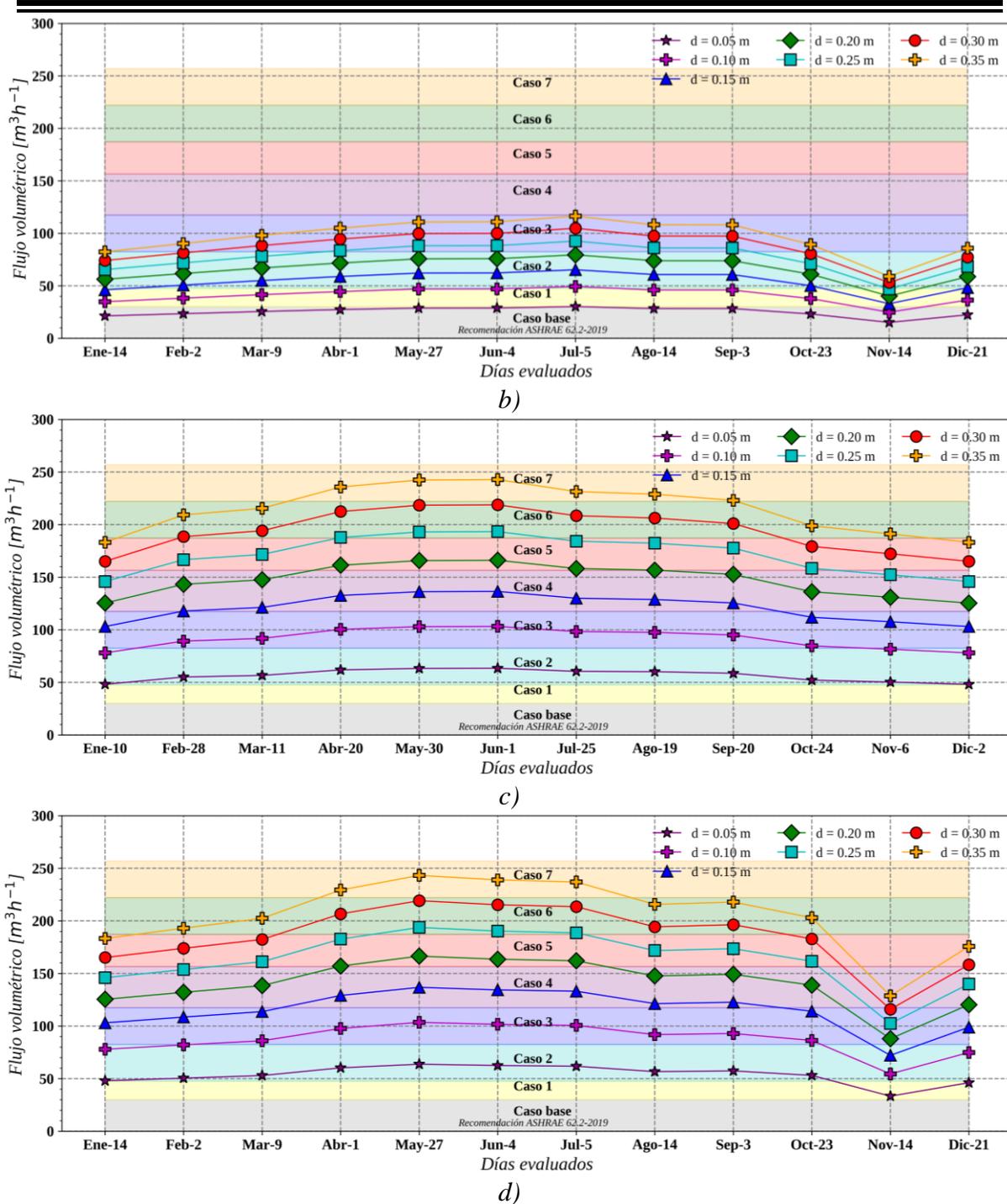


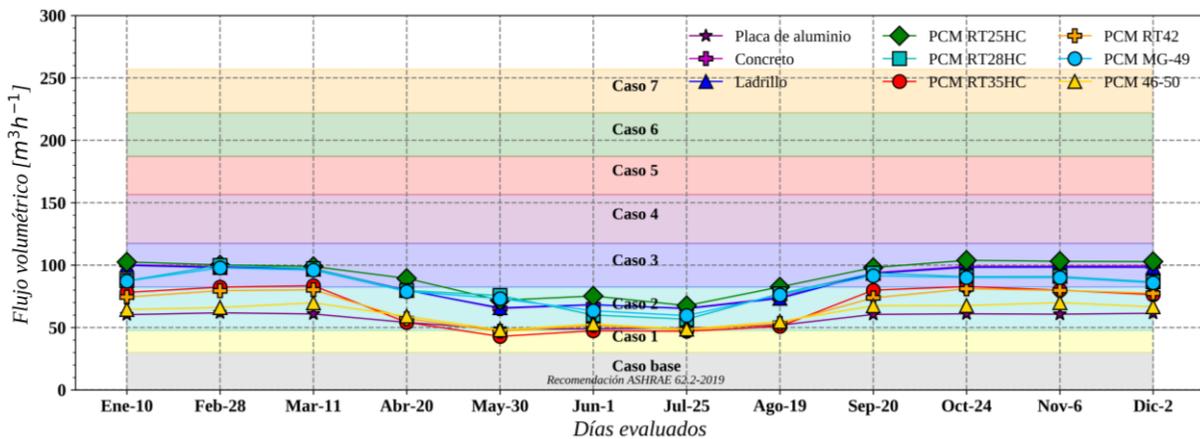
Figura C.3. Flujo volumétrico-Espesor del canal-Ciudad de México: a) orientación Este-día cálido ChSo-OC; b) orientación Este-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC

En cuanto a la evaluación de materiales masivos en ambos modelos de chimenea solar, para la ChSo-OC se presentaron flujos de aire promedio de hasta 105.39 y 103.83 m³h⁻¹ para el día frío y cálido de octubre respectivamente. En ambos días, la orientación Sur fue la que

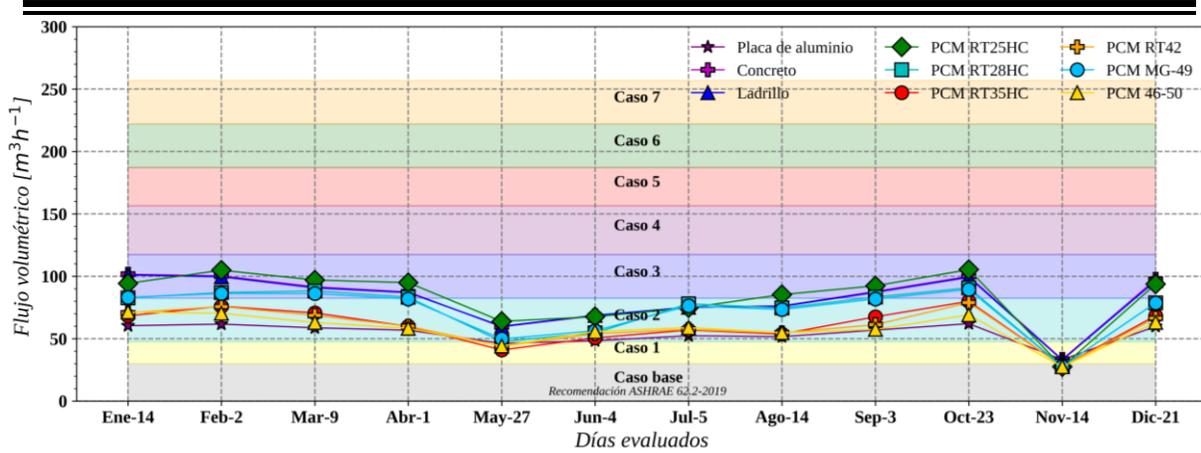
permitted the solar chimney to induce a greater ventilation through the use of a PCM RT25 HC. Another material that also presented an optimal behavior together with the ChSo-OC was the RT28 HC and the concrete, however, to a greater extent the phase change materials showed a more outstanding behavior in combination with the ChSo-OC. The air flows obtained were sufficient to cover Cases 2 and Case base for most of the year, however, the highest air flows were obtained during the autumn and winter months due to the orientation of the solar chimney.

For the ChSo-TC, Figs. C.4(c, d), the highest volumetric flows were 190.81 and 189.53 m^3h^{-1} for the coldest and warmest days of June in the East-West orientation. In both cases, concrete was used as the absorbing wall in the ChSo-TC. The PCM RT25 HC was the material with the best performance behind the concrete; this configuration allowed obtaining air flows of up to 174.66 m^3h^{-1} , which was sufficient to satisfy the needs of Case 4, although the configurations of concrete induced air flows sufficient to satisfy the requirements of Case 4 and 5 for most of the year.

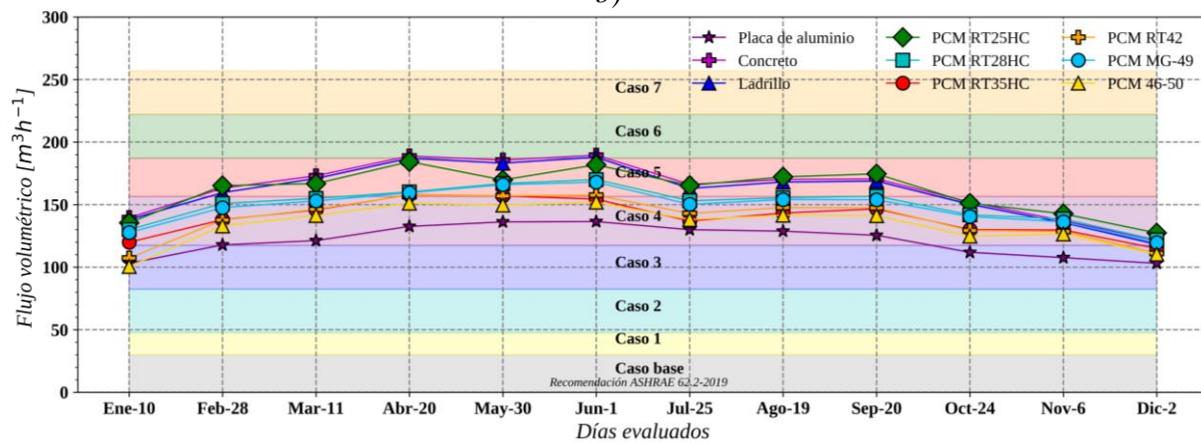
In general, the use of solid materials in the ChSo-TC, whether PCM or not, is capable of providing natural ventilation superior to Case 1 and 2 satisfactorily. The performance of the ChSo-OC presented a better performance with the use of phase change materials in contrast to the evaluations with configurations of concrete, brick and metal plate.



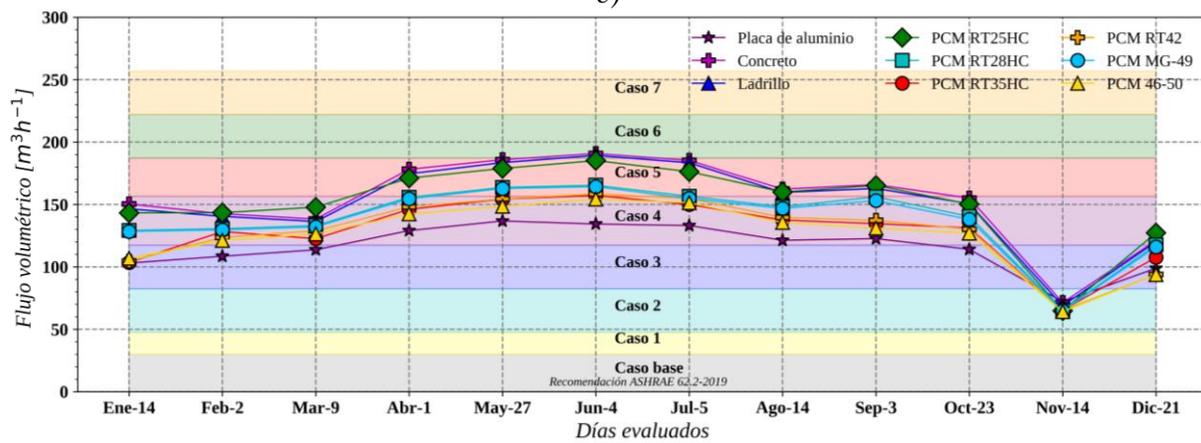
a)



b)



c)



d)

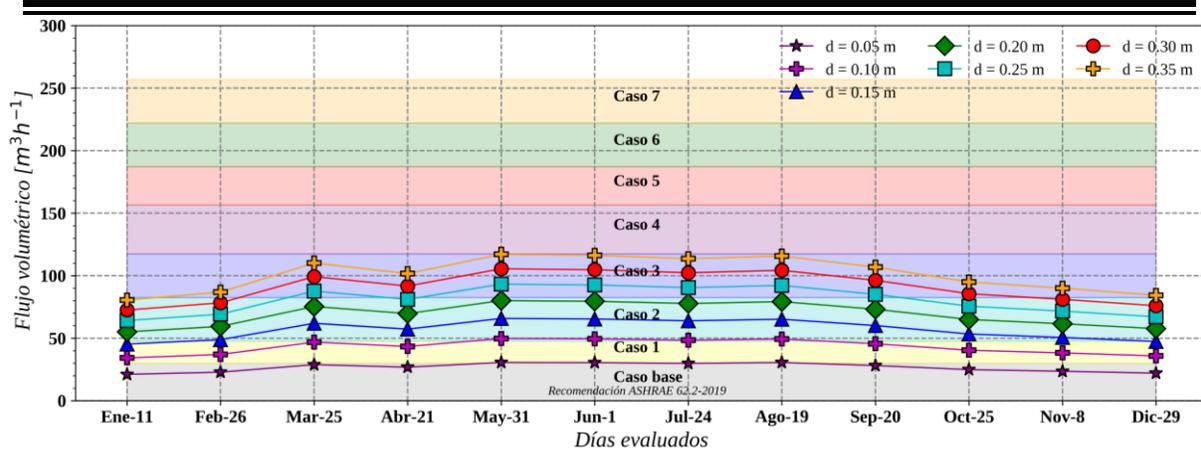
Figura C.4. Flujo volumétrico-material de pared absorbente-Ciudad de México: a) orientación Sur-día cálido ChSo-OC; b) orientación Sur-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC

C.3. Toluca, Edo. de México

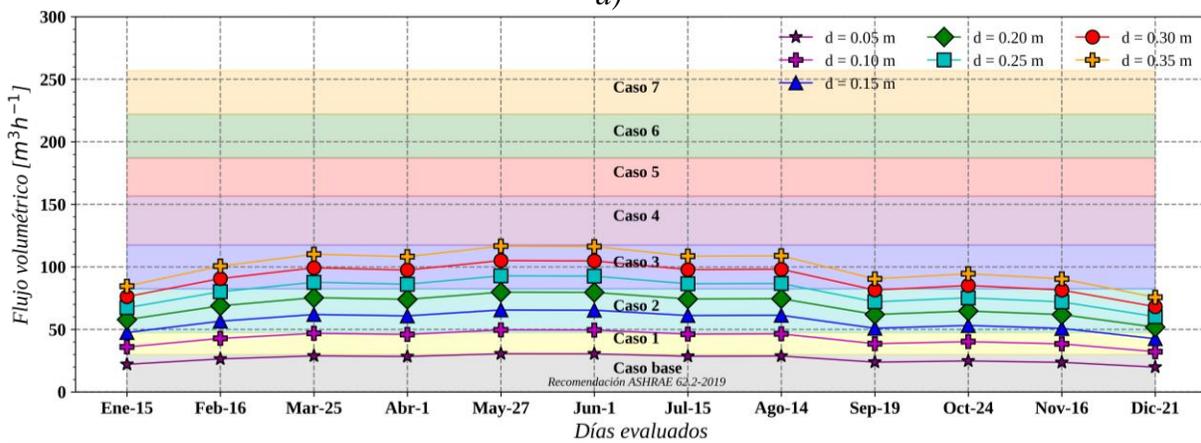
La ciudad de Toluca se caracteriza por ser un lugar cuya temperatura anual promedio es menor a muchas locaciones de la República Mexicana. De igual forma que la Cd. de México y Monterrey, la extensión territorial de esta ciudad se encuentra entre dos zonas climáticas. Sin embargo, de acuerdo con la CONAGUA, el clima que predomina en la región corresponde a un clima templado subhúmedo (CW) con tendencia a semifrío. La temperatura máxima en todo el año de acuerdo con los datos de la CONAGUA es de 29.7°C con una mínima -5.6°C. En el Anexo C se presenta las condiciones climáticas anuales empleadas para el desarrollo del estudio paramétrico. En las Figs. C.5. y C.6 se presentan los resultados del estudio paramétrico del espesor del canal y los materiales masivos empleados en los modelos de ChSo-OC y ChSo-TC.

Las Figs. C.5(a, b) muestran que los flujos de aire más altos generados por la ChSo-OC fueron de 117.09 y 116.56 m³h⁻¹ para el día cálido y frío de mayo respectivamente; la orientación en ambos resultados fue la Este. De igual forma, los flujos de aire más altos se obtuvieron con la configuración $d = 0.35$ m. La capacidad de ventilación de la ChSo-OC fue suficiente para cubrir la ventilación total requerida por el Caso 2, sin embargo, el desempeño mínimo del sistema permitió cubrir el Caso base durante la mayor parte del año. El desempeño de la ChSo-OC durante la transición de la primavera-verano fue la más alta en todo el año lo cual puede favorecer el tratamiento o pre acondicionamiento del aire a la entrada de la edificación con fines de mejorar el confort térmico.

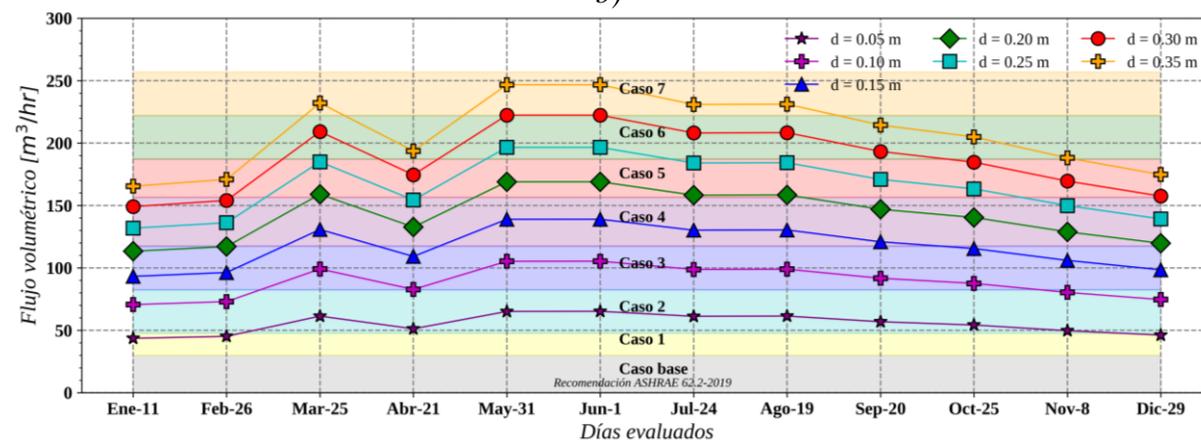
En cambio, las Figs. C.5(c, d) muestran que la ChSo-TC fue capaz de duplicar el flujo de aire inducido por la ChSo-OC de tal forma que los flujos de aire promedio más altos fueron de 249.87 y 246.75 m³h⁻¹ para el día frío y cálido de mayo respectivamente. Bajo las condiciones climáticas de Toluca, la orientación Este-Oeste fue la permitió obtener desempeños más altos de ambos modelos de chimenea solar evaluados. La capacidad de ventilación más alta estimada fue capaz de cubrir la ventilación total del Caso 6 durante los meses de marzo-junio, mientras que el desempeño mínimo de ventilación fue superior a los 30.06 y 47.52 m³h⁻¹ necesarios para los Casos base y 1 respectivamente durante la mayor parte del año.



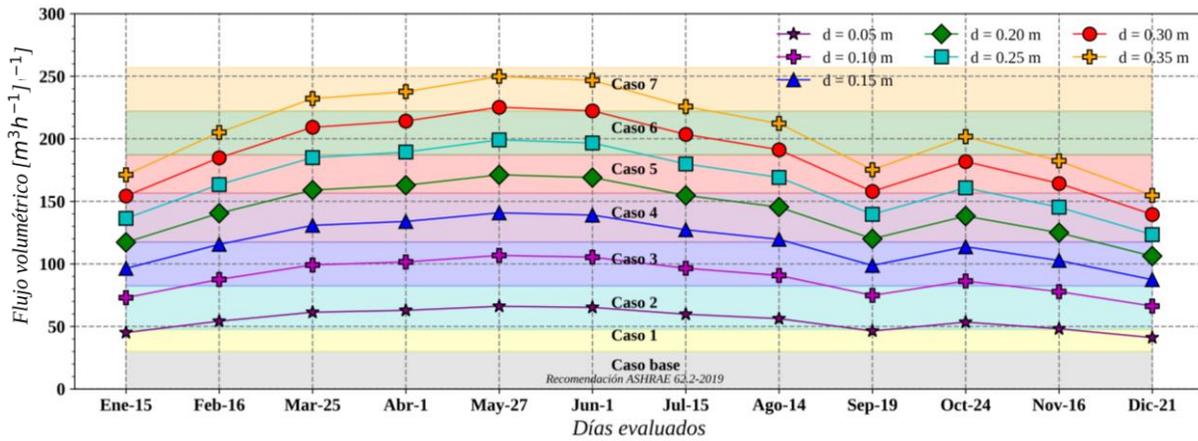
a)



b)



c)



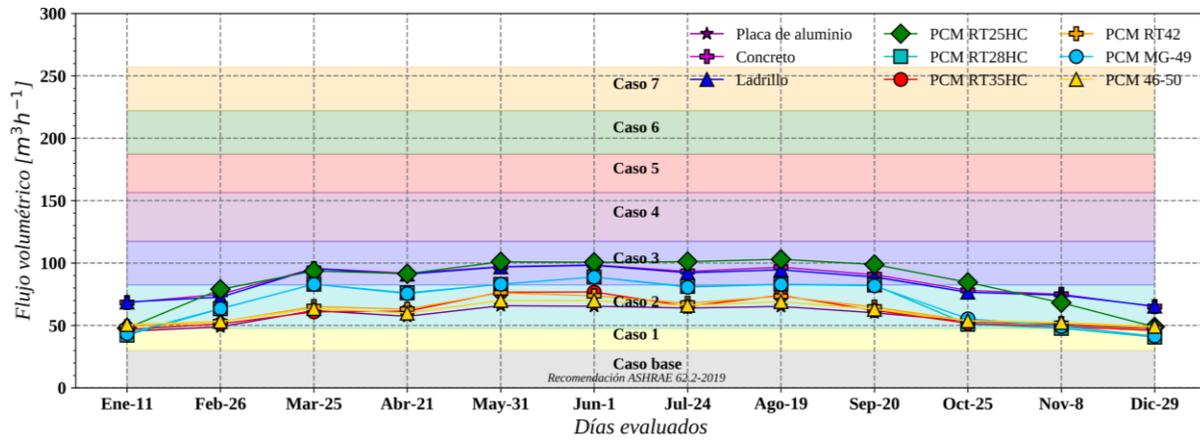
d)

Figura C.5. Flujo volumétrico-Espesor del canal-Toluca: a) orientación Este-día cálido ChSo-OC; b) orientación Este-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC

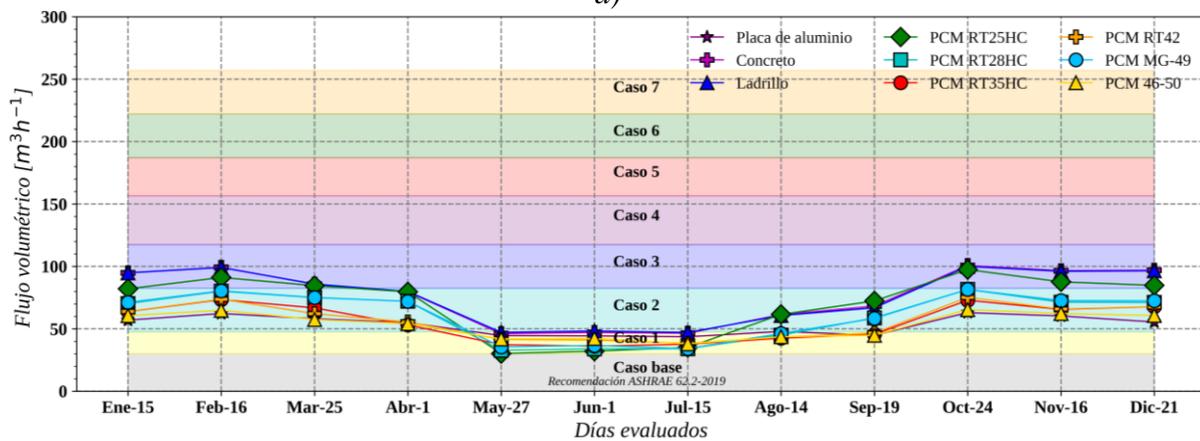
En cuanto a la evaluación de materiales masivos, para la ChSo-OC, Figs. C.6(a, b), los flujos de aire más altos fueron de 103.03 y 100.67 m^3h^{-1} para el día cálido de agosto y el día frío de octubre respectivamente; la orientación en cada desempeño máximo presentado fue Este para el día cálido y Sur para el día frío. En ambos casos, el mejor desempeño se obtuvo a través del uso de un PCM RT25 HC, sin embargo, las evaluaciones de concreto también sobresalieron a lo largo del año bajo las condiciones de Toluca. De nueva cuenta, el uso de materiales de cambio de fase en la ChSo-OC fue predominante por sobre la configuración de ladrillo, concreto y placa metálica. La capacidad máxima de ventilación cubrió la ventilación total requerida por el Caso 3 mientras que el desempeño mínimo en los días cálidos fue suficiente para cubrir la ventilación total del Caso 1, en contraste con la evaluación de los días fríos en los que solo los elementos masivos fueron capaces de satisfacer la ventilación requerida del Caso base.

La ChSo-TC, Figs. C.6(a,b) presentó un comportamiento similar al observado en el análisis de las condiciones de la Ciudad de México, y es que los flujos de aire más altos se registraron bajos las configuraciones de concreto como parte de la pared absorbente. Los valores más altos registrados fueron de 185.93 y 183.50 m^3h^{-1} para el día frío de mayo y el día cálido de junio respectivamente; en ambos casos se analizó la orientación Este-Oeste. Estos valores de flujo volumétrico suponen un aumento de poco más del 80% entre ambos modelos de chimenea solar. El PCM con el desempeño más alto fue el RT25 HC con un flujo de aire

promedio de hasta $132.56 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ obtenido en el día cálido del mes de agosto. Tanto para los días cálidos como fríos, la ChSo-TC con materiales masivos fue capaz de proveer ventilación suficiente para el Caso 2 con su desempeño mínimo.



a)



b)

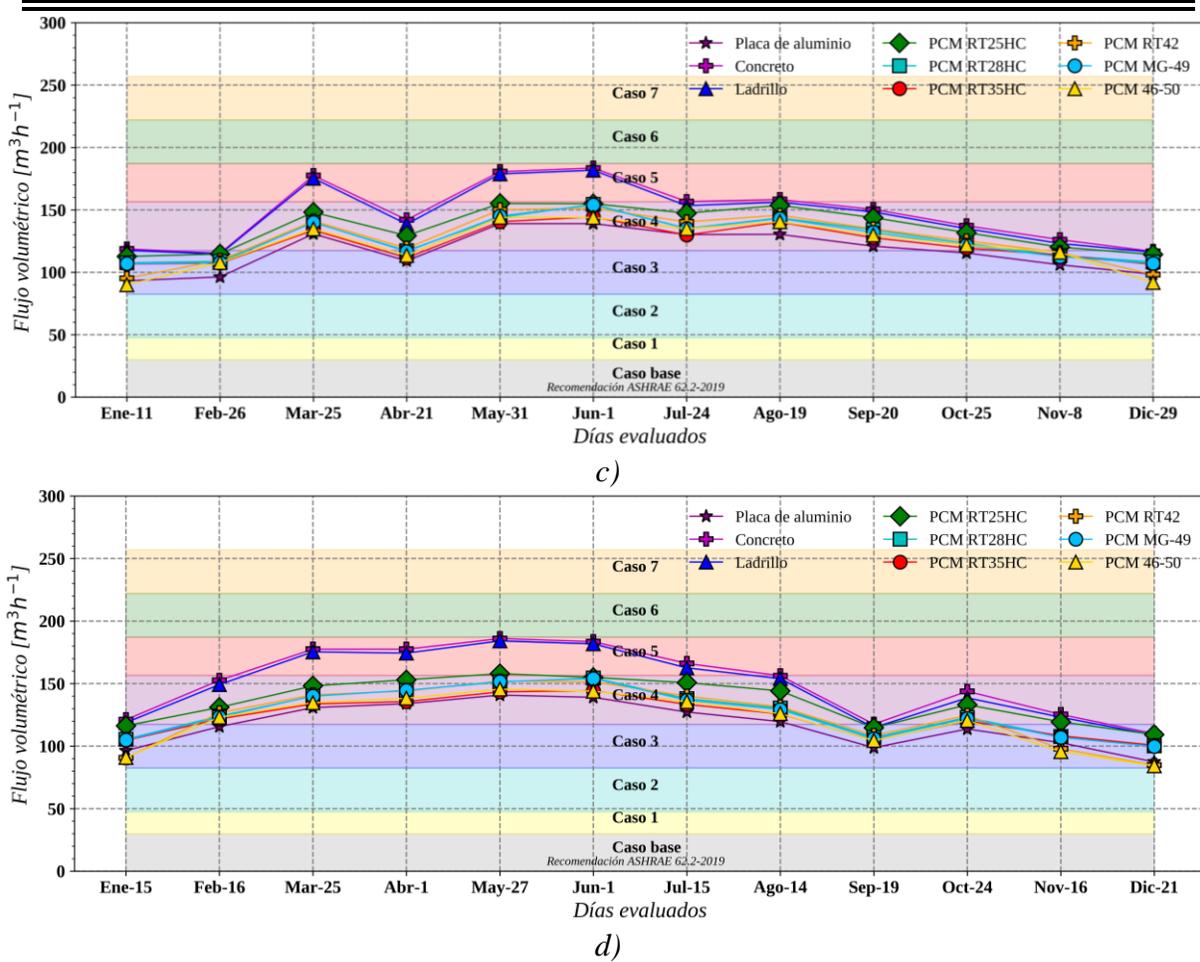


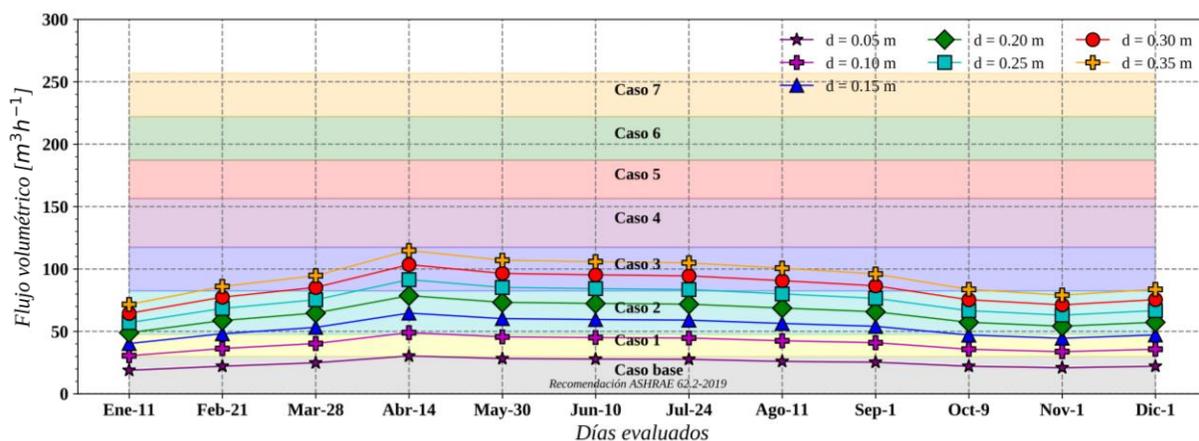
Figura C.6. Flujo volumétrico-material de pared absorbente-Toluca: a) orientación Este-día cálido ChSo-OC; b) orientación Sur-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC

C.4. Villahermosa, Tabasco

El estado de Tabasco es reconocido por ser uno de los estados con mayor humedad de todo el territorio nacional al igual que el estado de Chiapas. Sin embargo, comúnmente en los estudios de sistemas pasivos no se considera a la humedad del aire como un parámetro a incluir en los modelos teóricos. Por tal motivo, los actuales modelos propuestos de ChSo-OC y ChSo-TC consideran la presión atmosférica y la humedad relativa para la estimación de la densidad del aire en el cálculo del flujo másico. En el Anexo C se muestra el comportamiento anual de las condiciones climáticas de Villahermosa. En las Figs. C.7 y C.8 se presentan los resultados del estudio paramétrico del espesor del canal y el efecto de los materiales masivos en la pared absorbente.

Las Figs. C.7(a, b) muestran que los flujos de aire promedio más altos obtenidos a través de la ChSo-OC fueron de 114.81 y 108.24 m^3h^{-1} para el día cálido de abril y el día frío de junio respectivamente; las orientaciones en ambos desempeños fueron Este y Oeste respectivamente. Por lo tanto, los desempeños más altos de la ChSo-OC se presentaron durante los meses de abril-julio (primavera-verano) con lo que se cubrió la ventilación total requerida por al Caso 2. Solo durante los meses de enero y noviembre se registraron los desempeños más bajos de la ChSo-OC y solo las configuraciones con $d \geq 0.10$ m fueron capaces de cubrir la ventilación requerida por el Caso base.

En cuanto al comportamiento de la ChSo-TC, se estimaron que los flujos de aire más altos fueron de 230.44 y 229.60 m^3h^{-1} para el día frío de junio y el día cálido de mayo respectivamente; en ambos casos la orientación Este-Oeste indujo el desempeño máximo de la ChSo-TC. La ChSo-TC fácilmente duplicó el flujo promedio más alto obtenido por la ChSo-OC y, de igual manera, los flujos más altos se presenciaron en los meses de abril-junio. Aunque los flujos de aire inducidos por la ChSo-TC bajo las condiciones de Villahermosa fueron menores a los estimados para ciudades como Hermosillo o Ciudad de México, la capacidad máxima de ventilación fue suficiente para cubrir la ventilación total del Caso 6 en los meses con mejor desempeño. La configuración con menor espesor evaluado, $d = 0.05$ m, fue capaz de inducir una ventilación natural suficiente para el Caso base a lo largo de todo el año.



a)

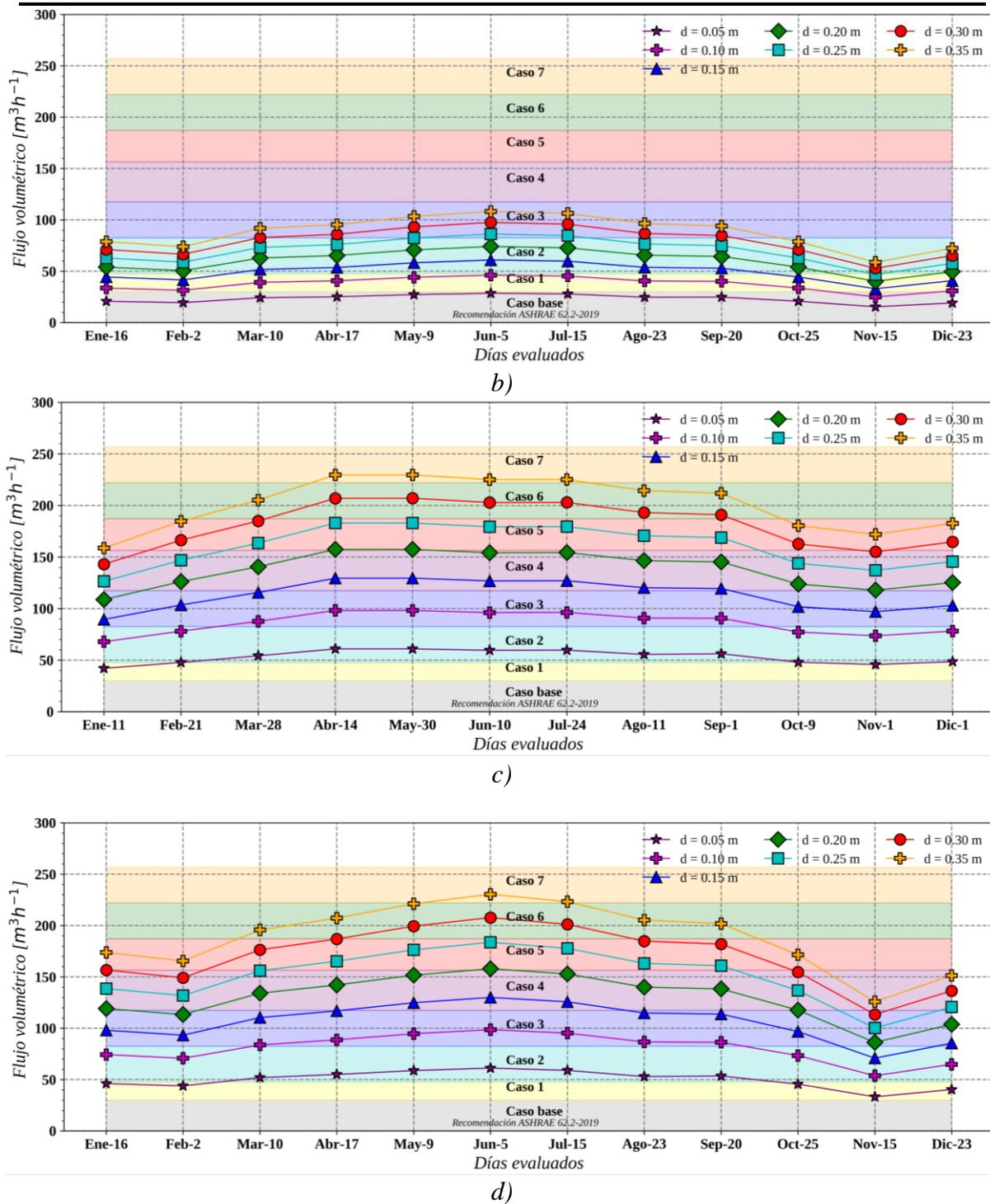
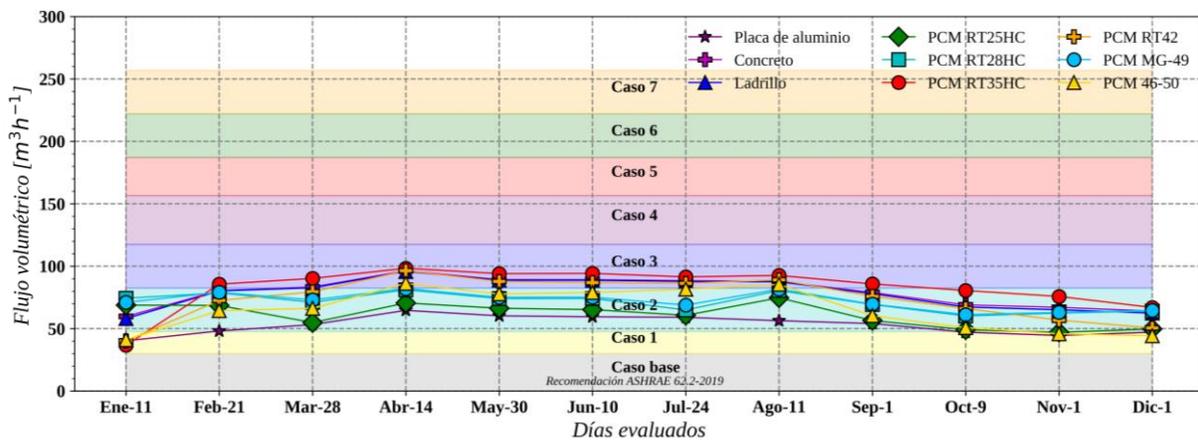


Figura C.7. Flujo volumétrico-Espesor del canal-Villahermosa: a) orientación Este-día cálido ChSo-OC; b) orientación Oeste-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC

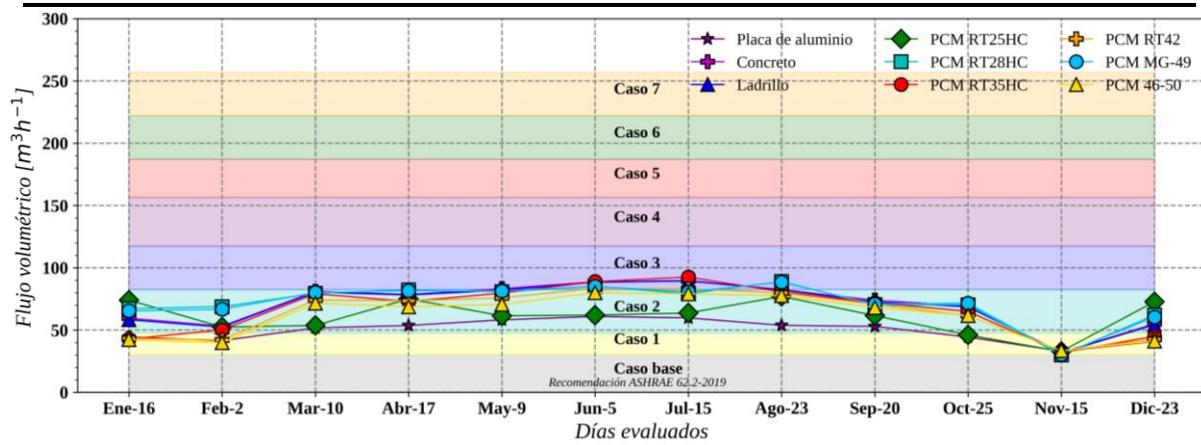
El estudio paramétrico de la ChSo-OC con materiales masivos, Figs. C.8(a, b), reveló que los flujos de aire promedio más altos fueron de 98.28 y 92.53 m³h⁻¹ para el día cálido de abril

y el día frío de julio, respectivamente; las orientaciones de ambos desempeños fueron Este y Oeste y en ambos casos el PCM RT35 HC fue el que presentó mejor desempeño con la ChSo-OC. Otros materiales como el RT28 HC, RT25 HC y el concreto presentaron comportamientos con elevados flujos de aire con la ChSo-OC. La ventilación mínima inducida por esta configuración de chimenea solar fue suficiente para satisfacer los requerimientos del Caso base durante todo el año con o sin PCM.

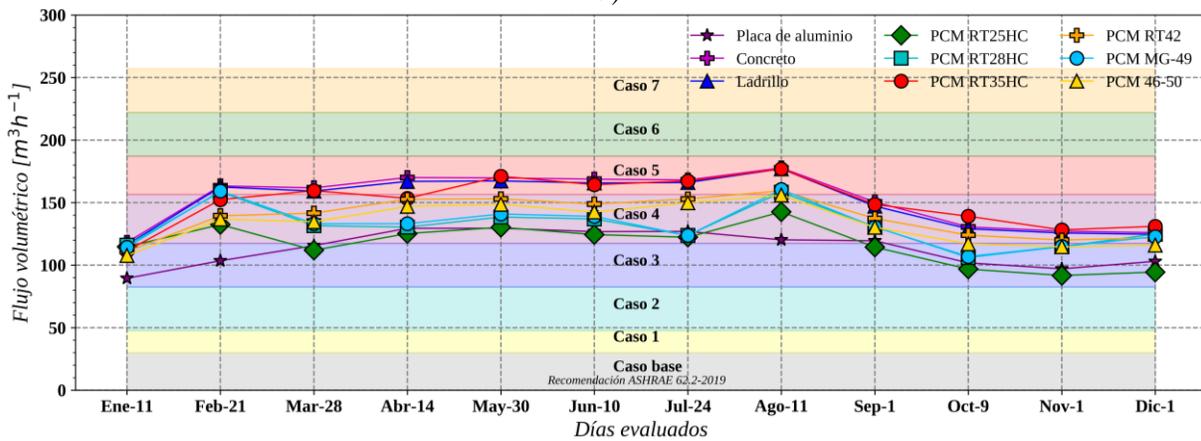
En contraste, el desempeño de la ChSo-TC, Figs. C.8(c,d), superó nuevamente el desempeño de la ChSo-OC, de tal forma que los flujos de aire promedio más altos fueron de 177.72 y 175.91 m^3h^{-1} para el día cálido y frío de agosto, respectivamente; esto representa un aumento de hasta 80% de flujo de aire inducido por la ChSo-TC. La orientación con mejor desempeño para este estudio paramétrico de los materiales masivos fue la Este-Oeste. Los flujos de aire promedio más altos se obtuvieron empleando concreto y un PCM RT28HC, por lo que, a diferencia de lo observado para ciudades como Toluca o Ciudad de México, la ChSo-TC presenta mejores desempeños con materiales de cambio de fase además del concreto bajo las condiciones de Villahermosa. Otro de los materiales de cambio de fase que permitió flujos de aire promedio elevados fue el RT35 HC. La capacidad de ventilación mínima inducida en el estudio paramétrico de materiales de la pared absorbente fue suficiente para cubrir el Caso 1 y Caso 2 durante la mayor parte del año.



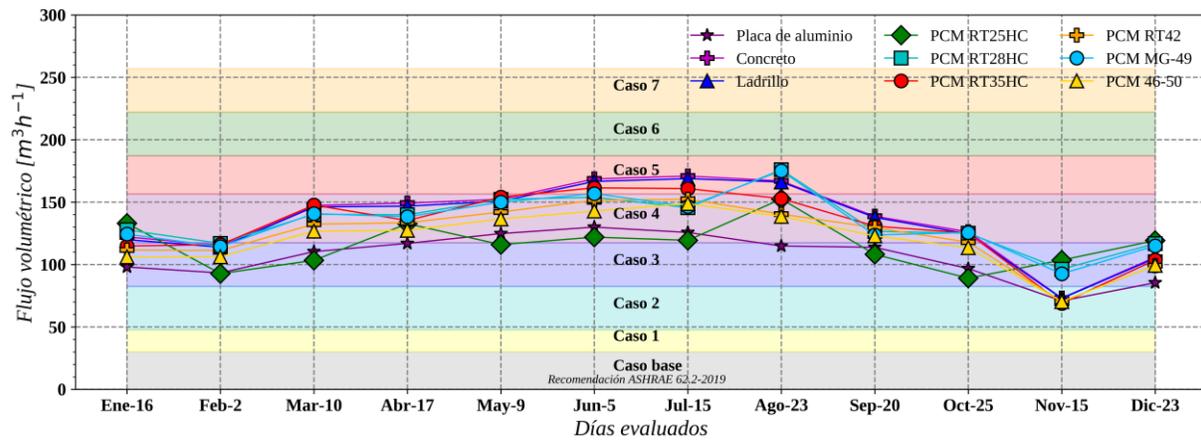
a)



b)



c)



d)

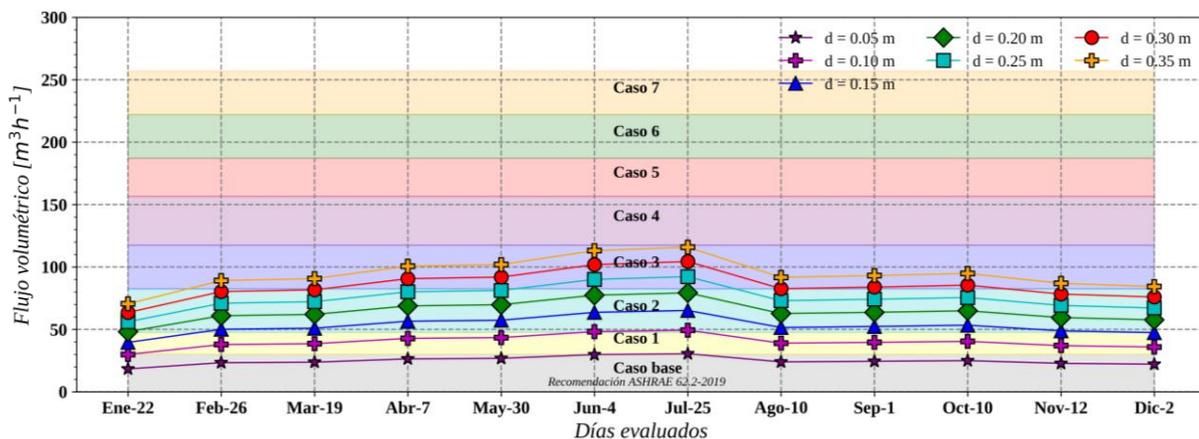
Figura C.8. Flujo volumétrico-material de pared absorbente-Villahermosa: a) orientación Este-día cálido ChSo-OC; b) orientación Oeste-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC

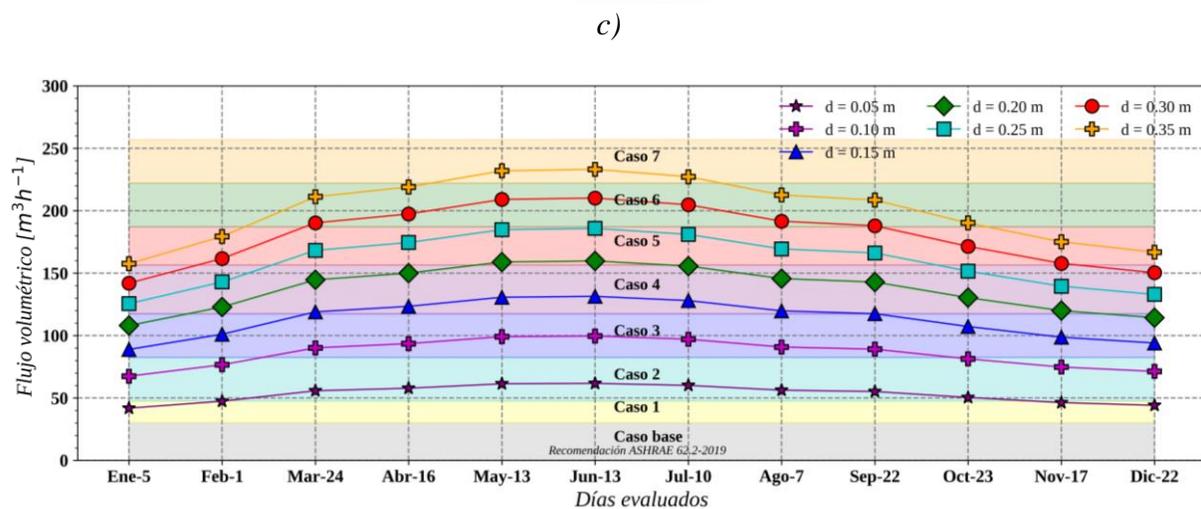
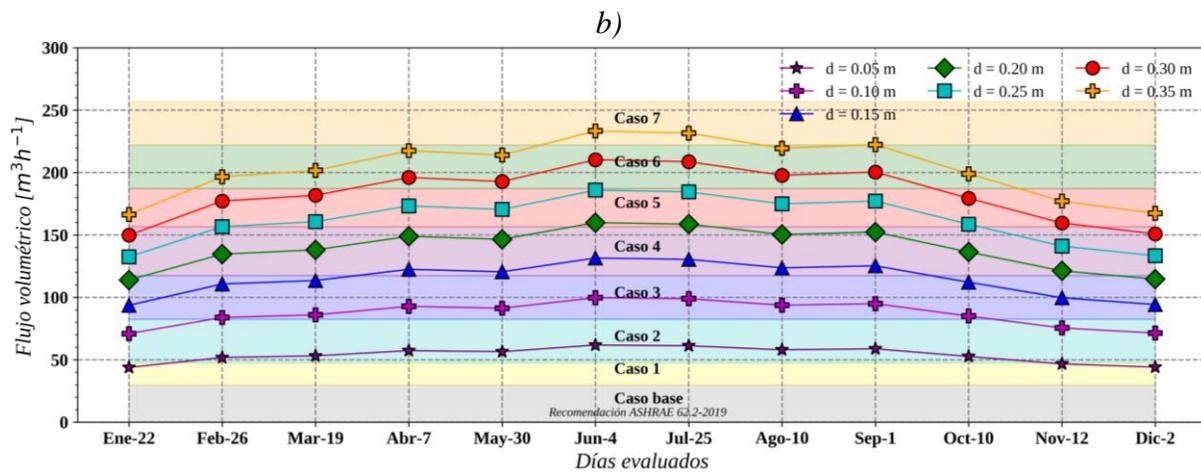
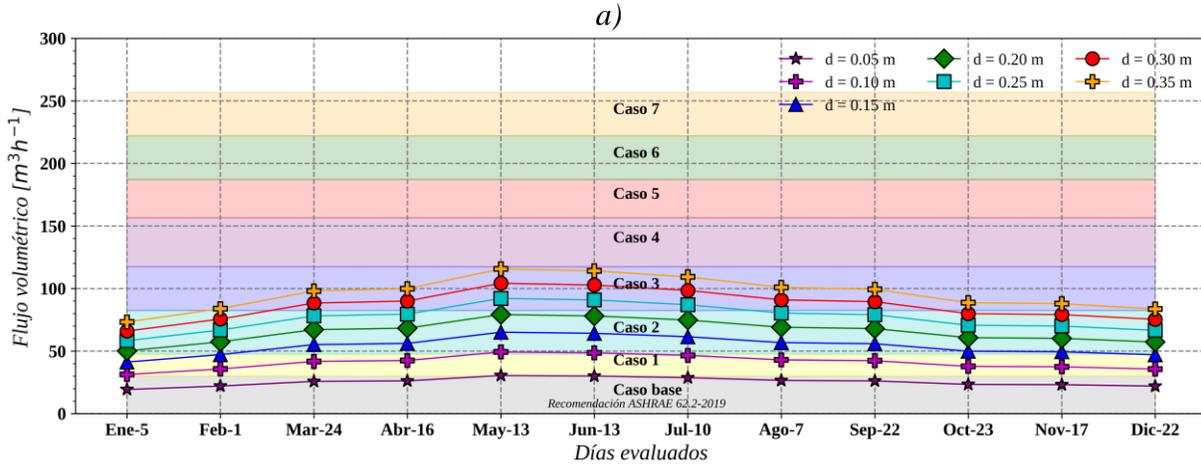
C.5. Mérida, Yucatán

La ciudad de Mérida es reconocida como una ciudad de clima cálido. La temperatura máxima anual de acuerdo con los datos de un año de la CONAGUA es de 41.63°C con una mínima de 10.21°C . En el Anexo C se muestra el comportamiento anual de las condiciones climáticas de esta ciudad. En las Figs. C.9 y C.10 se muestran los resultados del estudio paramétrico del espesor del canal y el material de la pared absorbente.

Las Figs. C.9(a, b) muestran que la ChSo-OC generó flujos de aire promedio de hasta 115.84 y $115.66 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ para el día cálido de julio y día frío de mayo, respectivamente. La orientación Este permitió obtener los flujos de aire más altos del estudio paramétrico del espesor del canal, aunque esto solo fue suficiente para cubrir la ventilación total requerida del Caso 2. Las configuraciones de $d \geq 0.10 \text{ m}$ permitieron obtener flujos de aire superiores a los $30.06 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ necesarios del caso base.

Por otro lado, la ChSo-TC, Figs. C.9(c, d), generó flujos de aire promedio de hasta 233.31 y $233.17 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ para el día cálido y frío de junio respectivamente. En ambos casos, el flujo de aire duplicó el obtenido por la ChSo-OC, a través de la orientación Este-Oeste. Al igual que los casos analizados en ciudades donde la orientación Este-Oeste presentó mejores desempeños, bajo las condiciones climáticas de Mérida la ChSo-TC cubrió la ventilación total requerida por el Caso 6 durante los meses de mayo-septiembre (primavera-verano). En cuanto al efecto mínimo de ventilación, las configuraciones de placa metálica indujeron la ventilación necesaria para el Caso base durante todo el año. Esto describe la ventaja superior en cuanto al aprovechamiento de energía de la ChSo-TC respecto a la ChSo-OC.





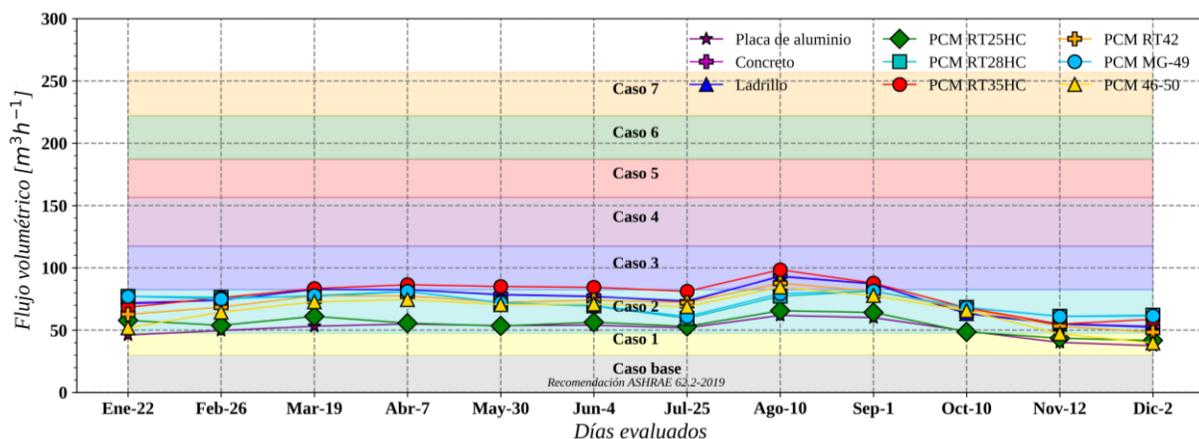
d)

Figura C.9. Flujo volumétrico-Espesor del canal-Mérida: a) orientación Este-día cálido ChSo-OC; b) orientación Este-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC

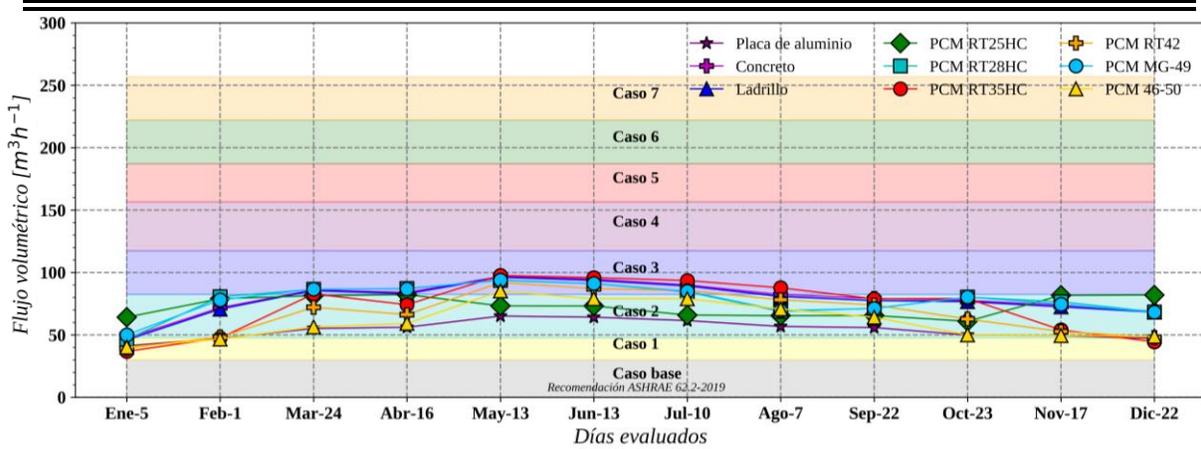
En cuanto a la evaluación de los materiales masivos en la ChSo-OC, las Figs. C.10(a, b) muestran que los flujos de aire promedio más altos fueron de 98.48 y 97.67 $m^3 h^{-1}$ para el día

cálido de agosto y el día frío de verano, en las orientaciones Oeste y Este respectivamente. En ambos casos, el PCM RT35 HC fue el que permitió obtener los mayores flujos de aire, solo por detrás de las configuraciones de concreto, RT25HC y RT28HC. A pesar de que el uso de materiales de cambio de fase mejoró el desempeño de la ChSo-OC, los flujos de aire fueron apenas suficientes para cubrir la ventilación total del Caso 2, sin embargo, el flujo de aire mínimo siempre fue superior al del Caso base, lo que asegura un recurso de ventilación constante a lo largo del año con el uso materiales de cambio de fase en la ChSo-OC.

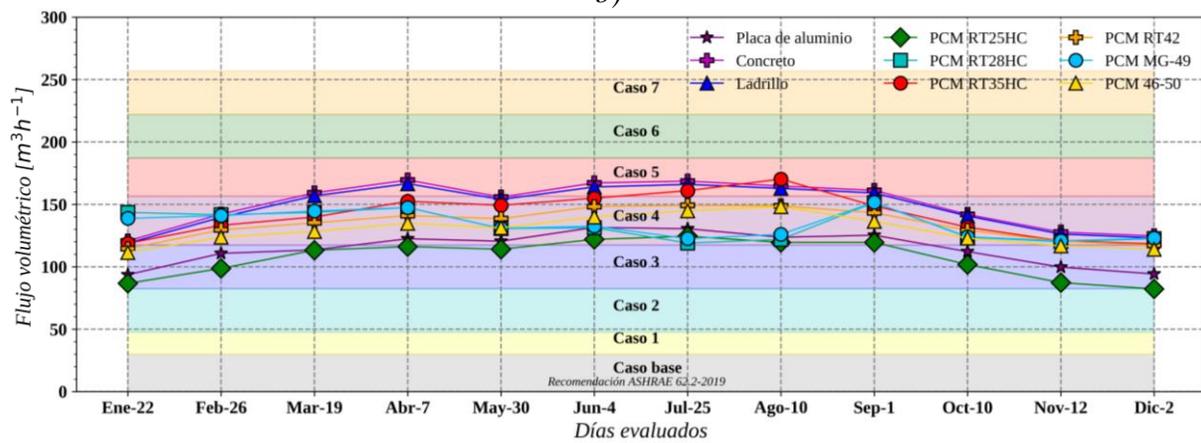
La ChSo-TC con materiales masivos, Figs. C.10(c, d), generó flujos de aire de hasta 171.27 y 170.25 m^3h^{-1} para el día frío de mayo y el día cálido de agosto, respectivamente; en ambos casos la orientación fue Este-Oeste, sin embargo, los materiales con mejor desempeño fueron el concreto y el PCM RT35HC. Otros PCM que también sobresalieron en el estudio paramétrico bajo las condiciones de Mérida fueron el RT28HC y el RT25HC. Aunque la capacidad de ventilación de la ChSo-TC no duplicó el desempeño obtenido por la ChSo-TC como en casos anteriores, se presentó un incremento de 73% del flujo de aire inducido. La capacidad mínima de ventilación de la ChSo-TC al emplear materiales masivos fue superior a la ventilación total requerida del Caso 2 durante todo el año. Sin embargo, aún debe optimizarse el uso de materiales masivos con el diseño de las chimeneas solares para aumentar la capacidad de ventilación natural que estos sistemas pueden proveer bajo las condiciones climáticas de México.



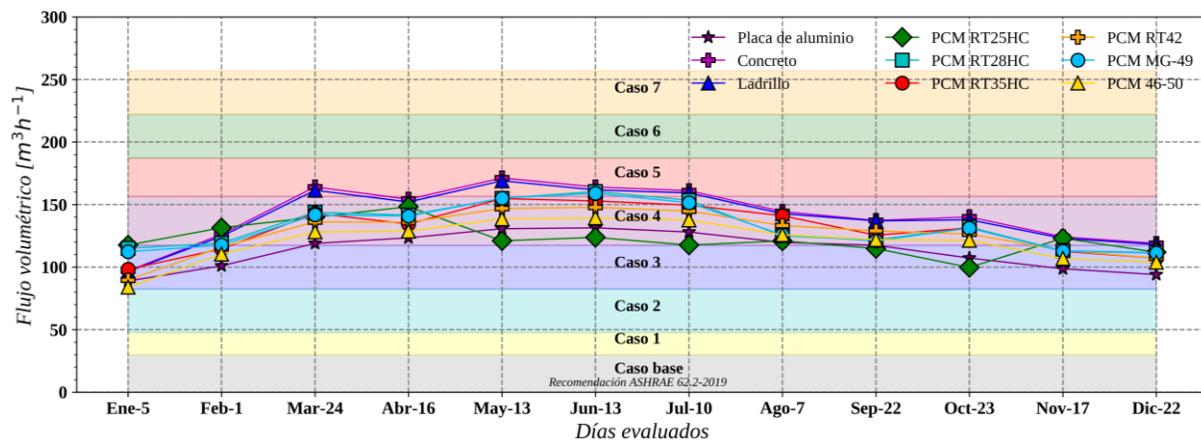
a)



b)



c)



d)

Figura C.10. Flujo volumétrico-material de pared absorbente-Mérida: a) orientación Oeste-día cálido ChSo-OC; b) orientación Este-día frío ChSo-OC; c) orientación Este-Oeste-día cálido ChSo-TC; d) orientación Este-Oeste-día frío ChSo-TC

ANEXO D

REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE

Debido a la cantidad de información obtenida se planteó implementar modelos de regresión lineal para los diferentes parámetros evaluados. A continuación, se presenta el desarrollo teórico de los modelos de regresión lineal.

Regresión por mínimos cuadrados

En ingeniería, el estudio de fenómenos físicos requiere de realizar múltiples cálculos de acuerdo con los posibles escenarios que pueden ocurrir para determinado sistema. Sin embargo, la cantidad de configuraciones es demasiada para realizar múltiples evaluaciones del mismo fenómeno, por este motivo a partir de unos cuantos casos o resultados obtenidos, se contempla realizar un ajuste de curvas o un análisis de la tendencia. El objetivo es obtener una función dependiente de los parámetros o condiciones del sistema para obtener el resultado deseado. Esta función es continua en el intervalo o límites evaluados, permitiendo estimar todos los resultados posibles en dicho espacio de valores continuos.

Una de las técnicas más populares para realizar ajuste es llamada “regresión por mínimos cuadrados”. Esta técnica requiere de un conjunto de observaciones definidas por puntos: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots (x_n, y_n)$. El ejemplo más común es emplear esta técnica para ajustar una línea recta a un conjunto de datos u observaciones definidas por puntos:

$$y = a_0 + a_1x + e \tag{D.1}$$

En el que a_0 y a_1 son los coeficientes que representan la intersección con el eje y y la pendiente respectivamente. El parámetro e es el error o diferencia entre el modelo y las observaciones.

RMSE y R^2

A partir de este punto se refiere al término e como *RMSE* (Root Mean Square Error o raíz del error cuadrático medio). El *RMSE* permite conocer que tan bien coinciden los datos reales

con los predichos por el modelo de ajuste. La expresión matemática para realizar el cálculo del $RMSE$ del modelo de regresión se muestra en la Ec. (D.2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\underbrace{y_i}_{\text{dato real}} - \underbrace{(a_0 + a_1 x_i)}_{\text{dato modelo}} \right)^2}{N}} \quad (D.2)$$

Entre más pequeño sea el valor del $RMSE$ mejor serán los resultados predichos por el modelo obtenido. Otro parámetro importante para verificar que el modelo de regresión obtenido se ajusta a los datos reales es el R^2 . R^2 representa la proporción de la diferencia o varianza en términos estadísticos para que una variable dependiente sea obtenida a partir de una o más variables independientes. Usualmente, este parámetro se estima a partir de dos términos conocidos como S_t que indica la suma total de los cuadrados alrededor de la media para la variable dependiente (y en este caso) y S_r que indica la suma de los cuadrados de los residuos alrededor de la línea de regresión. La diferencia entre ambos términos debe normalizarse a S_t por lo que se obtiene:

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (D.3)$$

R^2 también se conoce como *coeficiente de determinación* mientras que R es el *coeficiente de correlación*. El término R se expresa matemáticamente como:

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2} \sqrt{N \sum_{i=1}^N y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2}} \quad (D.4)$$

En un ajuste perfecto, $S_r = 0$ y $r = r^2 = 1$, la línea explica el 100% de la variabilidad de los datos. $r = r^2 = 0$, $S_r = S_t$ el ajuste no presenta alguna mejora.

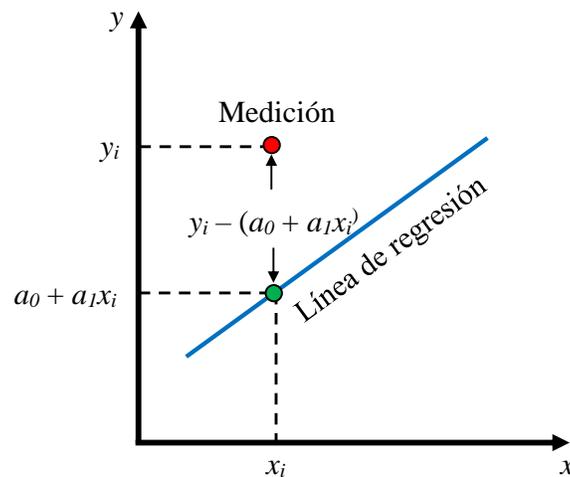


Figura D.1. Diferencia entre modelo de regresión lineal con la medición

Regresión lineal múltiple

Los parámetros evaluados para los modelos de ChSo-OC y ChSo-TC son: altura del canal, espesor del canal, pintura de placa absorbente, tipo de material de muro absorbente, cubierta de vidrio, orientación de la chimenea solar y diferentes condiciones climáticas de la República Mexicana. La orientación y las condiciones climáticas quedan descartadas para el análisis de regresión lineal, por lo que se obtuvieron funciones para cada orientación, día evaluado y condición climática. El tipo de material del muro absorbente fue descartado también del análisis, ya que las propiedades de los materiales no son variables en un espacio continuo. Además, se tendría que considerar los cambios de cada una de las propiedades por separado (conductividad térmica, calor específico, densidad, entalpía de cambio de fase) y se tornaría una discusión entre elegir que propiedad y en que etapa del cambio de fase se debería tomar en cuenta para el análisis. En cambio, la cubierta de vidrio puede considerarse dentro del análisis tomando como variable independiente el espesor, ya que las propiedades ópticas y térmicas no presentan variaciones significativas como se observó en los resultados del estudio paramétrico.

Por lo tanto, las variables incluidas en la regresión lineal multivariable son: la altura del canal (longitud [m]), espesor del canal (longitud [m]), pintura de placa absorbente (absortancia [-]), y espesor de la cubierta de vidrio (longitud [m]). En la Tabla D.1 se presentan los parámetros evaluados en el estudio para ambos modelos de chimenea solar.

Tabla D.1. Parámetros empleados para regresión lineal múltiple

Altura de canal [m]	Espesor del canal [m]	Espesor de cubierta de vidrio [m]	Absortancia de pintura en placa absorbente [-]
1.0	0.05	0.003	0.97 (negro)
1.5	0.10	0.006	0.75 (gris)
2.0	0.15	0.008	0.30 (blanco)
2.5	0.20		
3.0	0.25		
3.5	0.30		
4.0	0.35		

La forma de la función lineal multivariable para los casos de estudio se expresa como:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 \quad (D.5)$$

β corresponde a los coeficientes obtenidos del ajuste y x_i a las variables independientes. Las funciones obtenidas para ambos modelos de chimenea solar son del mismo tipo como se muestra en la Ec. (D.5). Los ajustes se realizaron para obtener los valores promedio de flujo másico, flujo volumétrico y ACH. Los datos empleados para obtener los ajustes corresponden a los resultados de todo el estudio paramétrico.

Las funciones se obtuvieron para cada ciudad, orientación, mes y día (cálido y frío) evaluados tomando en cuenta la placa metálica como pared absorbente. Por lo que, para el modelo de ChSo-OC se obtuvieron 96 relaciones por ciudad (576 por las seis ciudades). Mientras que para el modelo de ChSo-TC se obtuvieron 48 relaciones por ciudad (288 por las seis ciudades). Para la realización de esta tarea se realizó un código de cómputo en lenguaje de programación Python (Python 3.8) empleando las librerías de “Scikit-Learn 1.0.1” para modelos regresión lineal.

En la Fig. D.2 se muestra un diagrama general del proceso realizado para la obtención de las funciones.

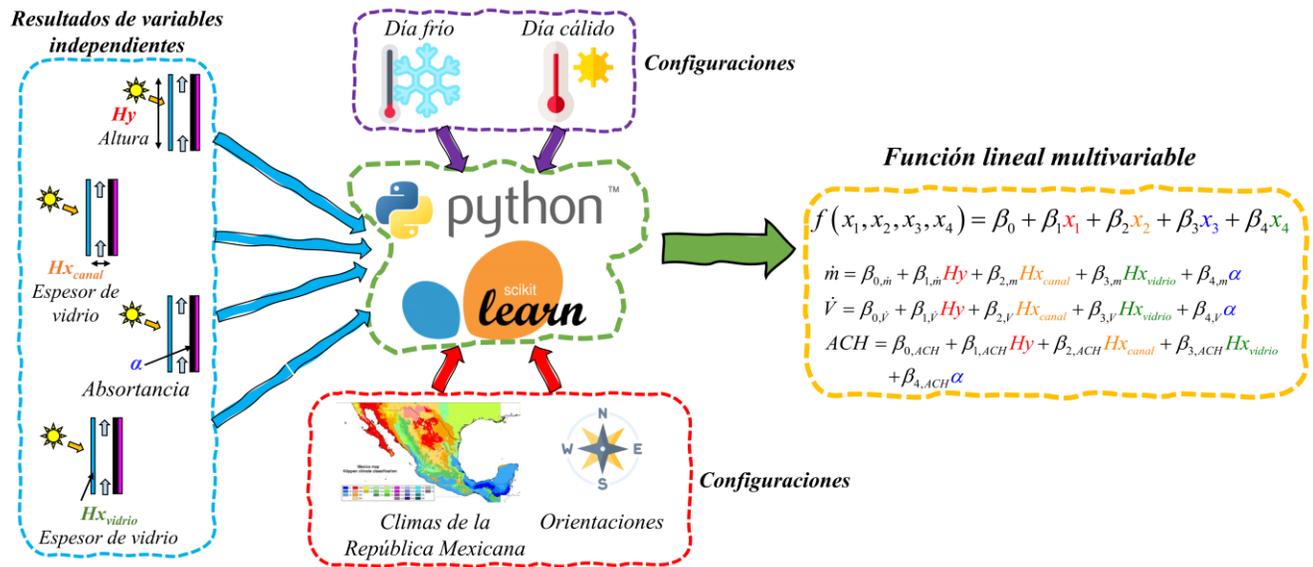


Figura D.2. Diagrama general

Debido a la notable cantidad de información generada de las funciones obtenidas, a continuación, se presentan las funciones para determinar el flujo volumétrico para los casos de cada ciudad evaluada considerando la orientación Oeste para los casos de la ChSo-OC y la orientación Este-Oeste para la ChSo-TC.

**Tabla D.2. Funciones para flujo volumétrico en ChSo-OC (Hermosillo, Sonora):
Orientación Oeste**

Día	Mes	$\dot{V} = \beta_{0,\dot{V}} + \beta_{1,\dot{V}}Hy + \beta_{2,\dot{V}}Hx_{canal} + \beta_{3,\dot{V}}Hx_{vidrio} + \beta_{4,\dot{V}}\alpha$				
		$\beta_{0,\dot{V}}$	$\beta_{1,\dot{V}}$	$\beta_{2,\dot{V}}$	$\beta_{3,\dot{V}}$	$\beta_{4,\dot{V}}$
		$\left\{ \begin{array}{l} 1.0 \leq Hy \leq 4.0 \\ 0.05 \leq Hx_{canal} \leq 0.35 \\ 0.003 \leq Hx_{vidrio} \leq 0.008 \\ 0.30 \leq \alpha \leq 0.97 \end{array} \right.$				
Cálido	Ene	-0.0299004754847630	0.0119989080364011	0.1741776517925820	0.1533240550258780	0.0199813528290058
	Feb	-0.0315324615538522	0.0129210320475472	0.1857086061897570	0.1531953220865890	0.0208669489125427
	Mar	-0.0346712233961194	0.0144236569069206	0.2075537119263490	0.1847351553314660	0.0227769566156419
	Abr	-0.0349826927053695	0.0146565690904421	0.2122102623329920	0.1810574481592060	0.0229586068818374
	May	-0.0350534627091103	0.0147272648199043	0.2129189339133280	0.1989246839772930	0.0229082618798631
	Jun	-0.0336164922167450	0.0140797482086435	0.2040071963721480	0.1853939042440440	0.0220391088019242
	Jul	-0.0343956303844677	0.0145445870186416	0.2093252987578440	0.1685301790328480	0.0224529048819792
	Ago	-0.0344883137419517	0.0145088410854547	0.2088341251402600	0.1652552603514790	0.0226131826417062
	Sep	-0.0338505217427565	0.0141482673293323	0.2034569590076080	0.1472496895232150	0.0223029721483580
	Oct	-0.0329545760300399	0.0136052170863965	0.1964213137211070	0.1644764373760760	0.0217635212660869
	Nov	-0.0313284900442558	0.0126199550559385	0.1812309791308130	0.1338685202999650	0.0209587745263732
	Dic	-0.0294090873772568	0.0115417076262948	0.1668919334058040	0.1095507045431370	0.0199705046452153
Frío	Ene	-0.0308285682887145	0.0120776526690464	0.1739679552618920	0.1418082927163880	0.0209031799372617
	Feb	-0.0335397570903466	0.0135544105762373	0.1945823914766580	0.1571658851815890	0.0224140459266049
	Mar	-0.0336010477099771	0.0136904192441310	0.1971276210127380	0.1791877906653030	0.0223097469974029
	Abr	-0.0347022976236617	0.0144132912276442	0.2072111979907270	0.1871629070176090	0.0228088705091613
	May	-0.0358064638749270	0.0148639928456103	0.2132467855989590	0.1707857075018230	0.0236301690355406
	Jun	-0.0344931335614673	0.0144118108424858	0.2090381084248580	0.1915273863361930	0.0226113114039480
	Jul	-0.0345730845982264	0.0145368742760982	0.2100264570466950	0.1780604985451310	0.0226220916232717
	Ago	-0.0356357830881254	0.0149947911243789	0.2150181969580740	0.1905451992144830	0.0233310758776819
	Sep	-0.0333957929838464	0.0139099140911804	0.2003957123403750	0.1966763561565550	0.0218557519260765
	Oct	-0.0331884763498233	0.0133999726922953	0.1928802983515240	0.1578200710981030	0.0222037790691161
	Nov	-0.0300656465949275	0.0118360602771958	0.1711497456291010	0.1301867176782230	0.0203620726731995
	Dic	-0.0245081592550867	0.0115710272518625	0.1662062725186250	0.1460370389107310	0.0146791446819227

**Tabla D.3. Funciones para flujo volumétrico en ChSo-OC (Monterrey, Nuevo León):
Orientación Oeste**

Día	Mes	$\dot{V} = \beta_{0,\dot{V}} + \beta_{1,\dot{V}}Hy + \beta_{2,\dot{V}}Hx_{canal} + \beta_{3,\dot{V}}Hx_{vidrio} + \beta_{4,\dot{V}}\alpha$ $\left\{ \begin{array}{l} 1.0 \leq Hy \leq 4.0 \\ 0.05 \leq Hx_{canal} \leq 0.35 \\ 0.003 \leq Hx_{vidrio} \leq 0.008 \\ 0.30 \leq \alpha \leq 0.97 \end{array} \right.$				
		$\beta_{0,\dot{V}}$	$\beta_{1,\dot{V}}$	$\beta_{2,\dot{V}}$	$\beta_{3,\dot{V}}$	$\beta_{4,\dot{V}}$
Cálido	Ene	-0.0280676544533888	0.0114318331970999	0.1657109033995700	0.1517842335881650	0.0185571307791128
	Feb	-0.0303635924971030	0.0120751558631301	0.1755224157741580	0.1556883228496570	0.0204223485196484
	Mar	-0.0316949276537371	0.0128901660605383	0.1870090891768110	0.1576186910729690	0.0210765429338759
	Abr	-0.0319246917307305	0.0130359563640200	0.1903498493544850	0.1473272729529140	0.0212416792480507
	May	-0.0320796459188828	0.0131034764647259	0.1912027646472580	0.1821290128639490	0.0212642710815245
	Jun	-0.0319004817299984	0.0129908575703185	0.1897382899888980	0.1637565539688350	0.0212361217265491
	Jul	-0.0320774302640715	0.0131072072604893	0.1910246440334640	0.1679118339012530	0.0212883591157622
	Ago	-0.0326128386423314	0.0132957613417689	0.1926490419891170	0.1599058312926460	0.0217023375088188
	Sep	-0.0320495799687532	0.0129660973677946	0.1881769736779460	0.1486749222321340	0.0214469804075145
	Oct	-0.0310574747139458	0.0124351454800527	0.1807005976576690	0.1590267529721720	0.0208248970578780
	Nov	-0.0298296491203931	0.0117737028293100	0.1710175997216700	0.1431655298461890	0.0201425550640595
	Dic	-0.0287404045764702	0.0110367507389821	0.1604532216755350	0.1131180817542020	0.0197378234582038
Frío	Ene	-0.0292333482583739	0.0111513993629547	0.1609259936295460	0.1255206336708320	0.0201246143236277
	Feb	-0.0302864433284544	0.0120816256631128	0.1744419709168420	0.1794730791419730	0.0202173624133229
	Mar	-0.0317589463969734	0.0127438667875964	0.1840563821616770	0.1712325641323070	0.0212307416572884
	Abr	-0.0325555661288450	0.0132797296927105	0.1918275826413900	0.1885132646196390	0.0215507713182711
	May	-0.0323797081565707	0.0131630244966238	0.1910656735376660	0.1782581072576810	0.0215311204691289
	Jun	-0.0316304500488058	0.0128679104338692	0.1876551043386910	0.1714515157213690	0.0210485464343131
	Jul	-0.0329673859952913	0.0133491491177535	0.1936537768918200	0.1550793129642150	0.0220682435123926
	Ago	-0.0333952183064646	0.0136625533565584	0.1975432478512980	0.1512708820091670	0.0222446242485428
	Sep	-0.0315381446047587	0.0125337804120453	0.1811760898347380	0.1304128474215790	0.0213309816099495
	Oct	-0.0297637755008498	0.0082104129015031	0.1192389861578880	0.0565454042455107	0.0233506676220417
	Nov	-0.0304614145307641	0.0117277223245163	0.1684623661023050	0.1238282581188050	0.0208753712319840
	Dic	-0.0309923911626740	0.0091754613624949	0.1317157564820910	0.0545739107112726	0.0238375712502204

Tabla D.4. Funciones para flujo volumétrico en ChSo-OC (CDMX): Orientación Oeste

Día	Mes	$\dot{V} = \beta_{0,\dot{V}} + \beta_{1,\dot{V}}Hy + \beta_{2,\dot{V}}Hx_{canal} + \beta_{3,\dot{V}}Hx_{vidrio} + \beta_{4,\dot{V}}\alpha$ $\left\{ \begin{array}{l} 1.0 \leq Hy \leq 4.0 \\ 0.05 \leq Hx_{canal} \leq 0.35 \\ 0.003 \leq Hx_{vidrio} \leq 0.008 \\ 0.30 \leq \alpha \leq 0.97 \end{array} \right.$				
		$\beta_{0,\dot{V}}$	$\beta_{1,\dot{V}}$	$\beta_{2,\dot{V}}$	$\beta_{3,\dot{V}}$	$\beta_{4,\dot{V}}$
Cálido	Ene	-0.0318781409342835	0.0123926480483639	0.1803099090550670	0.1441333057602910	0.0217224402191065
	Feb	-0.0337106856354153	0.0134583266273533	0.1957301234163890	0.1494442345775550	0.0227039104820237
	Mar	-0.0346122369485729	0.0138651834240179	0.2019878342401780	0.1538473922794180	0.0233052075984377
	Abr	-0.0342384489495056	0.0138099814470426	0.2019592430418540	0.1700899268317580	0.0229525233294970
	May	-0.0334415285016567	0.0134180883586922	0.1978768835869220	0.1909259252811430	0.0223898002968511
	Jun	-0.0335590509323611	0.0135172184977900	0.1985441849779000	0.1730781079437060	0.0224963091829940
	Jul	-0.0344135578164197	0.0137155369005687	0.20053022261485430	0.1679334709227380	0.0232590798235165
	Ago	-0.0349906408291861	0.0142461886481340	0.2068430293384830	0.1744429022637150	0.0233450753512718
	Sep	-0.0338769454907443	0.0135204052438695	0.1968463381529800	0.1242131686627090	0.0229395760899523
	Oct	-0.0336654040327520	0.0132590911315371	0.1932474827439420	0.1169023462823160	0.0229606261314842
	Nov	-0.0329376969167879	0.0128094814289169	0.1863073857177400	0.1113756304553200	0.0225975802891670
	Dic	-0.0322044642919355	0.0124918221882697	0.1818330790255530	0.1368071695703940	0.0219947227651317
Frío	Ene	-0.0319015166239126	0.0124075835839945	0.1804072644113730	0.1266289989883730	0.0218130923211874
	Feb	-0.0324359040081724	0.0127488103035619	0.1857686744641900	0.1202623634397700	0.0221035619551359
	Mar	-0.0341217692155537	0.0136566920144029	0.1991514915726000	0.1658146303210440	0.0229676601866291
	Abr	-0.0353822234307407	0.0142434172625510	0.2075598869112240	0.1425017510804400	0.0238357146119812
	May	-0.0343078074923136	0.0138099984748144	0.2026091276052870	0.1931083465294930	0.0229694906077864
	Jun	-0.0352729443398423	0.0140981369145501	0.2054733691455010	0.0758620505756971	0.0240548095590135
	Jul	-0.0329596687115342	0.0132153213235837	0.1937857846644080	0.1862436357214860	0.0220734711399225
	Ago	-0.0337957327048456	0.0135215626788820	0.1971841982173910	0.1916923321154390	0.0226759878418929
	Sep	-0.0339774529515221	0.0136212467168356	0.1981513243112120	0.1529350435167340	0.0228644142326522
	Oct	-0.0329900281673008	0.0131655494517128	0.1929486373742710	0.1807685850411600	0.0221755787795733
	Nov	-0.0316540085817371	0.0106707842437480	0.1539175567231940	0.0794235047257082	0.0231885166768048
	Dic	-0.0321471546072785	0.0124083988778390	0.1801845602069600	0.1169867348632540	0.0220578804049462

**Tabla D.5. Funciones para flujo volumétrico en ChSo-OC (Toluca, Edo de México):
Orientación Oeste**

Día	Mes	$\dot{V} = \beta_{0,\dot{V}} + \beta_{1,\dot{V}}Hy + \beta_{2,\dot{V}}Hx_{canal} + \beta_{3,\dot{V}}Hx_{vidrio} + \beta_{4,\dot{V}}\alpha$				
		$\beta_{0,\dot{V}}$	$\beta_{1,\dot{V}}$	$\beta_{2,\dot{V}}$	$\beta_{3,\dot{V}}$	$\beta_{4,\dot{V}}$
		$\left\{ \begin{array}{l} 1.0 \leq Hy \leq 4.0 \\ 0.05 \leq Hx_{canal} \leq 0.35 \\ 0.003 \leq Hx_{vidrio} \leq 0.008 \\ 0.30 \leq \alpha \leq 0.97 \end{array} \right.$				
Cálido	Ene	-0.0327960164665755	0.0130459606843449	0.1898830354148770	0.1813928395306000	0.0219530069062447
	Feb	-0.0343940031626217	0.0138779001801165	0.2013104303725930	0.1599496857828410	0.0229822196129628
	Mar	-0.0364571373332502	0.0147244689921804	0.2131869756360890	0.1442674743918050	0.0244747049630264
	Abr	-0.0343400413170475	0.0134366040028882	0.1968797543145960	-0.0061152924187143	0.0239100062207396
	May	-0.0358091123754230	0.0144779309378779	0.2108530236644920	0.1979131567348810	0.0238724758388303
	Jun	-0.0360398231615052	0.0146239920779351	0.2125067779222070	0.1751802139113910	0.0240443461509756
	Jul	-0.0383381831282107	0.0153762271719826	0.2216571288626820	0.1009151431830120	0.0260868810997592
	Ago	-0.0363432911358511	0.0146133497299286	0.2106174972992850	0.1551048831512720	0.0244491821425302
	Sep	-0.0356590218343206	0.0145509192473247	0.2099806210446750	0.2077508177540460	0.0236096873755184
	Oct	-0.0357612099295911	0.0142039101425978	0.2052373871402630	0.1392118485869550	0.0242426501763922
	Nov	-0.0349264166592995	0.0141314645075400	0.2042580736468280	0.1554245002336400	0.0233491741963930
	Dic	-0.0329303790893913	0.0131941324780200	0.1910636104944850	0.2211535584991690	0.0218538239794428
Frío	Ene	-0.0332741578615947	0.0130028195706638	0.188669099923520	0.1652173945081310	0.0225529186713714
	Feb	-0.0344334589806604	0.0136660101976298	0.1978881019762970	0.1577076792780410	0.0232167191898870
	Mar	-0.0364571373332502	0.0147244689921804	0.2131869756360890	0.1442674743918050	0.0244747049630264
	Abr	-0.0382045436901304	0.0157154573156727	0.2263591445852980	0.1906471604797380	0.0253168200592909
	May	-0.0368061770379952	0.0148058185070043	0.2143004707843280	0.1781747520193240	0.0246781726331931
	Jun	-0.0360398231615052	0.0146239920779351	0.2125067779222070	0.1751802139113910	0.0240443461509756
	Jul	-0.0362900141915598	0.0148319822289405	0.2145318222894040	0.2053592943347460	0.0240532695941661
	Ago	-0.0354060106453344	0.0141315828716936	0.2048164001455070	0.0894142942735560	0.0241234600480801
	Sep	-0.0349973624447430	0.0140122468651356	0.2023253257942120	0.1483721055419370	0.0236068268867638
	Oct	-0.0371983738592571	0.0148185186856237	0.2138280439990940	0.1368177142324280	0.0252535582061448
	Nov	-0.0344511544470974	0.0136350466297310	0.1969830377258800	0.1744728074047640	0.0232138429639885
	Dic	-0.0332915763850108	0.0130882495910325	0.1895504959103240	0.1917350535485170	0.0223965708022376

**Tabla D.6. Funciones para flujo volumétrico en ChSo-OC (Villahermosa, Tabasco):
Orientación Oeste**

Día	Mes	$\dot{V} = \beta_{0,\dot{V}} + \beta_{1,\dot{V}}Hy + \beta_{2,\dot{V}}Hx_{canal} + \beta_{3,\dot{V}}Hx_{vidrio} + \beta_{4,\dot{V}}\alpha$ $\left\{ \begin{array}{l} 1.0 \leq Hy \leq 4.0 \\ 0.05 \leq Hx_{canal} \leq 0.35 \\ 0.003 \leq Hx_{vidrio} \leq 0.008 \\ 0.30 \leq \alpha \leq 0.97 \end{array} \right.$				
		$\beta_{0,\dot{V}}$	$\beta_{1,\dot{V}}$	$\beta_{2,\dot{V}}$	$\beta_{3,\dot{V}}$	$\beta_{4,\dot{V}}$
Cálido	Ene	-0.0304996366223676	0.0120265155131770	0.1731051551317700	0.1419124867427910	0.0206155585539823
	Feb	-0.0291953679384492	0.0116938918396519	0.1723874898250900	0.1745456199633140	0.0194581237532451
	Mar	-0.0324346786984646	0.0133237874658611	0.1921133032300390	0.1781438874813170	0.0214279021628834
	Abr	-0.0330484832649523	0.0137227910866551	0.1965639108665500	0.1480073618979410	0.0218101918431953
	May	-0.0328220646475738	0.0136136307688519	0.1950997362599470	0.1403080152910530	0.0216948294433171
	Jun	-0.0318901168216401	0.0131297647420656	0.1894113617063700	0.1698237978537120	0.0210508098423855
	Jul	-0.0322076978676773	0.0131970963864873	0.1905749638648730	0.1694810676816100	0.0213264410044124
	Ago	-0.0301753271894482	0.0121858369605205	0.1792337981766330	0.1816856070288650	0.0200611988566525
	Sep	-0.0335801645732391	0.0137910626799433	0.1974774839422890	0.1630536772775440	0.0223165231564401
	Oct	-0.0330061341599589	0.0134991824338213	0.1925986814810700	0.1193636165335480	0.0220878410827706
	Nov	-0.0315766249876147	0.0127153303237033	0.1819110175227460	0.1371522912540250	0.0211896470105201
	Dic	-0.0311312696212819	0.0122179762714700	0.1746729055718420	0.1232045294361270	0.0211839158805708
Frío	Ene	-0.0301538461776999	0.0116836494399057	0.1682519229704850	0.1088274016251810	0.0206721754541580
	Feb	-0.0304395748439699	0.0118671350424481	0.1709399218530520	0.0951676720282695	0.0208680163493929
	Mar	-0.0328799271421186	0.0133368649571777	0.1910692210003470	0.1496306470792920	0.0219552751406044
	Abr	-0.0336575963826804	0.0137445406253347	0.1971254062533460	0.1795323006170210	0.0223396598087998
	May	-0.0329575470465891	0.0133265740782327	0.1910223122108980	0.1724679451788890	0.0219812210886001
	Jun	-0.0329377707788103	0.0136310767265667	0.1951336244085240	0.1636417719300000	0.0217068771318616
	Jul	-0.0318024105376048	0.0132096304950242	0.1918608763788120	0.1718624760646280	0.0209192166384185
	Ago	-0.0307502308005749	0.0127642542597858	0.1880036854550000	0.2131285561765170	0.0199885179695603
	Sep	-0.0335626041797962	0.0137808146204395	0.1972875747758230	0.1606808691660700	0.0222978375475153
	Oct	-0.0328907082479255	0.0133387550834681	0.1905029794061080	0.1521500490988540	0.0220035188805220
	Nov	-0.0291482020516793	0.0109198293854262	0.1566897224256900	0.1053029998305610	0.0202926682146409
	Dic	-0.0310908345380764	0.0120982848368568	0.1727234197971390	0.1194910805040220	0.0212335737743687

Tabla D.7. Funciones para flujo volumétrico en ChSo-OC (Mérida, Yucatán): Orientación Oeste

Día	Mes	$\dot{V} = \beta_{0,\dot{V}} + \beta_{1,\dot{V}}Hy + \beta_{2,\dot{V}}Hx_{canal} + \beta_{3,\dot{V}}Hx_{vidrio} + \beta_{4,\dot{V}}\alpha$				
		$\beta_{0,\dot{V}}$	$\beta_{1,\dot{V}}$	$\beta_{2,\dot{V}}$	$\beta_{3,\dot{V}}$	$\beta_{4,\dot{V}}$
		$\left\{ \begin{array}{l} 1.0 \leq Hy \leq 4.0 \\ 0.05 \leq Hx_{canal} \leq 0.35 \\ 0.003 \leq Hx_{vidrio} \leq 0.008 \\ 0.30 \leq \alpha \leq 0.97 \end{array} \right.$				
Cálido	Ene	-0.0302207310356323	0.0122535407312027	0.1776085501691690	0.1484735393629380	0.0201173287499692
	Feb	-0.0320946474657719	0.0131086702239621	0.1897884165253350	0.1542177788012540	0.0213399130337507
	Mar	-0.0319702341375192	0.0130471006938699	0.1888070069386980	0.1396516686629670	0.0213063217640908
	Abr	-0.0326778457370746	0.0136306345354096	0.1967486310683820	0.1317682141065110	0.0215484149007482
	May	-0.0326429070855536	0.0140186835215163	0.2029885495008760	0.2840155168583050	0.0207181908455328
	Jun	-0.0327084174512638	0.0137161123467484	0.1968708377531980	0.1476711283394220	0.0214398983652848
	Jul	-0.0321970958809854	0.0134902828021237	0.1942216851640930	0.1779268583920740	0.0210277657513211
	Ago	-0.0344546617828054	0.0142370750577646	0.2045838934347890	0.1475735633909540	0.0228819786778076
	Sep	-0.0339586862768584	0.0140775561254438	0.2018961326830090	0.1641926788324690	0.0224250074247258
	Oct	-0.0320266935817446	0.0130942465469749	0.1878104654697480	0.1559853637667490	0.0212479245154882
	Nov	-0.0298293317286158	0.0119300049785911	0.1728680497859100	0.1625323403477070	0.0199582524082743
	Dic	-0.0287700346177421	0.0114675164107236	0.1667945926786640	0.1522617542071840	0.0192800671922609
Frío	Ene	-0.0303780269978718	0.0110695421830484	0.1573434218304840	0.0802937211209168	0.0214696390505935
	Feb	-0.0306445338971996	0.0122607718818731	0.1765094331044440	0.1428910229505470	0.0205465105684487
	Mar	-0.0325875963689304	0.0133808381179085	0.1928706668933700	0.1613123382655100	0.0215664233470957
	Abr	-0.0329355712835612	0.0134386716988263	0.1941010027025480	0.1859413354440270	0.0218597966995435
	May	-0.0319701270996818	0.0130764791638172	0.1891453630667420	0.1819163148504330	0.0211668515766705
	Jun	-0.0321684846903470	0.0130184397165719	0.1880255400228610	0.1704813458825980	0.0214718139135312
	Jul	-0.0319319781570216	0.0131210541943256	0.1894568276575410	0.1842503664100050	0.0210778664569760
	Ago	-0.0327855533977074	0.0135261381929745	0.1946419533583160	0.1680770883043360	0.0216727320802108
	Sep	-0.0318502562652608	0.0130093765573389	0.1881891941448160	0.1717173026363030	0.0211233748296363
	Oct	-0.0321806343518285	0.0129160242177579	0.1853785278918650	0.1193083633870240	0.0216874444309040
	Nov	-0.0297330129864309	0.0117097695604437	0.1692034098901500	0.1385787330340890	0.0201211511005400
	Dic	-0.0249731430217586	0.0116320837132922	0.1672654085614930	0.1347215120206420	0.0151287972668046

**Tabla D.8. Funciones para flujo volumétrico en ChSo-TC (Hermosillo, Sonora):
Orientación Este-Oeste**

Día	Mes	$\dot{V} = \beta_{0,\dot{V}} + \beta_{1,\dot{V}}Hy + \beta_{2,\dot{V}}Hx_{canal} + \beta_{3,\dot{V}}Hx_{vidrio} + \beta_{4,\dot{V}}\alpha$ $\left\{ \begin{array}{l} 1.0 \leq Hy \leq 4.0 \\ 0.05 \leq Hx_{canal} \leq 0.35 \\ 0.003 \leq Hx_{vidrio} \leq 0.008 \\ 0.30 \leq \alpha \leq 0.97 \end{array} \right.$				
		$\beta_{0,\dot{V}}$	$\beta_{1,\dot{V}}$	$\beta_{2,\dot{V}}$	$\beta_{3,\dot{V}}$	$\beta_{4,\dot{V}}$
Cálido	Ene	-0.0564453885284913	0.0219719636160091	0.3153270647315180	0.2388693539549070	0.0383274214129611
	Feb	-0.0581867869998928	0.0230812934439640	0.3270717915824960	0.1664163115754480	0.0392883124903797
	Mar	-0.0620217422261328	0.0252547700994267	0.3600545581371230	0.3067177055451100	0.0409989071561947
	Abr	-0.0622744474547699	0.0257004961853247	0.3691963904246750	0.3277960754010810	0.0408631185296509
	May	-0.0623768415272914	0.0258379950493324	0.3707490933504660	0.3354088525484750	0.0408198693248248
	Jun	-0.0632800376339206	0.0256589059315194	0.3656039164580500	0.1763816403895390	0.0424777024838660
	Jul	-0.0646798970655903	0.0263692298137494	0.3720997267089220	0.2484713190122420	0.0429830529576437
	Ago	-0.0630253031883832	0.0258124291974325	0.3671882919743240	0.2360297800023090	0.0418624846312915
	Sep	-0.0615234594514205	0.0250715238485740	0.3573946670571680	0.2058753731107840	0.0410365878769524
	Oct	-0.0615106663597164	0.0244920752554503	0.3474761811259310	0.1716745200127980	0.0415932457833332
	Nov	-0.0593549990030122	0.0229403049029834	0.3262721918869760	0.2194230521750960	0.0405435497791026
	Dic	-0.0586891482849603	0.0218330385005100	0.3098378135765280	0.1550016389554440	0.0410283632629218
Frío	Ene	-0.0621215820814826	0.0228535064878278	0.3210373505925630	0.1175668415793610	0.0437457287788579
	Feb	-0.0605894913983839	0.0237092908074913	0.3368849080749120	0.2503181220536960	0.0409968991621393
	Mar	-0.0603649873061380	0.0239739543430269	0.3418824005731260	0.2954563362343310	0.0404124073158931
	Abr	-0.0621925141227260	0.0252842440164934	0.3602910115935050	0.3093158080213190	0.0411133605593391
	May	-0.0640586297308456	0.0259773939457427	0.3695830823145690	0.3075342537982390	0.0424773259300385
	Jun	-0.0627397028555393	0.0259434968136039	0.3673778252788950	0.1749729155653040	0.0415208575243801
	Jul	-0.0631613492260371	0.0260683298742528	0.3681198701710990	0.1750469848545890	0.0418719003213101
	Ago	-0.0633541887925138	0.0261767044203152	0.3726899013460090	0.3009185665719900	0.0416429228271494
	Sep	-0.0608708631136983	0.0247103137252887	0.3517608515386010	0.2745963089933860	0.0403881800949779
	Oct	-0.0635774852822443	0.0245428175705913	0.3455036042773410	0.1427246213562130	0.0437059855614722
	Nov	-0.0609552061966992	0.0229278075039558	0.3236603607538430	0.1138657586294410	0.0424980776553069
	Dic	-0.0597125799627917	0.0222300405628071	0.3138055484852140	0.1330238604747890	0.0417530861607764

**Tabla D.9. Funciones para flujo volumétrico en ChSo-TC (Monterrey, Nuevo León):
Orientación Este-Oeste**

Día	Mes	$\dot{V} = \beta_{0,\dot{V}} + \beta_{1,\dot{V}}Hy + \beta_{2,\dot{V}}Hx_{canal} + \beta_{3,\dot{V}}Hx_{vidrio} + \beta_{4,\dot{V}}\alpha$				
		$\beta_{0,\dot{V}}$	$\beta_{1,\dot{V}}$	$\beta_{2,\dot{V}}$	$\beta_{3,\dot{V}}$	$\beta_{4,\dot{V}}$
		$\left\{ \begin{array}{l} 1.0 \leq Hy \leq 4.0 \\ 0.05 \leq Hx_{canal} \leq 0.35 \\ 0.003 \leq Hx_{vidrio} \leq 0.008 \\ 0.30 \leq \alpha \leq 0.97 \end{array} \right.$				
Cálido	Ene	-0.0584267213619205	0.0225570740908130	0.3206575980509870	0.2295099693858230	0.0397338775202054
	Feb	-0.0622910348397144	0.0242633042669329	0.3441953283836140	0.2418218376916060	0.0423799419845797
	Mar	-0.0625350132735210	0.0246400989552886	0.3495524181243130	0.1981674526907470	0.0424211222807102
	Abr	-0.0620496469084269	0.0247173458669092	0.3532254586690910	0.2121404259129550	0.0418273126663668
	May	-0.0616927384703924	0.0249681746505910	0.3543720322201940	0.3371699625324920	0.0407952083585780
	Jun	-0.0627515523514915	0.0249383174384864	0.3548168886705780	0.2766195016306790	0.0421649667908344
	Jul	-0.0624238192878532	0.0247952359665762	0.3527569310943330	0.2179455265574210	0.0421375800237212
	Ago	-0.0634319684054146	0.0252263560803525	0.3583144179463810	0.2193691228964010	0.0428099664038697
	Sep	-0.0618898483040979	0.0250220504329192	0.3590902186149050	0.3308027756667530	0.0410931902293192
	Oct	-0.0624983705073193	0.0242990169615779	0.3439433124729210	0.1959553555499910	0.0426704003974103
	Nov	-0.0596812521336338	0.0231121343057055	0.3291179144856250	0.2508353058771540	0.0405914849296594
	Dic	-0.0568072634039355	0.0210088082099677	0.2975680820996770	0.0427443251910966	0.0400711735169207
Frío	Ene	-0.0598489193382583	0.0217096083030757	0.3066909401736130	0.2031519429856850	0.0421665825973389
	Feb	-0.0576339466060205	0.0229736336851902	0.3275820511376150	0.3164735963303640	0.0383808639088686
	Mar	-0.0619288738539137	0.0243251657105980	0.3450745142488370	0.2827655440492630	0.0417715877330256
	Abr	-0.0674322422149929	0.0268355823434614	0.3781963948631850	0.2215946558176320	0.0455477392205305
	May	-0.0637231080768680	0.0252272673096972	0.3577081016684000	0.2258799300739880	0.0430432770249249
	Jun	-0.0618015147963675	0.0248015765106372	0.3547660508206570	0.3185786197025220	0.0412006537723209
	Jul	-0.0644534882549270	0.0252922394379326	0.3574298229507530	0.2060484088678860	0.0438298298682027
	Ago	-0.0645601007571065	0.0255735007028527	0.3610950070285260	0.1874920100814200	0.0437473260041564
	Sep	-0.0646161657550442	0.0259930939359252	0.3698709393592510	0.2583493740736280	0.0432974783683219
	Oct	-0.0593470126796662	0.0178034064662449	0.2531426360910200	0.1397264927491030	0.0450953992382396
	Nov	-0.0589139006266908	0.0220164196420239	0.3117710535630960	0.2340115541317180	0.0407858964337356
	Dic	-0.0622557753388564	0.0198548477154535	0.2790301914402490	0.1319566393424100	0.046457722233809

Tabla D.10. Funciones para flujo volumétrico en ChSo-TC (CDMX): Orientación Este-Oeste

Día	Mes	$\dot{V} = \beta_{0,\dot{V}} + \beta_{1,\dot{V}}Hy + \beta_{2,\dot{V}}Hx_{canal} + \beta_{3,\dot{V}}Hx_{vidrio} + \beta_{4,\dot{V}}\alpha$				
		$\beta_{0,\dot{V}}$	$\beta_{1,\dot{V}}$	$\beta_{2,\dot{V}}$	$\beta_{3,\dot{V}}$	$\beta_{4,\dot{V}}$
		$\left\{ \begin{array}{l} 1.0 \leq Hy \leq 4.0 \\ 0.05 \leq Hx_{canal} \leq 0.35 \\ 0.003 \leq Hx_{vidrio} \leq 0.008 \\ 0.30 \leq \alpha \leq 0.97 \end{array} \right.$				
Cálido	Ene	-0.0623913576876538	0.0234803903659328	0.3337113322307560	0.1562548371033200	0.0433446180950265
	Feb	-0.0645382006749784	0.0254019711154784	0.3664059968690690	0.1880544376763380	0.0439441641654720
	Mar	-0.0652925266085405	0.0252953436550710	0.3612591508364230	0.2053282004619080	0.0446900383707075
	Abr	-0.0663140566393423	0.0258420984019498	0.3683769840194970	0.2308982196343320	0.0452709279795559
	May	-0.0657861483539270	0.0256963032056865	0.3672916034854360	0.2521321377987720	0.0446971323924716
	Jun	-0.0660764232172563	0.0255539467160452	0.3652417528747370	0.2537459674215220	0.0451780758661334
	Jul	-0.0634786023584662	0.0255861992760323	0.3683008499031790	0.2949197422038630	0.0423232300927286
	Ago	-0.0667947655331432	0.0263702994078219	0.3746052797925040	0.2316971306515580	0.0452575469602060
	Sep	-0.0682369669048185	0.0272176449750581	0.3903993068934370	0.2100180525551630	0.0461596907625379
	Oct	-0.0603738083711361	0.0238984836996309	0.3455694084248800	0.3123601594467380	0.0404789366517046
	Nov	-0.0624166319326347	0.0241250869897454	0.3469131556117390	0.2280385653964460	0.0426392577445966
	Dic	-0.0605862346467097	0.0233762857844836	0.3369748578448350	0.2357731505365510	0.0413895144944611
Frío	Ene	-0.0621718687224057	0.0233824839103624	0.3322951248179090	0.2123854934904510	0.0430441622177204
	Feb	-0.0599511355332051	0.0232390097908181	0.3350866693367520	0.2446570198089730	0.0408087393375680
	Mar	-0.0652533225989079	0.0258449426866419	0.3722368554378470	0.2914158660918970	0.0439917720420418
	Abr	-0.0675481552873171	0.0261903789825039	0.3728072183964670	0.2682691493720380	0.0460669981751463
	May	-0.0678308397228927	0.0263056578743746	0.3747874358866020	0.2157273210606580	0.0464201139314057
	Jun	-0.0638855074759386	0.0252662338278464	0.3615834811356060	0.2269484701617310	0.0432376456095178
	Jul	-0.0649192917949743	0.0261808583935747	0.3797520125071750	0.3863116600859600	0.0430631583465209
	Ago	-0.0683252821842874	0.0275285771231964	0.3964743426605350	0.3852848623844460	0.0455366353469351
	Sep	-0.0687016768786489	0.0277719222569039	0.3974369368547530	0.3382904032207830	0.0457486457868840
	Oct	-0.0636378806774023	0.0244942230628323	0.3485239449140370	0.1854295327585050	0.0437658285589000
	Nov	-0.0652096662595463	0.0228024983516776	0.3222089835167760	0.1731250808187610	0.0468519744255037
	Dic	-0.0611016710894188	0.0229085043341365	0.3281170433413640	0.2054815410886780	0.0423557883990189

**Tabla D.11. Funciones para flujo volumétrico en ChSo-TC (Toluca, Edo de México):
Orientación Este-Oeste**

Día	Mes	$\dot{V} = \beta_{0,\dot{V}} + \beta_{1,\dot{V}}Hy + \beta_{2,\dot{V}}Hx_{canal} + \beta_{3,\dot{V}}Hx_{vidrio} + \beta_{4,\dot{V}}\alpha$				
		$\beta_{0,\dot{V}}$	$\beta_{1,\dot{V}}$	$\beta_{2,\dot{V}}$	$\beta_{3,\dot{V}}$	$\beta_{4,\dot{V}}$
		$\left\{ \begin{array}{l} 1.0 \leq Hy \leq 4.0 \\ 0.05 \leq Hx_{canal} \leq 0.35 \\ 0.003 \leq Hx_{vidrio} \leq 0.008 \\ 0.30 \leq \alpha \leq 0.97 \end{array} \right.$				
Cálido	Ene	-0.0624249222289187	0.0242675901976234	0.3482741876905190	0.3617463347364540	0.0419658018074790
	Feb	-0.0703746579708854	0.0286146792878971	0.4083290785932560	0.2870130264940700	0.0467848898598153
	Mar	-0.0692587043803555	0.0270472927797585	0.3847289277975850	0.2766176015386150	0.0470057237526245
	Abr	-0.0708321951748256	0.0282302348558850	0.4073989199874210	-0.0722820175466592	0.0489159093733565
	May	-0.0686692933957601	0.0270221238724642	0.3862452387246410	0.3156695048108580	0.0463367586930483
	Jun	-0.0694246468200417	0.0272270402843550	0.3867846885578350	0.3066917639062990	0.0468994563704493
	Jul	-0.0679823574508136	0.0275813571613078	0.3924055716130780	0.3890210192567100	0.0448399793779640
	Ago	-0.0714598030185201	0.0285979362459271	0.4065136481735560	0.2892356068478780	0.0480392269597786
	Sep	-0.0690760538526612	0.0277824616380709	0.3945046163807090	0.4040404593694630	0.0458175461742107
	Oct	-0.0680895643394448	0.0261907921751700	0.3730450646088420	0.1917853131252050	0.0468618832758976
	Nov	-0.0644836950493816	0.0252405641700422	0.3608244988432780	0.2599074949828140	0.0436001933445154
	Dic	-0.0608635142778542	0.0237047323980268	0.3404107525516950	0.4165232593434720	0.0406607144008311
Frío	Ene	-0.0640332765411732	0.0244351694239533	0.3494065513823900	0.3094526023254740	0.0437017253804623
	Feb	-0.0661627199077331	0.0258696239889525	0.3706425256038100	0.3133334388796340	0.0446785316055454
	Mar	-0.0692587043803555	0.0270472927797585	0.3847289277975850	0.2766176015386150	0.0470057237526245
	Abr	-0.0697022721251252	0.0278359020812600	0.3967841636697420	0.3809508041025430	0.0464380928684538
	May	-0.0696336865863317	0.0273956070345008	0.3897109274878650	0.3099285076895600	0.0469830945498979
	Jun	-0.0694246468200417	0.0272270402843550	0.3867846885578350	0.3066917639062990	0.0468994563704493
	Jul	-0.0686366700491988	0.0271182366711107	0.3845103667111060	0.2869753527541940	0.0463605107142716
	Ago	-0.0729416083131788	0.0295404238699895	0.4210293815570370	0.1275728646996830	0.0493552320315171
	Sep	-0.0708862858164699	0.0276800231931076	0.3970470890739330	0.2278119623322010	0.0485562261260374
	Oct	-0.0683542341046314	0.0263025005397488	0.3751130053974870	0.2321305696001430	0.0469682583359892
	Nov	-0.0661702975597922	0.0250975896961426	0.3587987541042820	0.3378678884872490	0.0453464050106515
	Dic	-0.0647249062755056	0.0241510040996799	0.3427363267110830	0.2319351846856370	0.0449024937943426

**Tabla D.12. Funciones para flujo volumétrico en ChSo-TC (Villahermosa, Tabasco):
Orientación Este-Oeste**

Día	Mes	$\dot{V} = \beta_{0,\dot{V}} + \beta_{1,\dot{V}}Hy + \beta_{2,\dot{V}}Hx_{canal} + \beta_{3,\dot{V}}Hx_{vidrio} + \beta_{4,\dot{V}}\alpha$ $\left\{ \begin{array}{l} 1.0 \leq Hy \leq 4.0 \\ 0.05 \leq Hx_{canal} \leq 0.35 \\ 0.003 \leq Hx_{vidrio} \leq 0.008 \\ 0.30 \leq \alpha \leq 0.97 \end{array} \right.$				
		$\beta_{0,\dot{V}}$	$\beta_{1,\dot{V}}$	$\beta_{2,\dot{V}}$	$\beta_{3,\dot{V}}$	$\beta_{4,\dot{V}}$
Cálido	Ene	-0.0592859180987570	0.0228262258354556	0.3211216869259840	0.1256286427049510	0.0407741296178736
	Feb	-0.0549142615172216	0.0220134554843232	0.3213356977003740	0.3167805369968490	0.0363387494848370
	Mar	-0.0620522472167946	0.0248613434250442	0.3532665771075840	0.2549583172528850	0.0415676556706032
	Abr	-0.0631301951982677	0.0256899953730482	0.3624765251590530	0.2109468580956000	0.0420593927392990
	May	-0.0615811652923362	0.0253663353605792	0.3589090678915050	0.2766174389961570	0.0404919154172472
	Jun	-0.0604956025571860	0.0246218847621183	0.3520965619068970	0.3619028012460750	0.0398318849875060
	Jul	-0.0637303524983780	0.0258217068830958	0.3638004974023860	0.1907393429975100	0.0426457514279346
	Ago	-0.0555606104474271	0.0225016323014936	0.3290511801577930	0.3367963118029770	0.0365245057321641
	Sep	-0.0636055378603102	0.0252392485382469	0.3552364853824680	0.2154991401452100	0.0430030404230861
	Oct	-0.0638973282235393	0.0252775964679260	0.3552748218221160	0.1696533844942750	0.0434151288420478
	Nov	-0.0611805311954168	0.0242695713991360	0.3408568568485020	0.1665335961304160	0.0413975425751793
	Dic	-0.0618873602051832	0.0236931990490835	0.3332154190622630	0.1592347347550020	0.0426803581656730
Frío	Ene	-0.0630825052183443	0.0249913123894365	0.3537485524657920	0.2491207332819500	0.0425413373745446
	Feb	-0.0637378406173442	0.0256385360766377	0.3641533607663760	0.1295674400389780	0.0430661344420924
	Mar	-0.0634827696623399	0.0252434820344091	0.3560599632012330	0.2374053983919130	0.0427286051288610
	Abr	-0.061311922232971	0.0245374661756428	0.3473918046135710	0.2664843049999810	0.0410123278028103
	May	-0.0650841877129891	0.0262993543799677	0.3698221152282480	0.3264143411574900	0.0432057038097160
	Jun	-0.0637727483062033	0.0252626389487539	0.3552972466303950	0.1939304740568910	0.0431501417290967
	Jul	-0.0606291742527768	0.0244032588774346	0.3488137316314890	0.1187741295833960	0.0409422518697984
	Ago	-0.0565036006484486	0.0232654350608052	0.3391354934651940	0.3436382710618730	0.0367638185998562
	Sep	-0.0625401286090588	0.0246895402995652	0.3477034029956510	0.2106245459627110	0.0423674068065474
	Oct	-0.0620982795991113	0.0242499942129664	0.3414079421296630	0.1608159235936620	0.0424297004202834
	Nov	-0.0610081233699885	0.0234279860447214	0.3301250033043560	0.1945800263067110	0.0418831913341943
	Dic	-0.0644496290543774	0.0242082231035209	0.3374056596066370	0.1206438424072370	0.0449653773699872

Tabla D.13 Funciones para flujo volumétrico en ChSo-TC (Mérida, Yucatán): Orientación Este-Oeste

Día	Mes	$\dot{V} = \beta_{0,\dot{V}} + \beta_{1,\dot{V}}Hy + \beta_{2,\dot{V}}Hx_{canal} + \beta_{3,\dot{V}}Hx_{vidrio} + \beta_{4,\dot{V}}\alpha$ $\left\{ \begin{array}{l} 1.0 \leq Hy \leq 4.0 \\ 0.05 \leq Hx_{canal} \leq 0.35 \\ 0.003 \leq Hx_{vidrio} \leq 0.008 \\ 0.30 \leq \alpha \leq 0.97 \end{array} \right.$				
		$\beta_{0,\dot{V}}$	$\beta_{1,\dot{V}}$	$\beta_{2,\dot{V}}$	$\beta_{3,\dot{V}}$	$\beta_{4,\dot{V}}$
Cálido	Ene	-0.0602188018027980	0.0231774463233208	0.3289578918046360	0.1140230473315720	0.0416079209199041
	Feb	-0.0578060303425035	0.0231406319295888	0.3320051764387440	0.2587918913547560	0.0386337616548373
	Mar	-0.0583297934638305	0.0234024851292954	0.3354579941500960	0.2394912525266900	0.0390221005174297
	Abr	-0.0592492413312702	0.0243327372146221	0.3479782292890770	0.2260807144835630	0.0391525230192357
	May	-0.0590463813750520	0.0251409183315318	0.3611354690296030	0.5690696067834120	0.0371306388746063
	Jun	-0.0643024050168246	0.0258173968619923	0.3647071114770650	0.2633889104156590	0.0430583504853263
	Jul	-0.0598320734692316	0.0247217643464086	0.3524199291783710	0.3722311281394740	0.0389565770315955
	Ago	-0.0633274763822481	0.0254820308770199	0.3630420230559130	0.2185937932049620	0.0425635888341087
	Sep	-0.0613532202738292	0.0248696111471871	0.3536166829004410	0.2838721033873430	0.0407262090668356
	Oct	-0.0602350446483701	0.0240193264149917	0.3406206927213450	0.3161457903312540	0.0401743360106013
	Nov	-0.0568748406803690	0.0220395785895062	0.3152552144664900	0.2035042123145790	0.0388230626722704
	Dic	-0.0557520052184452	0.0220841433508474	0.3171677192227590	0.3032145761287320	0.0372743607797971
Frío	Ene	-0.0635948041509542	0.0238082551882256	0.3320556947393980	0.1558349846705000	0.0442489803347755
	Feb	-0.0580712518204423	0.0227283716819663	0.3235202882482340	0.2672774599801640	0.0391708284890911
	Mar	-0.0588225040054909	0.0239174165097093	0.3411701650970920	0.2387576107533770	0.0390215500448931
	Abr	-0.0594691994236329	0.0238189563457441	0.3403232777431550	0.2950583546393790	0.0396921360819959
	May	-0.0629434230433670	0.0252293619410264	0.3572376194102630	0.2002339148894540	0.0423476653266250
	Jun	-0.0643537016031374	0.0263029580817892	0.3745535808178910	0.3112022329852250	0.0426062186883840
	Jul	-0.0592462651114488	0.0243052044311719	0.3454994728831470	0.3286370603532350	0.0388870532258473
	Ago	-0.0601110169223199	0.0245387551060630	0.3509012653463430	0.3164567850790460	0.0397027115633189
	Sep	-0.0588300405907946	0.0237094796949993	0.3386845112357070	0.2716939382348940	0.0392037355291102
	Oct	-0.0600162944553568	0.0232543910037808	0.3301410528949500	0.2102720190307340	0.0410042601810100
	Nov	-0.0585249896287297	0.0227750374602678	0.3238898031741060	0.2272615312499480	0.0397937351860990
	Dic	-0.0519756884012103	0.0219148152978040	0.3111892958351820	0.2379123600527440	0.0335352307422089

ANEXO E

METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES, COSTO ELÉCTRICO Y TIEMPO DE RECUPERACIÓN

El interés en conocer la cantidad de emisión de contaminantes de los dispositivos de ventilación y acondicionamiento del aire de forma activa en edificaciones ha desencadenado la realización de estudios para determinar los kilogramos de dióxido de carbono (kgCO_2) emitidos a la atmosfera. En la literatura se han reportado los factores de emisión de dióxido de carbono respecto al consumo eléctrico de los dispositivos activos para diferentes regiones alrededor del mundo. En esta sección se presenta el análisis de los kgCO_2 emitidos a la atmosfera a través de una analogía entre sistemas activos convencionales con la ChSo-OC y ChSo-TC. De igual forma se presenta la estimación del coste energético tomando como analogía un sistema activo que provee la misma ventilación generada por la chimenea solar. Finalmente, se describen los costos de construcción y la forma de estimar el tiempo de recuperación de la inversión inicial a partir del ahorro en el costo energético calculado para un sistema activo.

Metodología para estimación de ventilación mecánica

En primera instancia, es necesario determinar la potencia requerida para satisfacer la ventilación inducida por las chimeneas solares a través de dispositivos de ventilación mecánica. Por lo que, se toma como dato el flujo volumétrico inducido por la ChSo-OC y ChSo-TC respectivamente. De acuerdo con **Miyazaki et al. (2006)**, considerando una presión estática de 1000 Pa (P_s), el flujo volumétrico inducido por la chimenea solar en m^3s^{-1} (\dot{V}) y la eficiencia del dispositivo mecánico o ventilador en 70% o 0.7 (η_{fan}), la potencia del ventilador equivalente (ϖ) se expresa como:

$$\varpi = \frac{P_s \dot{V}}{\eta_{fan} \times 1000} \quad [\text{kW}] \quad (\text{E.1})$$

De esta manera, obtenemos la potencia del ventilador equivalente con el flujo de aire inducido por la chimenea solar. ϖ es el parámetro que nos permite realizar la analogía de

cuanta potencia requiere un sistema activo para generar el mismo flujo de aire inducido por la chimenea solar.

El siguiente paso es determinar el consumo eléctrico a lo largo del día a partir de la potencia del ventilador equivalente. Ya que a partir de la modelación se tomaron los datos de un día completo, se realizó el cálculo de ϖ para cada instante de tiempo evaluado. Por lo que, para obtener el consumo eléctrico en kWh, es necesario realizar una integración de ϖ en el día de modelación completo, Fig. E.1. La integración se realizó a través del método del trapecio como se muestra en la Ec. E.2.

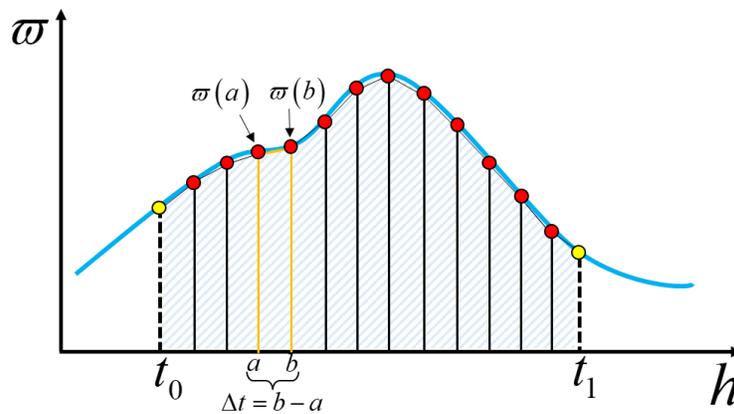


Figura E.1. Integración de la potencia del ventilador equivalente en el día de modelación

$$\Omega = \int_{t_0}^{t_1} \varpi(t) dt = \sum_{n=1}^N \frac{\Delta t |\varpi(b) - \varpi(a)|}{2} \quad N = \frac{t_0 - t_1}{\Delta t} \quad (\text{E.2})$$

Donde Ω es el consumo eléctrico equivalente en kWh en un día de evaluación de la chimenea solar. t_0 y t_1 son los tiempos de 0 y 86400 s correspondientes al tiempo de modelación de la chimenea solar.

Metodología para estimar kgCO₂

A partir de conocer el consumo eléctrico equivalente durante el día de evaluación de la chimenea solar, Ω , la estimación de los kgCO₂ es posible a partir de un factor de emisión reportado en la literatura. De acuerdo con la **Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales** de la República Mexicana (2022) este factor es de 0.423 kgCO_{2e}/kWh. Por lo que para estimar la cantidad de emisión de contaminante correspondiente a la energía requerida

por un sistema activo capaz de proveer la cantidad ventilación inducida por la chimenea solar se procede a emplear la siguiente expresión:

$$kgCO_2 = \Omega \times 0.423 \frac{kgCO_{2e}}{kWh} \quad (E.3)$$

Tarifas de consumo eléctrico CFE

Para estimar el costo del consumo eléctrico en dispositivos activos equivalente a la ventilación generada por las chimeneas solares en el estudio paramétrico realizado, se realizó una búsqueda de las diferentes tarifas de consumo establecidas por la Comisión Federal de Electricidad para el año 2022. Las tarifas que se emplearon para este análisis corresponden a las utilizadas para uso exclusivamente doméstico. Existen principalmente siete tarifas vigentes. A continuación, se describe brevemente cada una de las tarifas:

- **Tarifa 1:** esta tarifa se aplica para cargas que no sean consideradas de alto consumo, conectadas individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda. El requerimiento es que no se sobrepasen los 3000 kWh al año, ni los 250 kWh al mes.
- **Tarifa 1A:** esta tarifa se aplica en localidades cuya temperatura media mensual en verano sea de 25°C como mínimo.
- **Tarifa 1B:** esta tarifa se aplica en localidades cuya temperatura media mensual en verano sea de 28°C como mínimo.
- **Tarifa 1C:** esta tarifa se aplica en localidades cuya temperatura media mensual en verano sea de 30°C como mínimo.
- **Tarifa 1D:** esta tarifa se aplica en localidades cuya temperatura media mensual de verano sea de 31°C como mínimo.
- **Tarifa 1E:** esta tarifa se aplica en localidades cuya temperatura media mensual de verano sea de 32°C como mínimo.
- **Tarifa 1F:** esta tarifa se aplica en localidades cuya temperatura media mensual de verano sea de 33°C como mínimo.

Estas cuotas no son constantes a lo largo del año y tienden a tener mayores ajustes durante los meses más cálidos del año. Además, por cada mes del año se establecen al menos tres tipos de consumo: consumo básico (entre 75 y 300 kWh); consumo intermedio (por los kWh

siguientes entre los 50 y 900 kWh), este puede dividirse en intermedio bajo y alto de acuerdo con el tipo de tarifa; y consumo excedente (es el costo adicional por cada kWh excedente al consumo básico e intermedio). En la Fig. E.2 se muestran las tarifas correspondientes tomando en cuenta el consumo excedente por cada mes para el 2022.

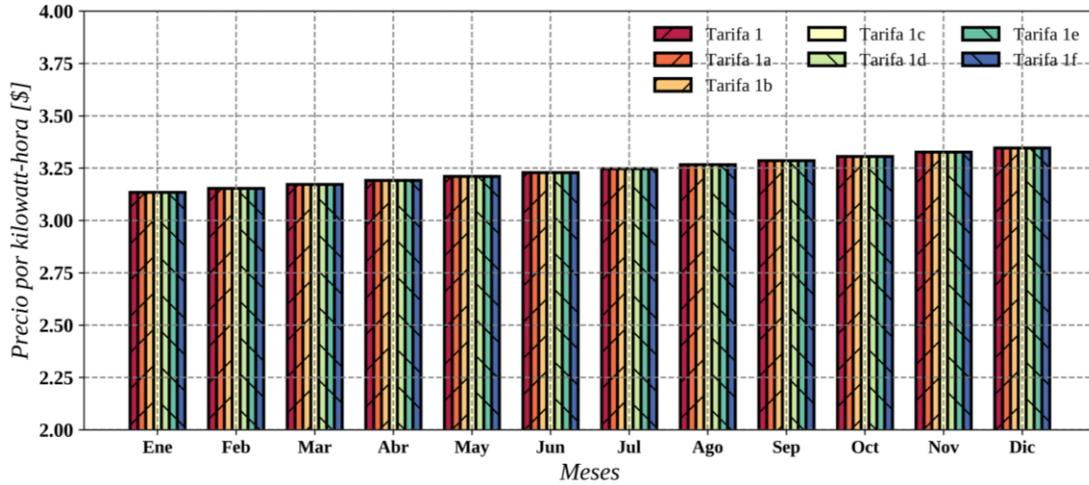


Figura E.2. Tarifas de CFE para uso doméstico en consumo excedente

Para el análisis realizado con los resultados del estudio paramétrico, se tomó en consideración las variaciones de las tarifas para las ciudades evaluadas. Se consideró un análisis de consumo y gasto eléctrico tomando en cuenta la Tarifa 1 para las ciudades de Toluca y Ciudad de México; mientras que para Hermosillo, Monterrey, Villahermosa y Mérida se tomó en cuenta la Tarifa 1F.

Costo de construcción de chimenea solar y tiempo de recuperación

Para realizar el análisis de costos se realizó la búsqueda los costos por unidad de los elementos que conforman las ChSo-OC y ChSo-TC. En la Tabla E.1 se muestran los precios correspondientes para los materiales de cada modelo de chimenea solar evaluado.

La Tabla E.1 incluye los costos de mano de obra para la construcción del sistema pasivo en la vivienda. En este caso se tienen precios diferentes a las configuraciones que requieran más trabajo como aquellas donde se emplean materiales masivos como ladrillo, concreto y PCM. El costo de mano de obra de la primera parte corresponde a una chimenea solar cuya variación sea de altura, espesor, tipo de vidrio y pintura.

Tabla E.1. Costo de materiales empleado para construcción de la ChSo-OC y ChSo-TC

Insumo	Costo unitario [\$] (Precios actualizados a noviembre de 2022)	Proveedor
Poliestireno extruido (Foamular 1.22×2.44 m)	957.00	Home Depot https://www.homedepot.com.mx/
Placa de acero galvanizado calibre 16 (1×3.05m)	1739.00	Sodimac https://www.sodimac.com.mx/sodimac-mx/content/a10002/Inicio
Pintura Comex Total 100 (4 L)	949.00	Comex https://www.comex.com.mx/
Ladrillo (pieza)	4.50	Home Depot
Block macizo (pieza)	12.70	Home Depot
Bulto de cemento Portland 50 kg	225.0	Home Depot
Carga de arena completa y grava mixta	3000.00	Home Depot
Vidrio claro templado 3 mm (1.80×2.60m)	966.28	Acabados DYC 21 https://www.acabadosdyc21.com/cotizador/
Vidrio claro templado 6 mm (1.20×2.60m)	1157.68	Acabados DYC 21
Vidrio claro templado 9 mm	3474.20	Acabados DYC 21
Mano de obra calificada para cualquier configuración sin considerar materiales masivos	2000-3000	GENOVA Arq. Laura Lara Aguilar
Insumo: PCM	Costo unitario [\$] (Precios SIN IVA actualizado julio 2021)	Proveedor
Puretemp 27X (1 galón)	7670.0	Comercial Química del Noroeste S.A. de C.V.
Puretemp 29X (1 galón)	7670.0	Comercial Química del Noroeste S.A. de C.V.
Mano de obra calificada para configuraciones con materiales masivos	4000-5000 (Incluye IVA)	GENOVA Arq. Laura Lara Aguilar

Los cálculos en el costo total de la construcción de cada configuración de ChSo-OC y ChSo-TC se ajustaron con base en la cantidad necesaria de materiales. Los materiales de mayor precio son los PCM, además de que el precio en venta corresponde al galón de este y no al costo total necesario para formar la pared absorbente. De acuerdo con las dimensiones de la placa absorbente consideradas para el presente estudio, se requieren al menos 50 L de

material para una pared absorbente de 1.0 m \times 2.0 m \times 0.025m, lo cual incrementa considerablemente los costos de construcción de ambas configuraciones de chimenea solar evaluadas en este estudio.

Los materiales de cambio de fase mostrados en la Tabla E.1 son los materiales disponibles para comprar en México y cuyas especificaciones son las más cercanas a las reportadas en la modelación del presente estudio. Sin embargo, los precios a los que se tuvieron acceso corresponden al año 2020 y 2021 y al no contar con la información actualizada, se procedió a incrementar el precio correspondiente a la tendencia en los años previos. Por lo tanto, el precio mostrado en la Tabla E.1 fue ajustado con un incremento del 5% más el IVA correspondiente, esto sin tomar en cuenta los gastos de envío a las diferentes regiones de la República Mexicana. Por lo tanto, al considerar los precios de cada elemento en la Tabla E.1, los ajustes de cantidad de material de acuerdo con la necesidad por configuración evaluada y los ajustes en el precio de los materiales masivos, en la Tabla E.2 se presentan el costo total de la construcción e implementación de la ChSo-OC y ChSo-TC para cada configuración evaluada en el presente estudio.

Tabla E.2. Gasto total de construcción de ChSo-OC y ChSo-TC

Configuración	ChSo-OC Costo [\$]	ChSo-TC Costo [\$]
H = 1.0 m	6611.28	6620.56
H = 1.5 m	6611.28	6620.56
H = 2.0 m	6611.28	6620.56
H = 2.5 m	7568.28	6620.56
H = 3.0 m	9034.56	9053.12
H = 3.5 m	10773.56	10792.12
H = 4.0 m	11273.56	11292.12
d = 0.05 m	6611.28	6620.56
d = 0.10 m	6611.28	6620.56
d = 0.15 m	6611.28	6620.56
d = 0.20 m	6611.28	6620.56
d = 0.25 m	6611.28	6620.56
d = 0.30 m	6611.28	6620.56
d = 0.35 m	6611.28	6620.56
Vidrio 3mm	6611.28	6620.56
Vidrio 6mm	6802.68	7003.36
Vidrio 8mm	9119.20	11636.40
Pintura negra	6611.28	6620.56
Pintura gris	6611.28	6620.56
Pintura blanca	6611.28	6620.56

Placa Metálica	8611.28	8620.56
Concreto	12682.95	12692.23
Ladrillo	12350.57	12359.85
PCM RT25 HC	132006.90	132016.18
PCM RT28 HC	132006.90	132016.18
PCM RT35 HC	132006.90	132016.18
PCM RT42	132006.90	132016.18
PCM MG-49	132006.90	132016.18
PCM 46-50	132006.90	132016.18

Como se observa en la Tabla E.2, las construcciones de chimeneas de mayor costo son aquellas que implican el uso de PCM, esto debido a la gran cantidad de material bruto que se requiere para la construcción de estas chimeneas solares. El resto de las configuraciones presentan costos que rondan entre los \$6500.00 y los \$13000.00, incluso aquellas configuraciones que emplean concreto y ladrillos como materiales masivos en la pared absorbente.

Es importante resaltar, que los costos presentes pueden variar de acuerdo con el proveedor de los materiales y la zona en donde se obtenga el material. Por lo que el análisis de costo debe realizarse de acuerdo con los proveedores disponibles de la región. Se emplearon los costos de materiales de cadenas comerciales populares que sirven como referencia en diferentes localidades del país. A excepción del poliestireno extruido y el PCM, el resto de los materiales se encuentra fácilmente con otras ofertas de proveedores, lo cual favorece el costo final de construcción de las chimeneas solares.

Para estimar los años requeridos para recuperar la inversión de las chimeneas solares, se procedió a utilizar el costo del consumo eléctrico equivalente de una chimenea solar a lo largo de un año y los costos anuales de mantenimiento considerando el efecto de la inflación anual. En la Ec. E.4 se expresa el costo total de tener una chimenea solar al año tomando en cuenta, el costo de inversión inicial, los gastos de mantenimiento anual considerando los incrementos por la inflación anual y la retribución del gasto en consumo eléctrico equivalente por parte de un sistema activo

$$\begin{aligned}
 \text{Costo total restante}_{\text{año corriente}} &= \left(\begin{array}{l} \text{El primer año considera la inversión inicial} \\ \text{para la construcción del dispositivo} \\ \text{Costo total restante}_{\text{año pasado}} \\ \text{CTP} \\ + \underbrace{\text{Gastos anual de mantenimiento}}_{MT} \times \underbrace{\text{Inflación anual}}_{Infla} \end{array} \right) \\
 &- \left(\underbrace{\text{Costo de consumo eléctrico anual}}_{\text{CostoEnergía}_{\text{anual}}} \times \underbrace{\text{Inflación anual}}_{Infla} \right) \quad (\text{E.4})
 \end{aligned}$$

La Ec. E.4 permite obtener la reducción del costo por cada año, sin embargo, para estimar la cantidad de años requerida para cubrir los gastos de inversión inicial y el mantenimiento acumulado se desarrolló un procedimiento iterativo para estimar la cantidad de tiempo en el que se alcanza a cubrir los gastos acumulados hasta la chimenea solar sea completamente autosustentable. En el Algoritmo 1 se muestra el pseudo código para estimar el tiempo necesario para que el sistema de chimenea solar sea autosustentable empleando la Ec. E.4 y los incrementos en los costos de mantenimiento y costo eléctrico equivalente debido al efecto inflacionario para la República Mexicana.

Algoritmo 1: Pseudo código para la estimación de los años de recuperación de la inversión en chimeneas solares

Inicio

Variables de entrada: CTP , MT , $Infla$, $CostoEnergía_{\text{anual}}$

1. **for** i **in** $range(0, n_{\text{parametros}})$:
 2. $años_{\text{transcurridos}} = 0$
 3. $CTPR = CTP[i]$
 4. $mt = MT$
 5. $CTE = CostoEnergía_{\text{anual}}[i]$
 6. **while** $(CTPR \geq 0)$:
 7. $mt = mt * Infla$
 8. $CTE = CTE * Infla$
 9. $CTPR = (CTPR + mt) - CTE$
 10. $años_{\text{transcurridos}} = años_{\text{transcurridos}} + 1.0$
 11. **end while**
 12. $años_{\text{recuperación}}[i] = años_{\text{transcurridos}}$
 13. **end for**
- #End**
-

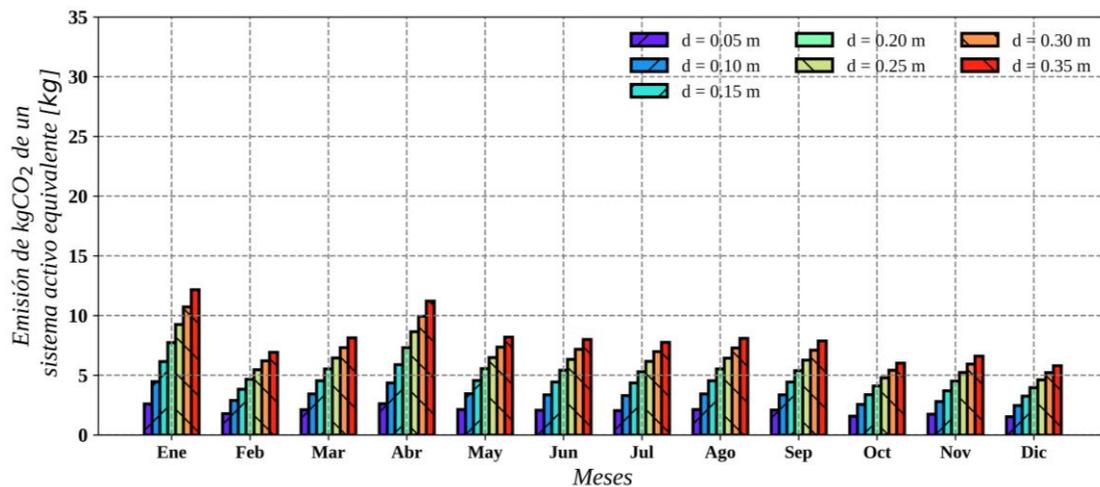
El valor de la inflación anual en los cálculos realizados se estimó a partir de un promedio de la inflación anual de los últimos 22 años con base en los índices Nacionales de Precio al Consumidor (INPC) proporcionados por el INEGI desde 1969. Con el INPC de los últimos 22 años se estimó la inflación mensual, acumulada y anual para tratar de encontrar una tendencia que permitiese emplear una inflación variable para el análisis de costos, sin embargo, ante la imposibilidad de encontrar una expresión polinómica adecuada para la curva de tendencia de los últimos años, se procedió a emplear el promedio de la inflación de los últimos 22 años el cual es de 4.68%.

ANEXO F
RESULTADOS ESTIMACIÓN DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES, COSTO ELÉCTRICO Y TIEMPO DE RECUPERACIÓN: OTRAS CIUDADES

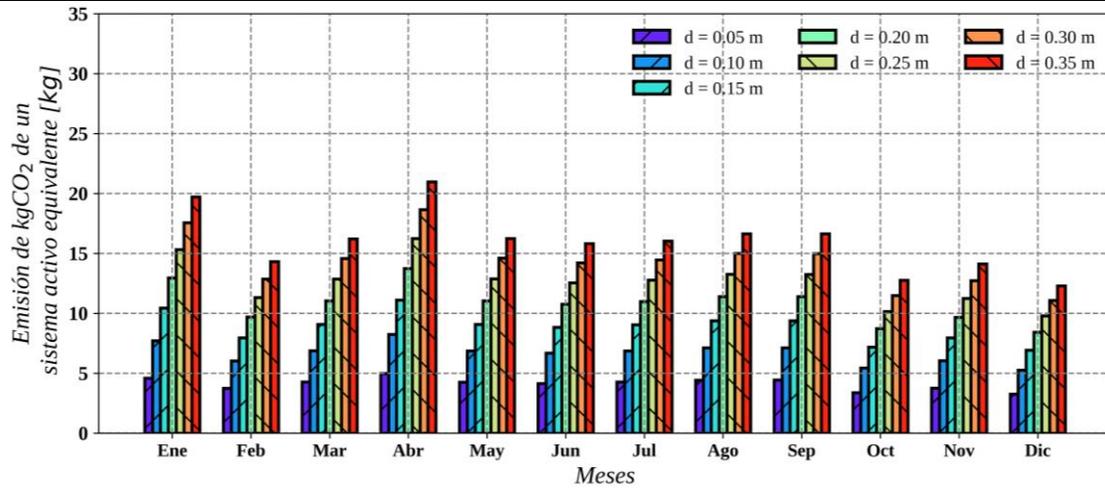
En esta sección se presenta el análisis de la emisión de contaminantes, costo eléctrico y tiempo de recuperación para las ciudades de Monterrey, Ciudad de México, Toluca, Villahermosa y Mérida.

F.1. Monterrey, Nuevo León

Para el estudio realizado bajo las condiciones de Monterrey, Nuevo León, en la Fig. F.1 se presenta el comportamiento anual de las mayores emisiones de dióxido de carbono que se están evitando a través del uso de la ChSo-OC y la ChSo-TC. Solo se presentan los resultados de la variación de espesores del canal, con el cual se obtuvieron los mejores resultados.



a)

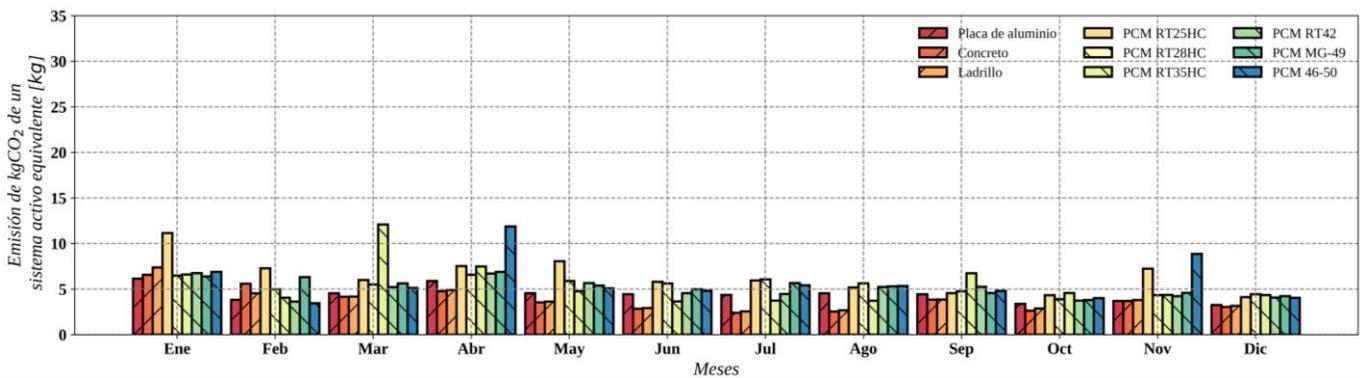


b)

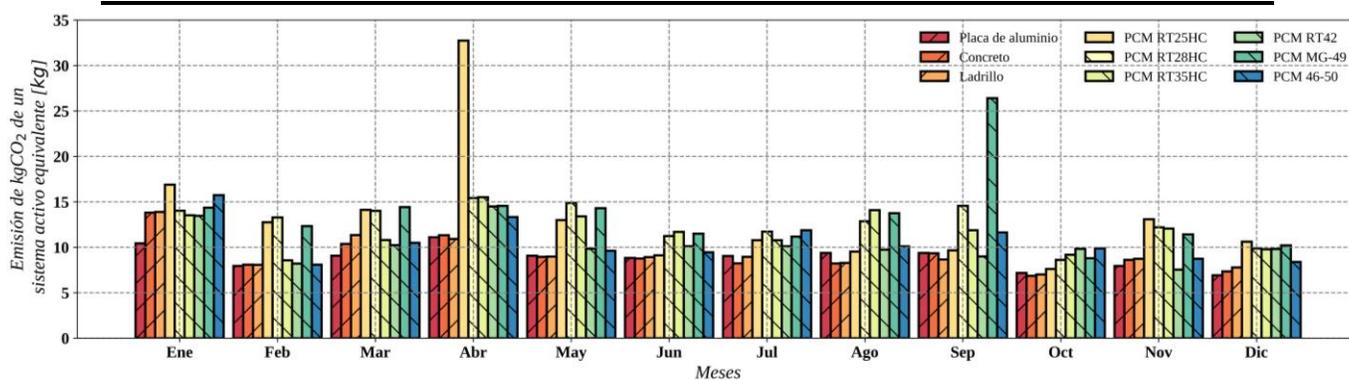
Figura F.1. Equivalencia de $kgCO_2$ en chimenea solar variando espesor del canal (Monterrey): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

Como se muestra en la Fig. F.1, la capacidad de reducir contaminantes por medio de ChSo-TC es completamente superior al comportamiento de la ChSo-OC. En el estudio paramétrico del espesor del canal se observaron los mayores flujos de aire inducidos de todo el estudio paramétrico, lo que significa que bajo estas configuraciones se observa aún mayor la cantidad de $kgCO_2$ que no se está emitiendo a través del uso de sistemas activos. Para la ChSo-OC orientado al oeste y empleando un espesor de $d=0.35m$ se estimaron hasta $96.78 kgCO_{2e}$ mientras que para la ChSo-TC esto se incrementó hasta $191.73 kgCO_{2e}$, esto tomando en cuenta el año completo de evaluación.

En la Fig. F.2 se muestra el comportamiento de los $kgCO_2$ desde la perspectiva de las diferentes configuraciones de muro en ambos modelos de chimenea solar.



a)

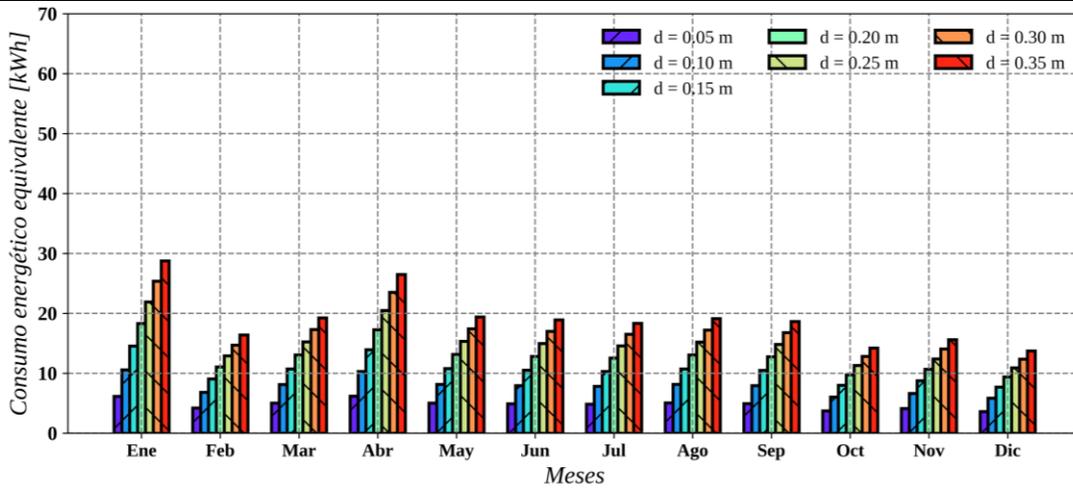


b)

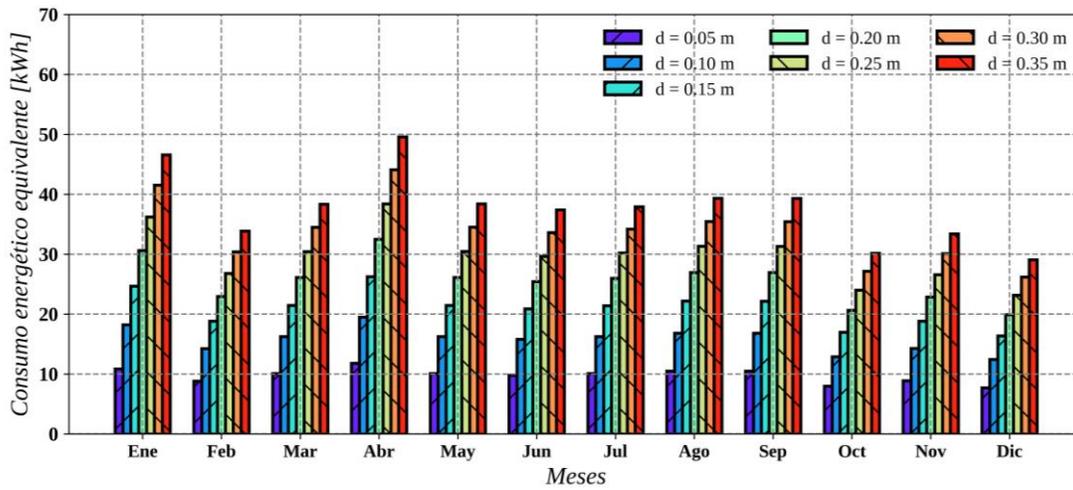
Figura F.2. Equivalencia de kgCO_2 en chimenea solar variando material de pared absorbente (Monterrey): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

A diferencia del análisis en otros parámetros en ambas configuraciones de chimenea solar, no existe una tendencia a simple vista para determinar que configuración permitió obtener la mayor reducción de kgCO_2 . Al considerar el efecto de emisión en todo el año, para el flujo de aire de la configuración de ChSo-OC con PCM RT25 HC se estimó la mayor cantidad de kgCO_2 , el cual fue de 77.24 kgCO_2 mientras que para la configuración de ChSo-TC con PCM MG-29 se estimaron hasta 163.29 kgCO_2 . Lo cual demuestra el impacto positivo de la combinación de sistemas pasivos con materiales de cambio de fase para cubrir las demandas de ventilación en edificaciones.

Para la potencia eléctrica de un sistema activo equivalente al flujo de aire inducido por las chimeneas solares, en la Fig. F.3 se muestran nuevamente los comportamientos de cada mes considerando los resultados con mejores desempeños de todo el estudio paramétrico.



a)

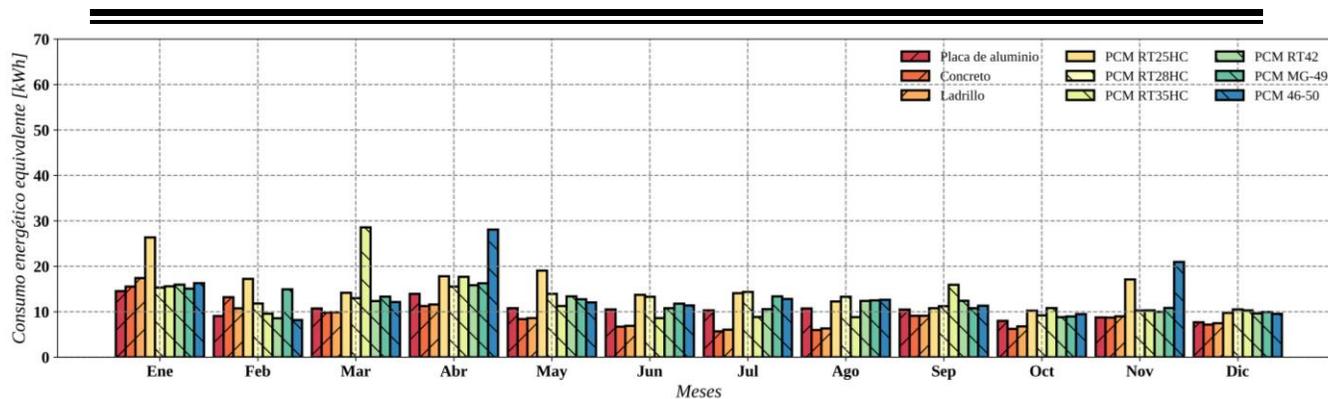


b)

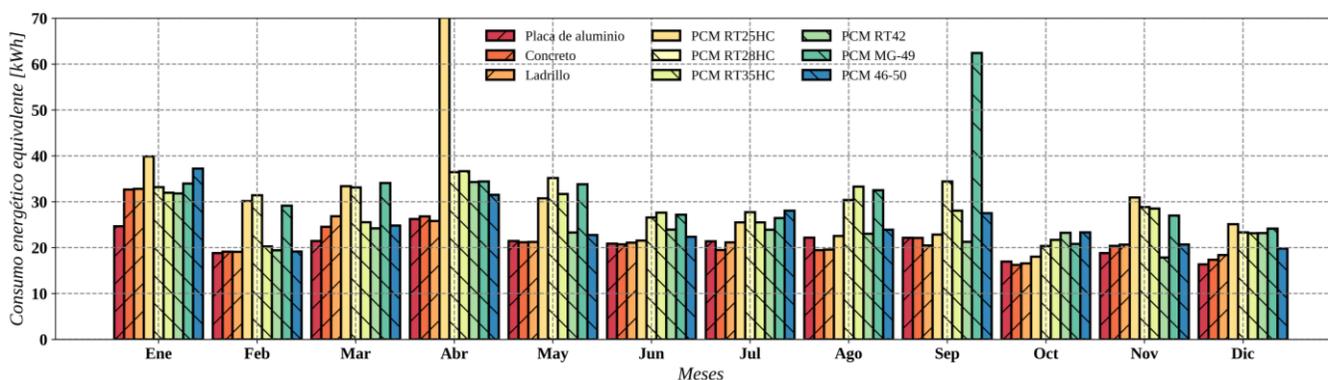
Figura F.3. Consumo energético equivalente variando espesor del canal (Monterrey): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

Al estimar el consumo eléctrico equivalente anual para los diferentes espesores evaluados, se determinó que para un espesor de $d = 0.35$ m se obtuvo un consumo total anual de 228.80 kWh para la ChSo-OC en la orientación Oeste, mientras que para la ChSo-TC fue de 453.27 kWh para la orientación Este-Oeste. La ChSo-TC casi duplicó el resultado obtenido por parte de la ChSo-OC. Estos valores revelan la cantidad de energía requerida para activar un sistema activo que permita satisfacer los niveles de ventilación inducidos por las chimeneas solares.

En la Fig. F.4 se presentan los resultados correspondientes al estudio paramétrico de los materiales de la pared absorbente.



a)



b)

Figura F.4. Consumo energético equivalente variando pared absorbente (Hermosillo):
 a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

Como se muestra en la Fig. F.4, no es clara la tendencia sobre que configuración presentó un mayor consumo eléctrico equivalente. Sin embargo, al realizar la sumatoria de todos los meses para obtener el consumo anual, se determinó que la ChSo-OC orientada al oeste y al emplear un PCM RT25 HC induce suficiente flujo de aire equivalente al de un sistema activo cuyo consumo eléctrico anual es de 182.61 kWh, mientras que para la ChSo-TC el mejor desempeño se obtuvo a través de un PCM MG-29 equivalente a 386.03 kWh orientada en Este-Oeste. Es considerable el impacto del consumo eléctrico y ambiental si se estuviese implementando un sistema activo de ventilación mecánica.

A partir del cálculo del consumo energético equivalente y del costo de construcción para las diferentes configuraciones de chimenea solar mostrado en la Tabla 7.1, se realizó la estimación de los años de recuperación de la inversión inicial para construir una ChSo-OC y ChSo-TC. En la Tabla F.1 se muestra el impacto económico del consumo energético

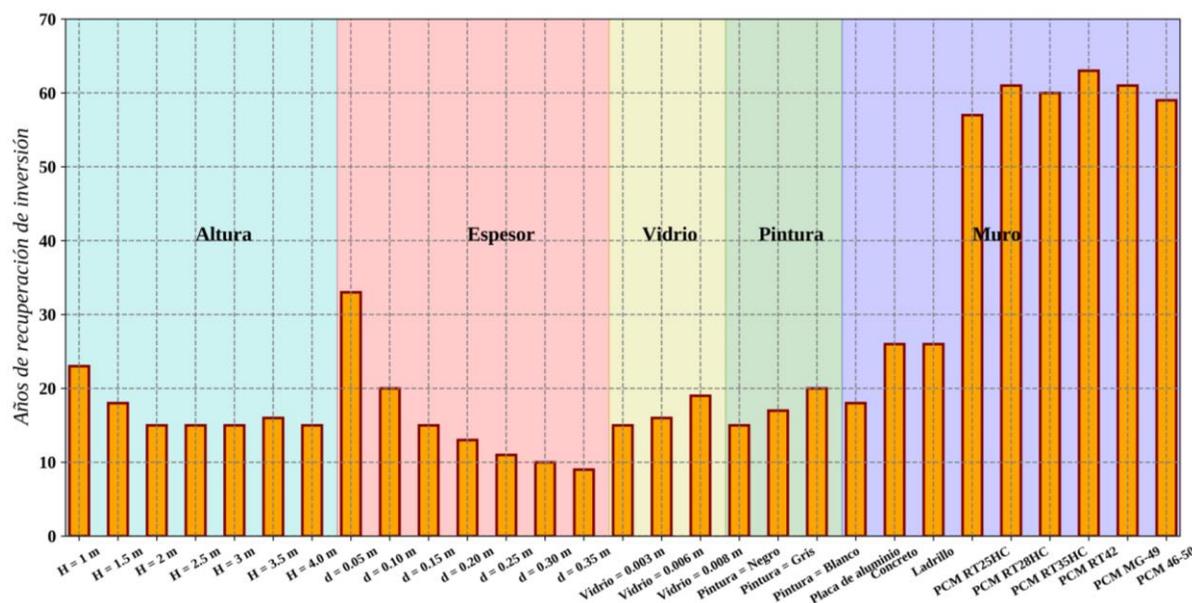
equivalente por configuración de chimenea solar usando la Tarifa 1F de la CFE en un año para la orientación Oeste de la ChSo-OC y Este-Oeste de la ChSo-TC, mientras que en la Fig. F.5 se muestran los años de recuperación a partir del costo de inversión y del costo del consumo energético equivalente en todas las configuraciones evaluadas para orientaciones Oeste y Este-Oeste de la ChSo-OC y ChSo-TC respectivamente.

Tabla F.1. Costo anual del consumo energético equivalente para las configuraciones de chimenea solar (Monterrey)

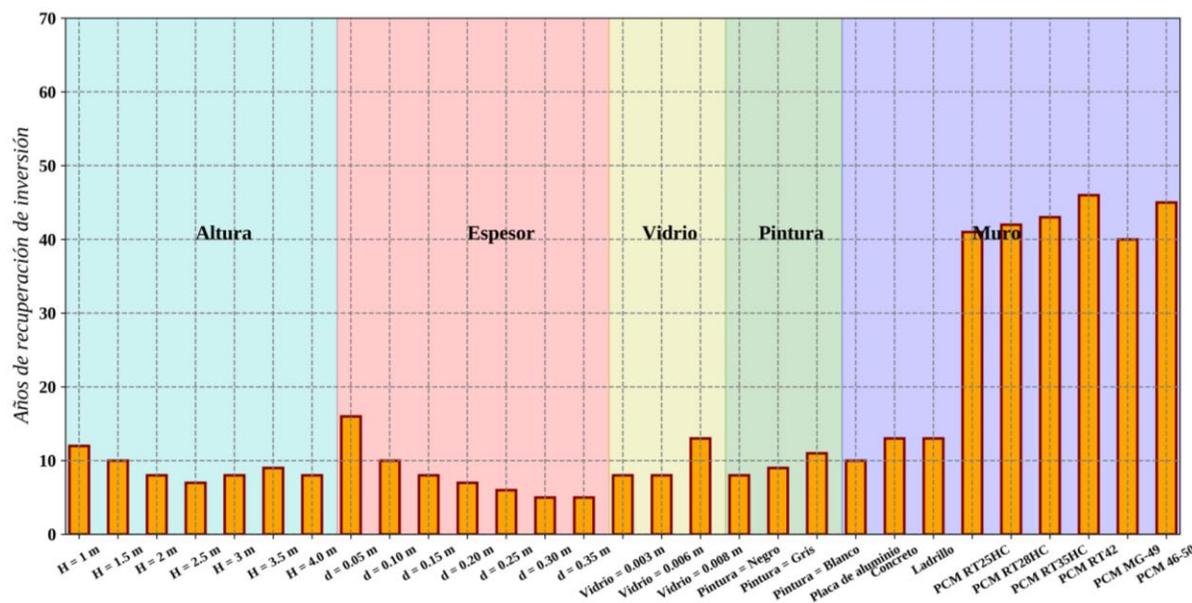
Configuración	ChSo-OC (orientación Oeste) Costo de consumo eléctrico [\$]	ChSo-TC (orientación Este-Oeste) Costo de consumo eléctrico [\$]
H = 1.0 m	264.69	526.97
H = 1.5 m	339.78	679.19
H = 2.0 m	405.49	812.82
H = 2.5 m	464.97	934.10
H = 3.0 m	519.91	1046.31
H = 3.5 m	571.31	1151.48
H = 4.0 m	619.87	1250.97
d = 0.05 m	186.71	378.65
d = 0.10 m	304.77	613.49
d = 0.15 m	405.49	812.82
d = 0.20 m	496.71	992.50
d = 0.25 m	581.64	1159.04
d = 0.30 m	661.96	1315.89
d = 0.35 m	738.73	1465.25
Vidrio 3mm	405.49	812.82
Vidrio 6mm	406.34	810.87
Vidrio 8mm	399.59	793.83
Pintura negra	405.49	812.82
Pintura gris	373.39	744.57
Pintura blanca	303.88	565.80
Placa Metálica	405.49	812.82
Concreto	348.06	840.20
Ladrillo	354.77	852.07
PCM RT25 HC	588.93	1219.60
PCM RT28 HC	490.73	1167.02
PCM RT35 HC	504.73	1081.23
PCM RT42	455.11	936.00
PCM MG-49	486.83	1249.50
PCM 46-50	533.75	973.50

Como se observa en la Tabla F.1, las configuraciones de ChSo-OC y ChSo-TC con mayor impacto en el consumo energético equivalente para inducir ventilación natural son aquellas donde se varía el espesor de canal (zona naranja), seguido de la altura de la chimenea solar (zona azul) y el material masivo empleado en el muro masivo (zona purpura). El mayor costo

del consumo energético equivalente de la ChSo-OC obtenido en un año de operación fue de \$738.73 MXN, mientras que para la ChSo-TC fue de \$1465.25 MXN, ambos valores se obtuvieron para una configuración de espesor de canal $d = 0.35$ m.



a)



b)

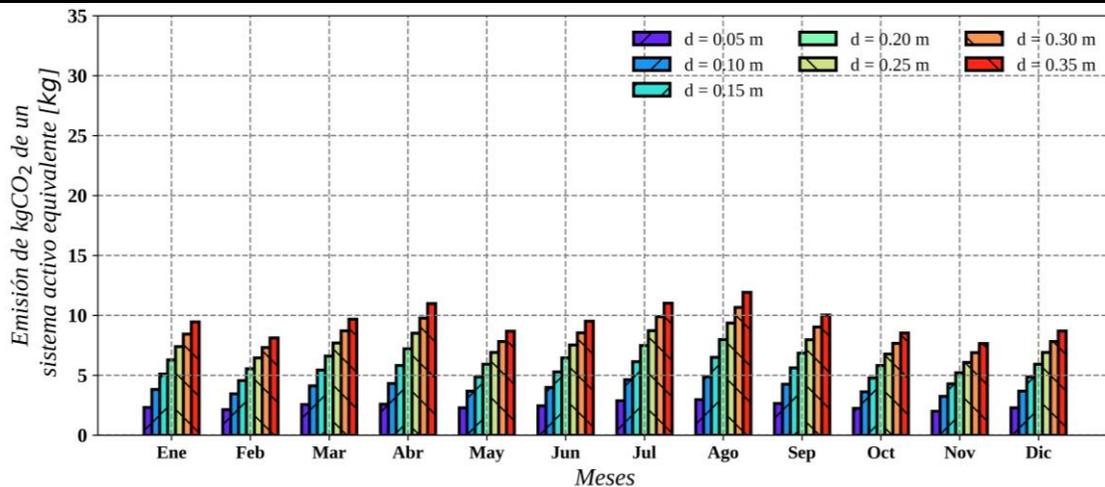
Figura F.5. Años de recuperación de inversión (Monterrey): a) ChSo-OC orientación Oeste b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

La Fig. F.5 muestra que los tiempos de recuperación de la inversión inicial para la construcción de la ChSo-OC y ChSo-TC bajo las condiciones de Monterrey, Nuevo León, son prolongados para las configuraciones que emplean PCM. El menor tiempo de recuperación para la ChSo-OC orientada al Oeste fue de nueve años al emplear un espesor $d = 0.35$ m. Entre los tiempos de recuperación más bajos en la evaluación de materiales masivos se encuentra el uso de concreto y ladrillo como materiales masivos (26 años respectivamente). El resto de las configuraciones sin PCM presentan un tiempo de recuperación menor a 34 años, mientras que las configuraciones de ChSo-OC con PCM presentan un tiempo de recuperación promedio de 60 años.

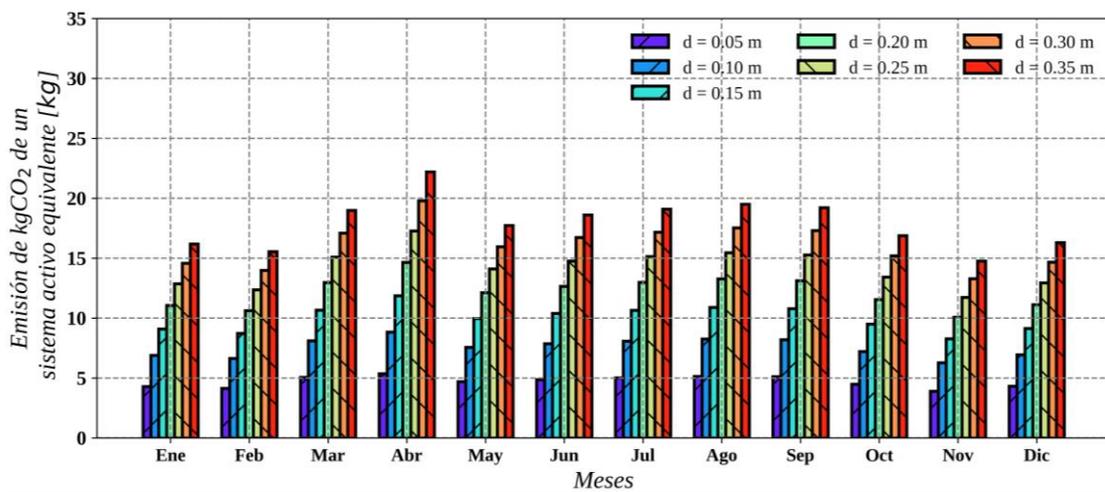
En el caso de la ChSo-TC el menor tiempo de recuperación se obtuvo de nueva cuenta con la configuración de espesor de $d = 0.35$ m el cual fue de cinco años. El resto de las configuraciones sin PCM presentaron tiempos de recuperación menores a los 17 años. En el caso de los materiales masivos, las configuraciones de concreto y ladrillo fueron de las configuraciones con materiales masivos que menor tiempo de recuperación presentaron: 13 años. Las configuraciones con PCM presentaron tiempos de recuperación de 43 años en promedio. De igual forma que el caso de la ChSo-OC, es necesario buscar una configuración óptima que genere que el uso de los PCM en chimeneas solares sea rentable.

F.2. Ciudad de México

Para el estudio realizado bajo las condiciones de Ciudad de México, en la Fig. F.6 se presenta el comportamiento anual de las mayores emisiones de dióxido de carbono que se están evitando a través del uso de la ChSo-OC y la ChSo-TC. Solo se presentan los resultados de la variación de espesores del canal, con el cual se obtuvieron los mejores resultados.



a)

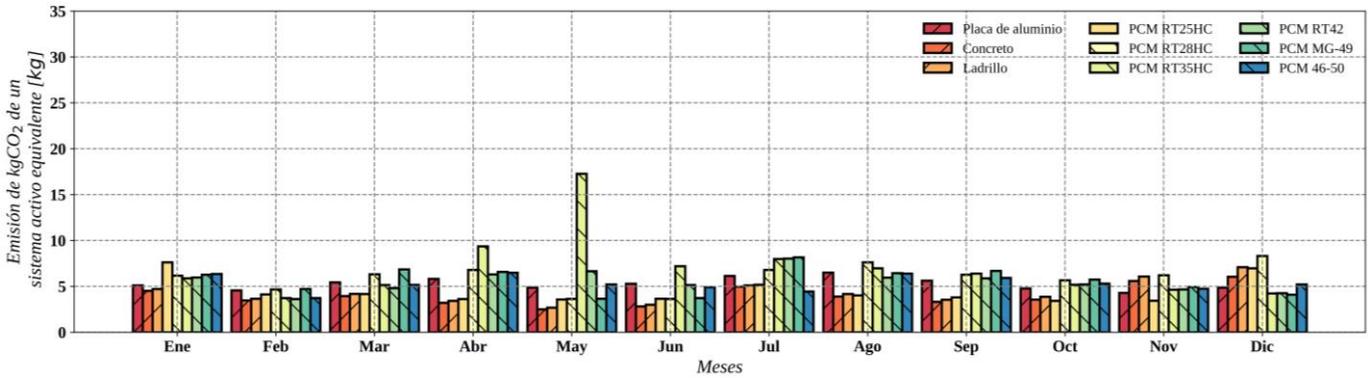


b)

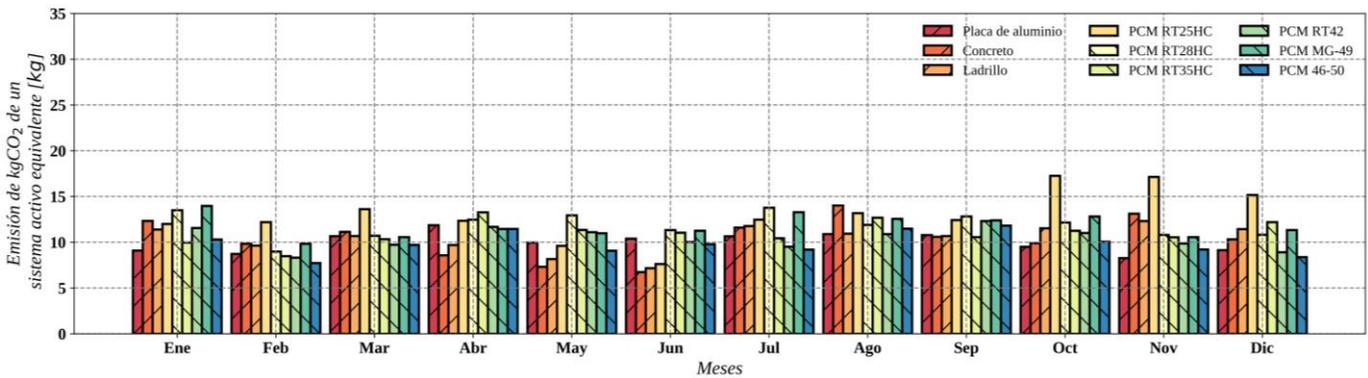
Figura F.6. Equivalencia de kgCO_2 en chimenea solar variando espesor del canal (CDMX): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

Como se muestra en la Fig. F.6, la capacidad de reducir contaminantes por medio de ChSo-TC es completamente superior al comportamiento de la ChSo-OC. En el estudio paramétrico del espesor del canal se observaron los mayores flujos de aire inducidos de todo el estudio paramétrico, lo que significa que bajo estas configuraciones se observa aún mayor la cantidad de kgCO_2 que no se está emitiendo a través del uso de sistemas activos. Para la ChSo-OC orientado al Este y empleando un espesor de $d=0.35\text{m}$ se estimaron hasta 114.30 kgCO_{2e} mientras que para la ChSo-TC esto se incrementó hasta 214.97 kgCO_{2e} , esto tomando en cuenta el año completo de evaluación.

En la Fig. F.7 se muestra el comportamiento de los kgCO₂ desde la perspectiva de las diferentes configuraciones de muro en ambos modelos de chimenea solar.



a)

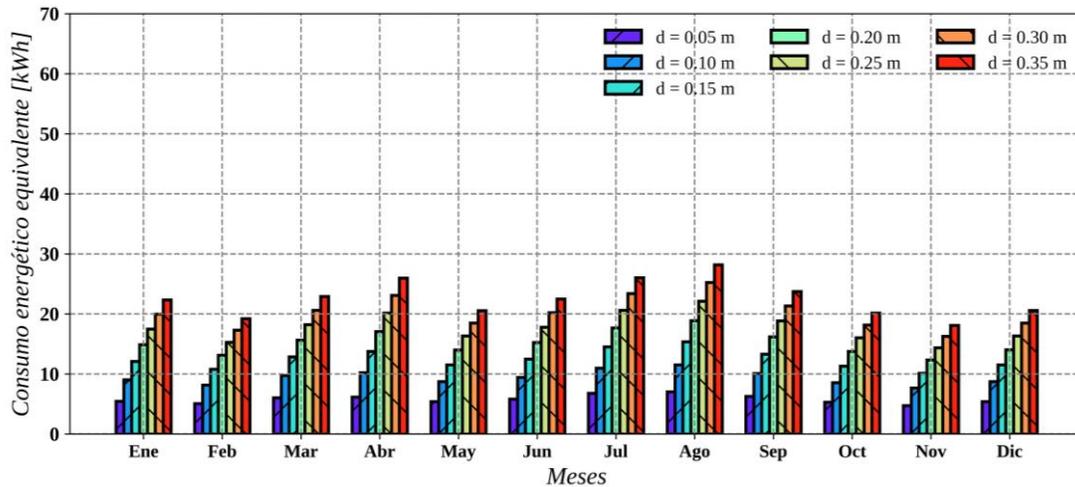


b)

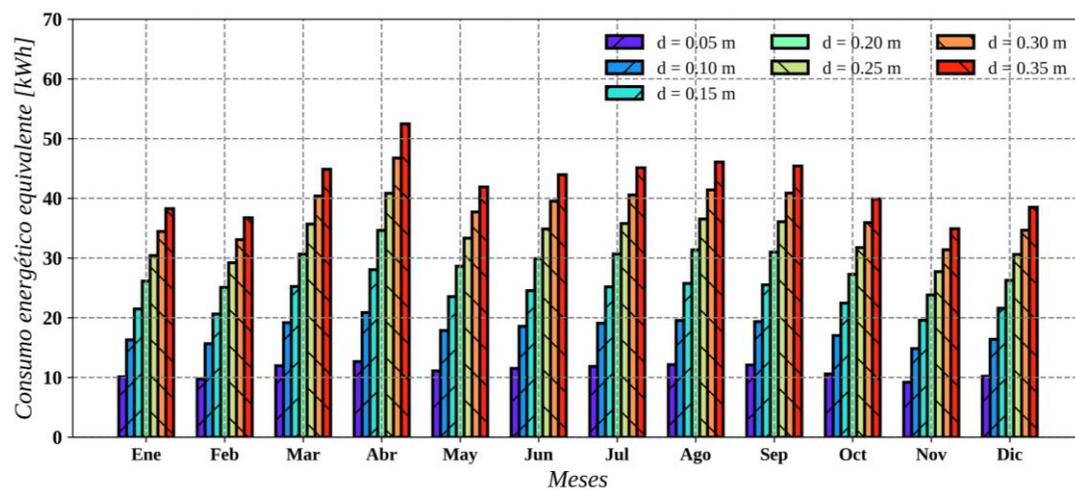
Figura F.7. Equivalencia de kgCO₂ en chimenea solar variando material de pared absorbente (CDMX): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

A diferencia del análisis en otros parámetros en ambas configuraciones de chimenea solar, no existe una tendencia a simple vista para determinar que configuración permitió obtener la mayor reducción de kgCO₂. Al considerar el efecto de emisión en todo el año, para el flujo de aire de la configuración de ChSo-OC con PCM RT35 HC se estimó la mayor cantidad de kgCO₂, el cual fue de 83.99 kgCO₂ mientras que para la configuración de ChSo-TC con PCM RT25 HC se estimaron hasta 155.01 kgCO₂. Lo cual demuestra el impacto positivo de la combinación de sistemas pasivos con materiales de cambio de fase para cubrir las demandas de ventilación en edificaciones.

Para la potencia eléctrica de un sistema activo equivalente al flujo de aire inducido por las chimeneas solares, en la Fig. F.8 se muestran nuevamente los comportamientos de cada mes considerando los resultados con mejores desempeños de todo el estudio paramétrico.



a)



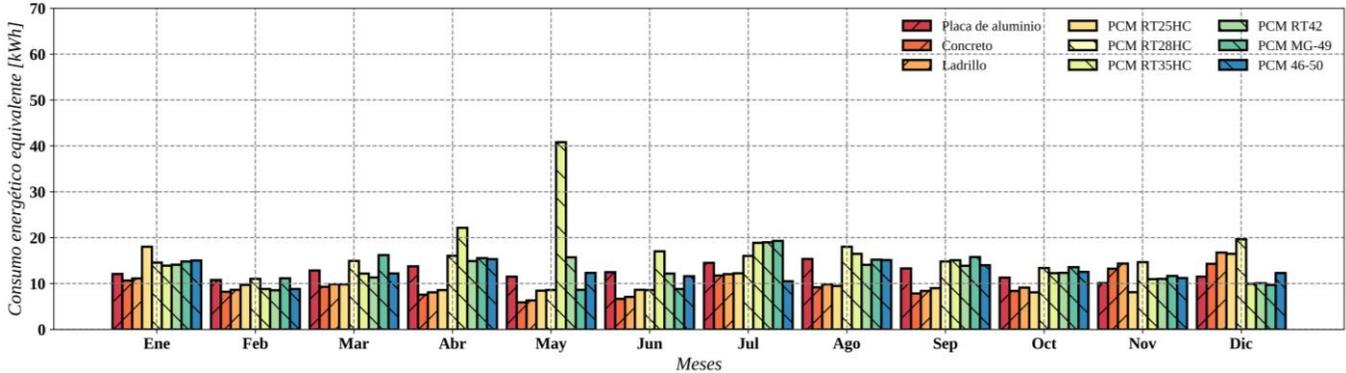
b)

Figura F.8. Consumo energético equivalente variando espesor del canal (CDMX): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

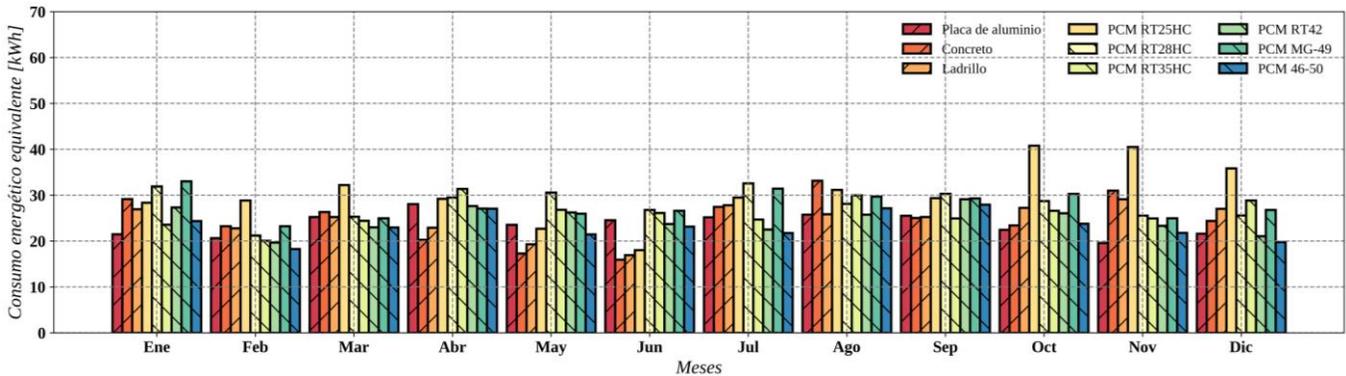
Al estimar el consumo eléctrico equivalente anual para los diferentes espesores evaluados, se determinó que para un espesor de $d = 0.35$ m se obtuvo un consumo total anual de 270.21 kWh para la ChSo-OC en la orientación Este, mientras que para la ChSo-TC fue de 508.21 kWh para la orientación Este-Oeste. La ChSo-TC casi duplicó el resultado obtenido por parte

de la ChSo-OC. Estos valores revelan la cantidad de energía requerida para activar un sistema activo que permita satisfacer los niveles de ventilación inducidos por las chimeneas solares.

En la Fig. F.9 se presentan los resultados correspondientes al estudio paramétrico de los materiales de la pared absorbente.



a)



b)

Figura F.9. Consumo energético equivalente variando pared absorbente (CDMX): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

Como se muestra en la Fig. F.9, no es clara la tendencia sobre que configuración presentó un mayor consumo eléctrico equivalente. Sin embargo, al realizar la sumatoria de todos los meses para obtener el consumo anual, se determinó que la ChSo-OC orientada al Este y al emplear un PCM RT35 HC induce suficiente flujo de aire equivalente al de un sistema activo cuyo consumo eléctrico anual es de 198.56 kWh, mientras que para la ChSo-TC el mejor desempeño se obtuvo a través de un PCM RT25 HC equivalente a 366.47 kWh orientada en

Este-Oeste. Es considerable el impacto del consumo eléctrico y ambiental si se estuviese implementando un sistema activo de ventilación mecánica.

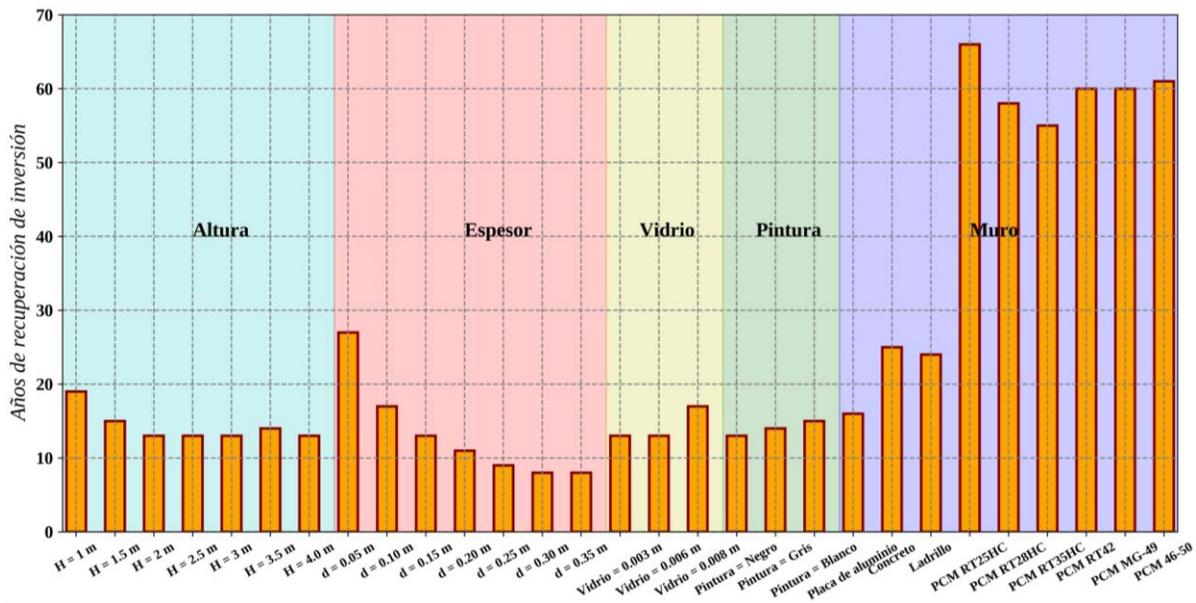
A partir del cálculo del consumo energético equivalente y del costo de construcción para las diferentes configuraciones de chimenea solar mostrado en la Tabla 7.1 se realizó la estimación de los años de recuperación de la inversión inicial para construir una ChSo-OC y ChSo-TC. En la Tabla F.2 se muestra el impacto económico del consumo energético equivalente por configuración de chimenea solar usando la Tarifa 1 de la CFE en un año para la orientación Este de la ChSo-OC y Este-Oeste de la ChSo-TC, mientras que en la Fig. F.10 se muestran los años de recuperación a partir del costo de inversión y del costo del consumo energético equivalente en todas las configuraciones evaluadas para orientaciones Oeste y Este-Oeste de la ChSo-OC y ChSo-TC respectivamente.

Tabla F.2. Costo anual del consumo energético equivalente para las configuraciones de chimenea solar (CDMX)

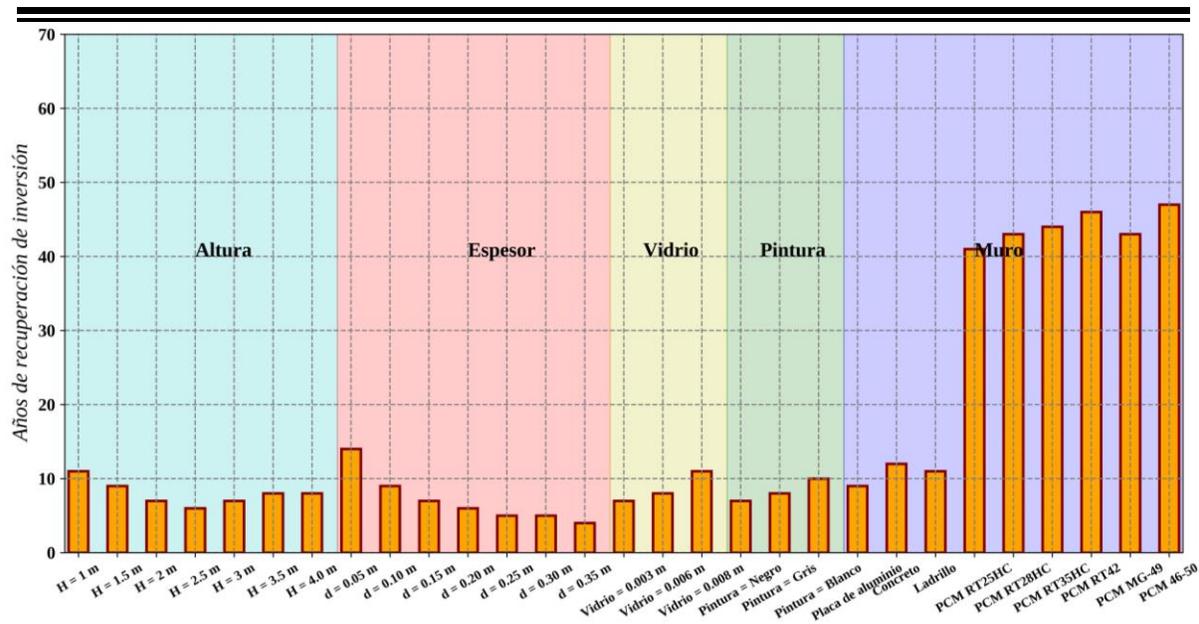
Configuración	ChSo-OC (orientación Este) Costo de consumo eléctrico [\$]	ChSo-TC (orientación Este-Oeste) Costo de consumo eléctrico [\$]
H = 1.0 m	316.68	595.66
H = 1.5 m	406.10	767.44
H = 2.0 m	484.37	918.33
H = 2.5 m	555.24	1055.32
H = 3.0 m	620.68	1182.12
H = 3.5 m	681.94	1300.99
H = 4.0 m	739.82	1413.45
d = 0.05 m	224.88	431.62
d = 0.10 m	365.28	695.45
d = 0.15 m	484.37	918.33
d = 0.20 m	591.75	1118.84
d = 0.25 m	691.36	1304.44
d = 0.30 m	785.30	1479.15
d = 0.35 m	874.89	1645.43
Vidrio 3mm	484.37	918.33
Vidrio 6mm	485.15	915.42
Vidrio 8mm	476.95	897.52
Pintura negra	484.37	918.33
Pintura gris	452.41	841.73
Pintura blanca	412.02	667.73
Placa Metálica	484.37	918.33
Concreto	367.17	961.66
Ladrillo	395.51	961.51
PCM RT25 HC	409.90	1189.76
PCM RT28 HC	553.10	1088.60

PCM RT35 HC	641.88	1012.73
PCM RT42	509.00	956.71
PCM MG-49	519.12	1079.93
PCM 46-50	489.05	905.27

Como se observa en la Tabla F.2, las configuraciones de ChSo-OC y ChSo-TC con mayor impacto en el consumo energético equivalente para inducir ventilación natural son aquellas donde se varía el espesor de canal (zona naranja), seguido de la altura de la chimenea solar (zona azul) y el material masivo empleado en el muro masivo (zona púrpura). El mayor costo del consumo energético equivalente de la ChSo-OC obtenido en un año de operación fue de \$874.89 MXN, mientras que para la ChSo-TC fue de \$1645.43 MXN, ambos valores se obtuvieron para una configuración de espesor de canal $d = 0.35$ m.



a)



b)

Figura F.10. Años de recuperación de inversión (CDMX): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

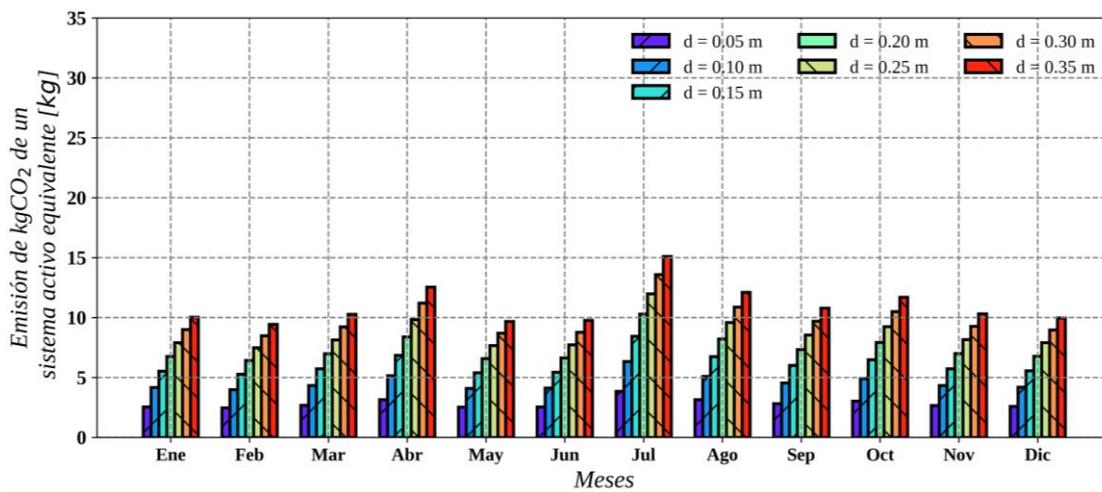
La Fig. F.10 muestra que los tiempos de recuperación de la inversión inicial para la construcción de la ChSo-OC y ChSo-TC bajo las condiciones de CDMX, son prolongados para las configuraciones que emplean PCM. El menor tiempo de recuperación para la ChSo-OC orientada al Este fue de ocho años al emplear un espesor $d = 0.35$ m. Entre los tiempos de recuperación más bajos en la evaluación de materiales masivos se encuentra el uso de concreto y ladrillo como materiales masivos (25 y 24 años respectivamente). El resto de las configuraciones sin PCM presentan un tiempo de recuperación menor a 28 años, mientras que las configuraciones de ChSo-OC con PCM presentan un tiempo de recuperación promedio de 60 años.

En el caso de la ChSo-TC el menor tiempo de recuperación se obtuvo de nueva cuenta con la configuración de espesor de $d = 0.35$ m el cual fue de cuatro años. El resto de las configuraciones sin PCM presentaron tiempos de recuperación menores a los 15 años. En el caso de los materiales masivos, las configuraciones de concreto y ladrillo fueron de las configuraciones con materiales masivos que menor tiempo de recuperación presentaron: ocho y diez años respectivamente. Las configuraciones con PCM presentaron tiempos de recuperación de 44 años en promedio. De igual forma que el caso de la ChSo-OC, es

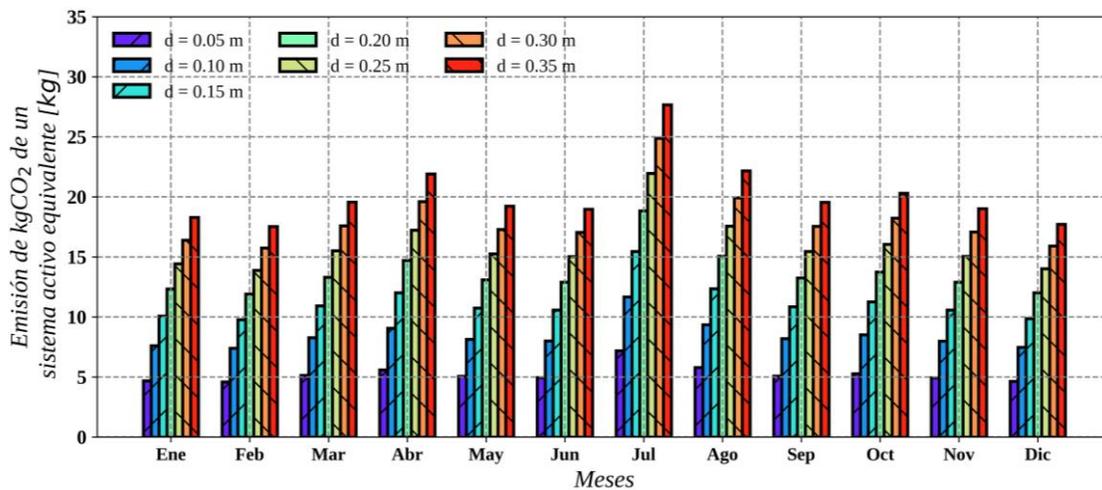
necesario buscar una configuración óptima que genere que el uso de los PCM en chimeneas solares sea rentable.

F.3. Toluca, Edo. de México

Para el estudio realizado bajo las condiciones de Toluca, en la Fig. F.11 se presenta el comportamiento anual de las mayores emisiones de dióxido de carbono que se están evitando a través del uso de la ChSo-OC y la ChSo-TC. Solo se presentan los resultados de la variación de espesores del canal, con el cual se obtuvieron los mejores resultados.



a)

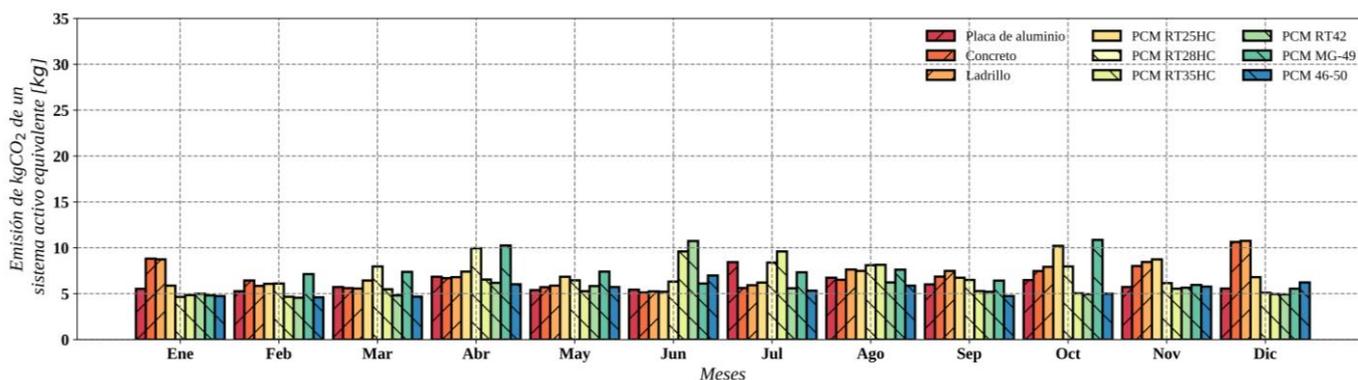


b)

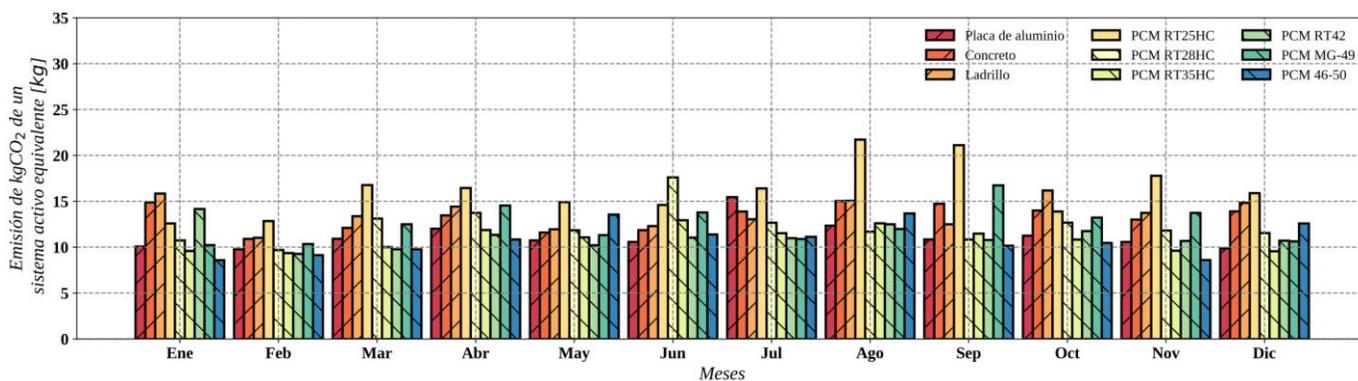
Figura F.11. Equivalencia de $kgCO_2$ en chimenea solar variando espesor del canal (Toluca): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

Como se muestra en la Fig. F.11, la capacidad de reducir contaminantes por medio de ChSo-TC es completamente superior al comportamiento de la ChSo-OC. En el estudio paramétrico del espesor del canal se observaron los mayores flujos de aire inducidos de todo el estudio paramétrico, lo que significa que bajo estas configuraciones se observa aún mayor la cantidad de kgCO_2 que no se está emitiendo a través del uso de sistemas activos. Para la ChSo-OC orientado al Este y empleando un espesor de $d=0.35\text{m}$ se estimaron hasta 131.73 kgCO_{2e} mientras que para la ChSo-TC esto se incrementó hasta 241.88 kgCO_{2e} , esto tomando en cuenta el año completo de evaluación.

En la Fig. F.12 se muestra el comportamiento de los kgCO_2 desde la perspectiva de las diferentes configuraciones de muro en ambos modelos de chimenea solar.



a)

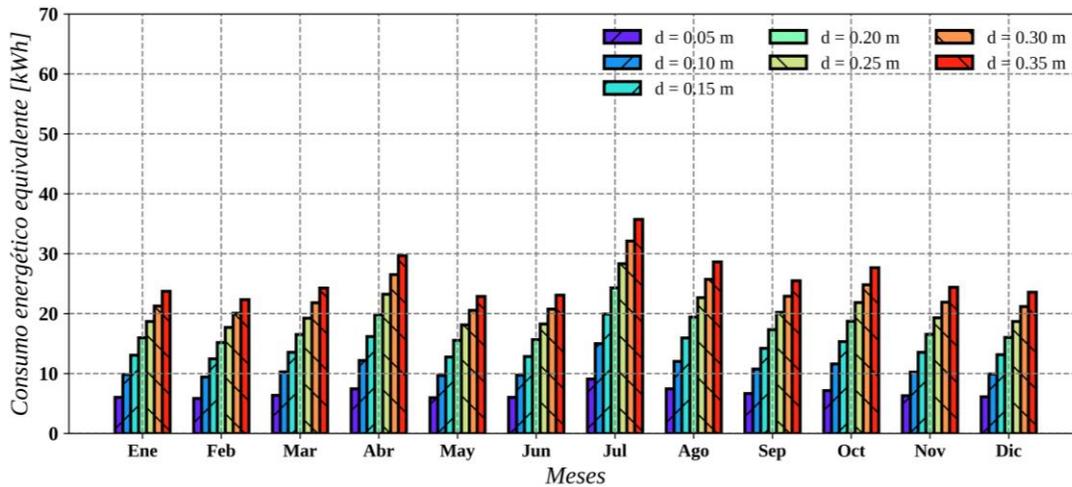


b)

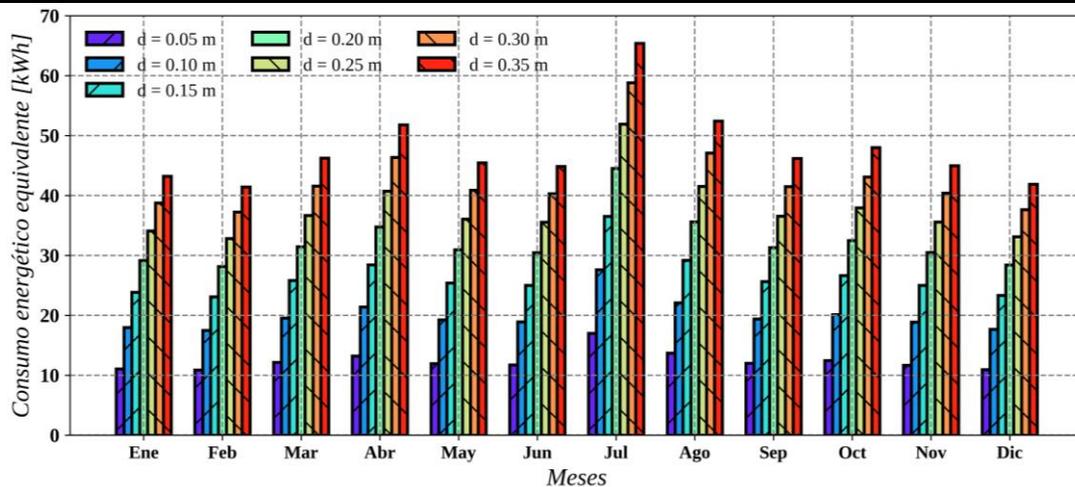
Figura F.12. Equivalencia de kgCO_2 en chimenea solar variando material de pared absorbente (Toluca): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

A diferencia del análisis en otros parámetros en ambas configuraciones de chimenea solar, no existe una tendencia a simple vista para determinar que configuración permitió obtener la mayor reducción de kgCO₂. Al considerar el efecto de emisión en todo el año, para el flujo de aire de la configuración de ChSo-OC con PCM MG-29 se estimó la mayor cantidad de kgCO₂, el cual fue de 86.83 kgCO₂ mientras que para la configuración de ChSo-TC con PCM RT25 HC se estimaron hasta 195.01 kgCO₂. Lo cual demuestra el impacto positivo de la combinación de sistemas pasivos con materiales de cambio de fase para cubrir las demandas de ventilación en edificaciones.

Para la potencia eléctrica de un sistema activo equivalente al flujo de aire inducido por las chimeneas solares, en la Fig. F.13 se muestran nuevamente los comportamientos de cada mes considerando los resultados con mejores desempeños de todo el estudio paramétrico.



a)

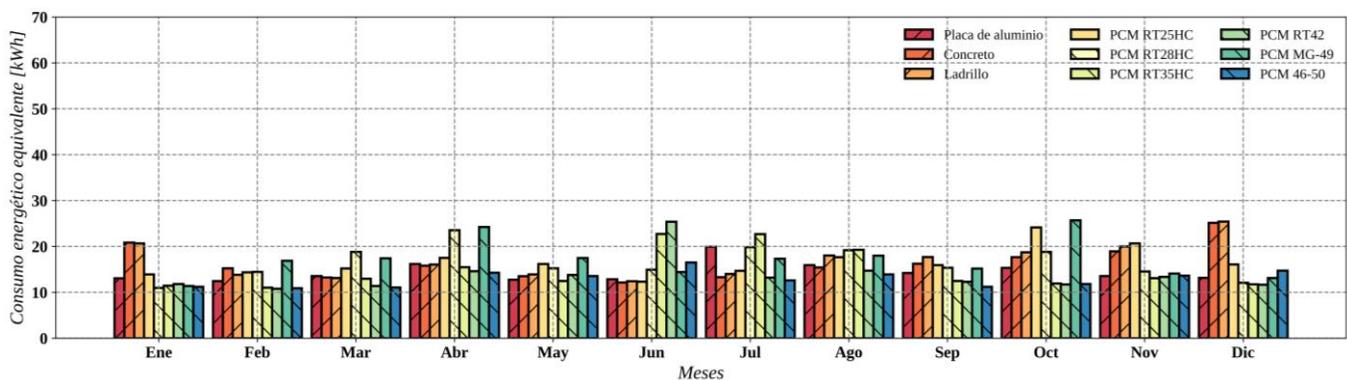


b)

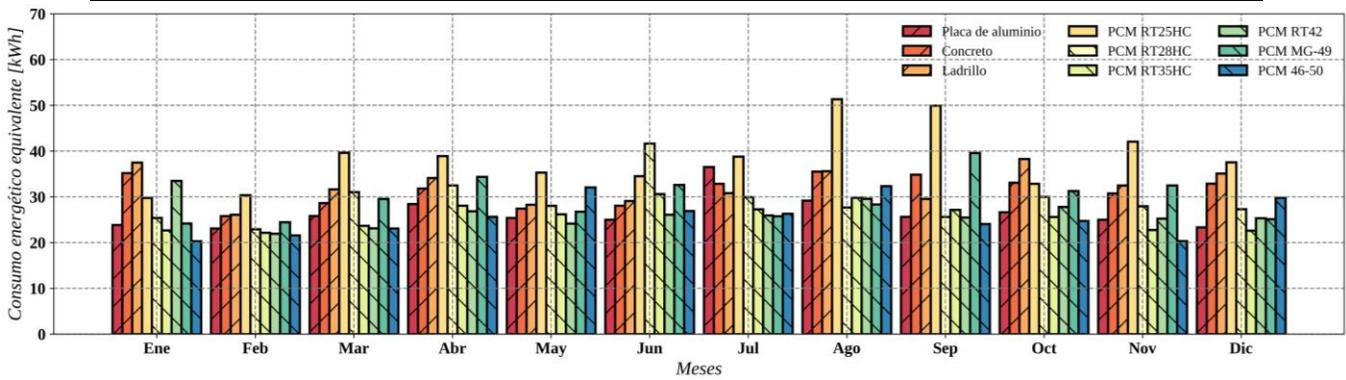
Figura F.13. Consumo energético equivalente variando espesor del canal (Toluca): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

Al estimar el consumo eléctrico equivalente anual para los diferentes espesores evaluados, se determinó que para un espesor de $d = 0.35$ m se obtuvo un consumo total anual de 311.42 kWh para la ChSo-OC en la orientación Este, mientras que para la ChSo-TC fue de 571.82 kWh para la orientación Este-Oeste. La ChSo-TC casi duplicó el resultado obtenido por parte de la ChSo-OC. Estos valores revelan la cantidad de energía requerida para activar un sistema activo que permita satisfacer los niveles de ventilación inducidos por las chimeneas solares.

En la Fig. F.14 se presentan los resultados correspondientes al estudio paramétrico de los materiales de la pared absorbente.



a)



b)

Figura F.14. Consumo energético equivalente variando pared absorbente (Toluca): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

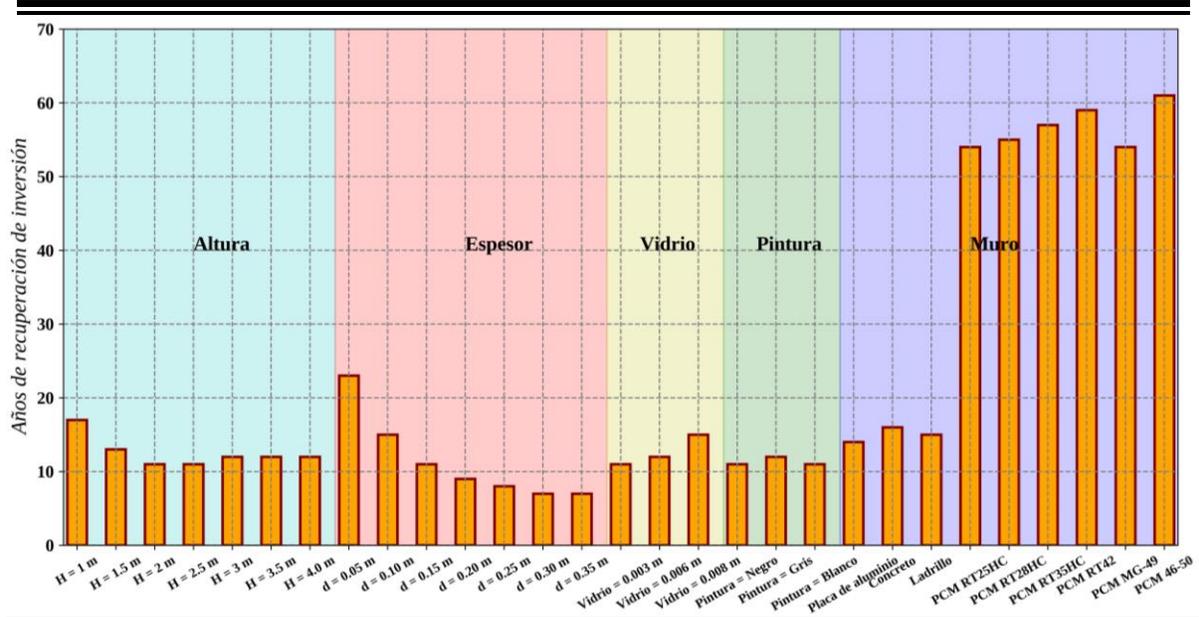
Como se muestra en la Fig. F.14, no es clara la tendencia sobre que configuración presentó un mayor consumo eléctrico equivalente. Sin embargo, al realizar la sumatoria de todos los meses para obtener el consumo anual, se determinó que la ChSo-OC orientada al Este y al emplear un PCM MG-29 induce suficiente flujo de aire equivalente al de un sistema activo cuyo consumo eléctrico anual es de 205.28 kWh, mientras que para la ChSo-TC el mejor desempeño se obtuvo a través de un PCM RT25 HC equivalente a 461.02 kWh orientada en Este-Oeste. Es considerable el impacto del consumo eléctrico y ambiental si se estuviese implementando un sistema activo de ventilación mecánica.

A partir del cálculo del consumo energético equivalente y del costo de construcción para las diferentes configuraciones de chimenea solar mostrado en la Tabla 7.1, se realizó la estimación de los años de recuperación de la inversión inicial para construir una ChSo-OC y ChSo-TC. En la Tabla F.3 se muestra el impacto económico del consumo energético equivalente por configuración de chimenea solar usando la Tarifa 1 de la CFE en un año para la orientación Este de la ChSo-OC y Este-Oeste de la ChSo-TC, mientras que en la Fig. F.15 se muestran los años de recuperación a partir del costo de inversión y del costo del consumo energético equivalente en todas las configuraciones evaluadas para orientaciones Oeste y Este-Oeste de la ChSo-OC y ChSo-TC respectivamente.

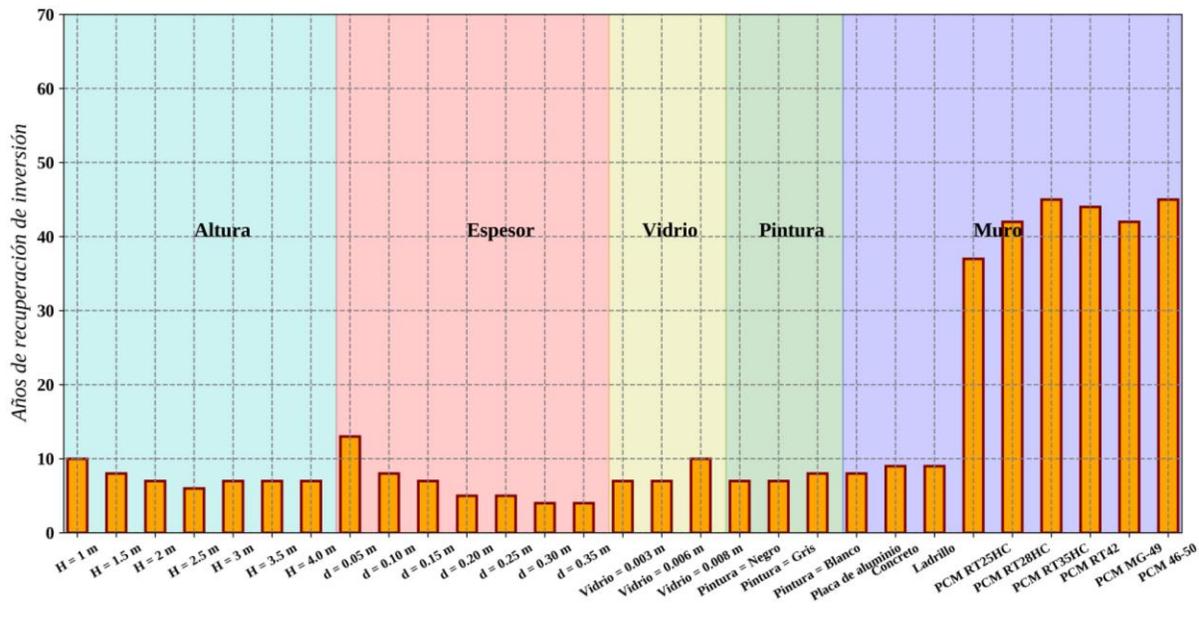
Tabla F.3 Costo anual del consumo energético equivalente para las configuraciones de chimenea solar (Toluca)

Configuración	ChSo-OC (orientación Este) Costo de consumo eléctrico [\\$]	ChSo-TC (orientación Este-Oeste) Costo de consumo eléctrico [\\$]
H = 1.0 m	370.53	676.18
H = 1.5 m	471.35	864.07
H = 2.0 m	560.62	1029.86
H = 2.5 m	640.49	1180.38
H = 3.0 m	715.48	1319.61
H = 3.5 m	785.25	1450.07
H = 4.0 m	850.11	1573.46
d = 0.05 m	260.88	481.77
d = 0.10 m	423.32	778.56
d = 0.15 m	560.62	1029.86
d = 0.20 m	683.93	1256.09
d = 0.25 m	798.28	1465.94
d = 0.30 m	906.17	1663.87
d = 0.35 m	1009.17	1852.53
Vidrio 3mm	560.62	1029.86
Vidrio 6mm	555.57	1018.01
Vidrio 8mm	545.83	997.77
Pintura negra	560.62	1029.86
Pintura gris	530.15	963.19
Pintura blanca	602.03	876.18
Placa Metálica	560.62	1029.86
Concreto	641.02	1221.68
Ladrillo	662.13	1259.11
PCM RT25 HC	644.99	1495.63
PCM RT28 HC	640.56	1133.48
PCM RT35 HC	574.84	999.52
PCM RT42	533.95	1020.09
PCM MG-49	665.02	1149.20
PCM 46-50	503.78	995.85

Como se observa en la Tabla F.3, las configuraciones de ChSo-OC y ChSo-TC con mayor impacto en el consumo energético equivalente para inducir ventilación natural son aquellas donde se varía el espesor de canal (zona naranja), seguido de la altura de la chimenea solar (zona azul) y el material masivo empleado en el muro masivo (zona purpura). El mayor costo del consumo energético equivalente de la ChSo-OC obtenido en un año de operación fue de \$1009.17 MXN, mientras que para la ChSo-TC fue de \$1852.53 MXN, ambos valores se obtuvieron para una configuración de espesor de canal $d = 0.35$ m.



a)



b)

Figura F.15 Años de recuperación de inversión (Toluca): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

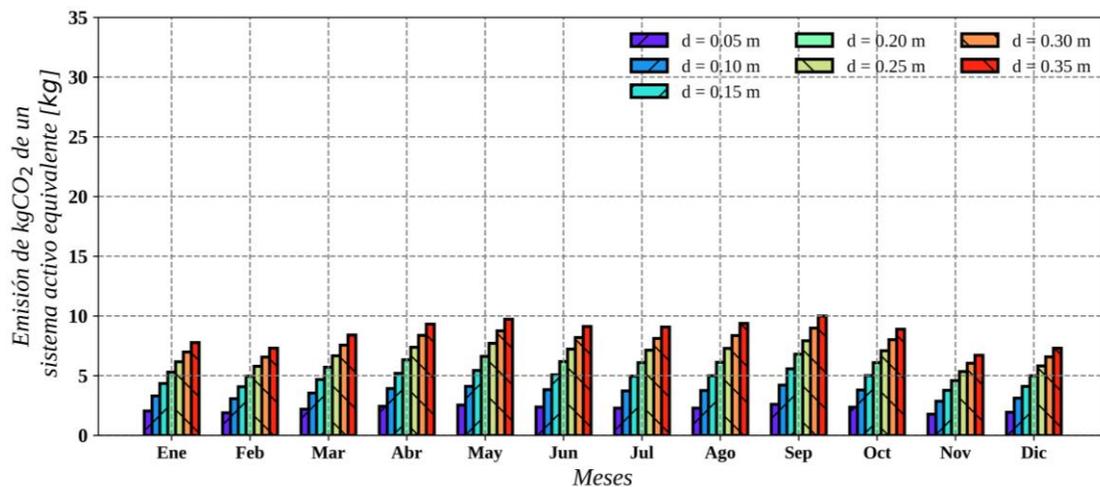
La Fig. F.15 muestra que los tiempos de recuperación de la inversión inicial para la construcción de la ChSo-OC y ChSo-TC bajo las condiciones de Toluca, son prolongados para las configuraciones que emplean PCM. El menor tiempo de recuperación para la ChSo-OC orientada al Este fue de siete años al emplear un espesor $d = 0.35$ m. Entre los tiempos de recuperación más bajos en la evaluación de materiales masivos se encuentra el uso de

concreto y ladrillo como materiales masivos (16 y 15 años respectivamente). El resto de las configuraciones sin PCM presentan un tiempo de recuperación menor a 24 años, mientras que las configuraciones de ChSo-OC con PCM presentan un tiempo de recuperación promedio de 57 años.

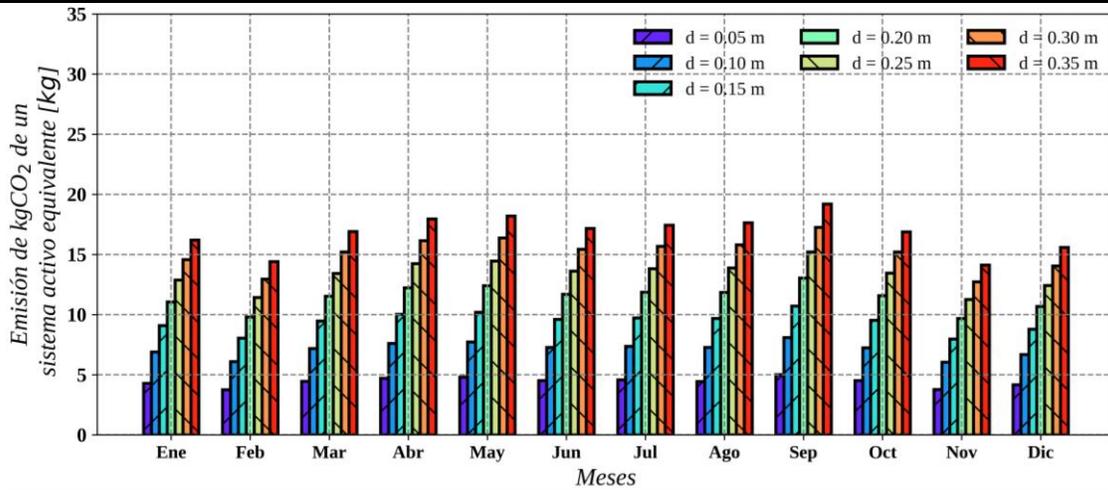
En el caso de la ChSo-TC el menor tiempo de recuperación se obtuvo de nueva cuenta con la configuración de espesor de $d = 0.35$ m el cual fue de cuatro años. El resto de las configuraciones sin PCM presentaron tiempos de recuperación menores a los 14 años. En el caso de los materiales masivos, las configuraciones de concreto y ladrillo fueron de las configuraciones con materiales masivos que menor tiempo de recuperación presentaron: nueve años. Las configuraciones con PCM presentaron tiempos de recuperación de 43 años en promedio. De igual forma que el caso de la ChSo-OC, es necesario buscar una configuración óptima que genere que el uso de los PCM en chimeneas solares sea rentable.

F.4. Villahermosa, Tabasco

Para el estudio realizado bajo las condiciones de Villahermosa, en la Fig. F.16 se presenta el comportamiento anual de las mayores emisiones de dióxido de carbono que se están evitando a través del uso de la ChSo-OC y la ChSo-TC. Solo se presentan los resultados de la variación de espesores del canal, con el cual se obtuvieron los mejores resultados.



a)

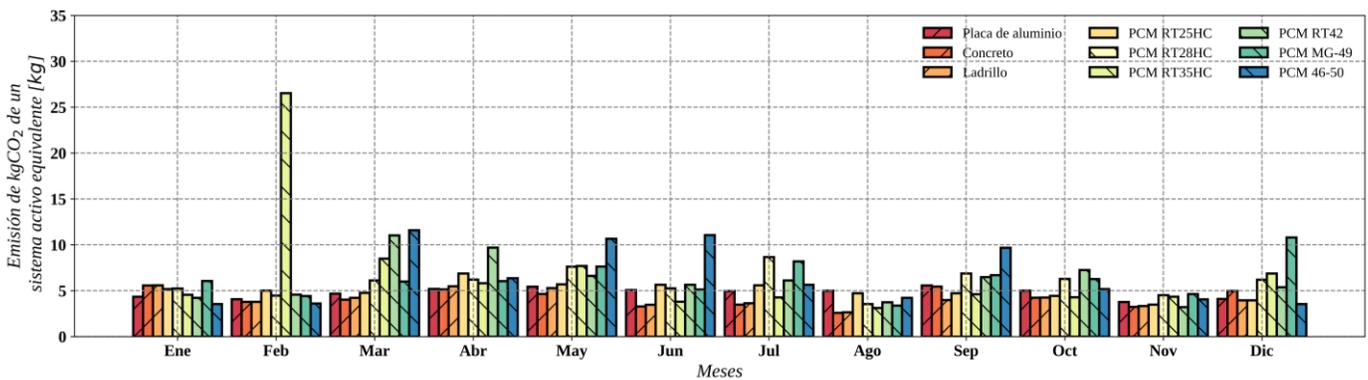


b)

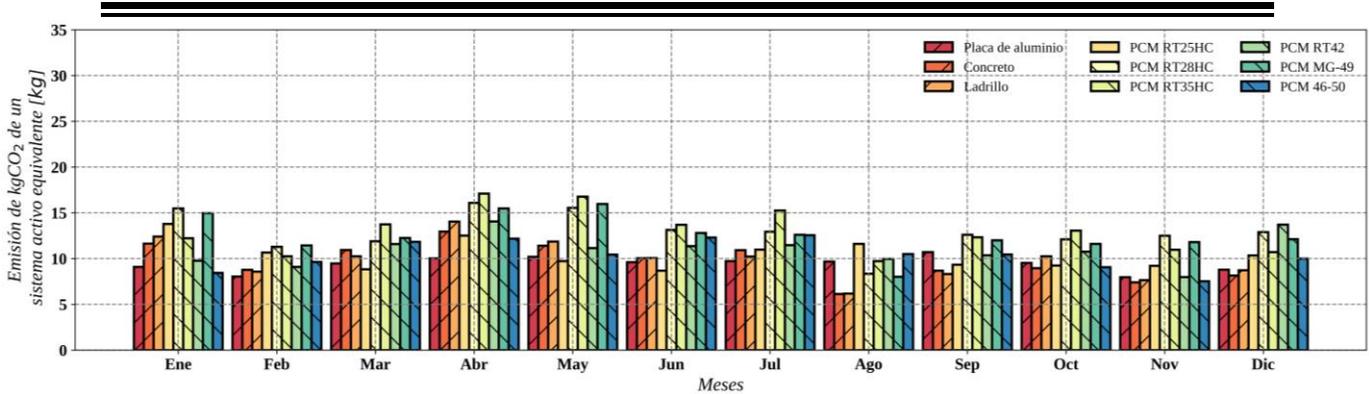
Figura F.16. Equivalencia de $kgCO_2$ en chimenea solar variando espesor del canal (Villahermosa): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

Como se muestra en la Fig. F.16, la capacidad de reducir contaminantes por medio de ChSo-TC es completamente superior al comportamiento de la ChSo-OC. En el estudio paramétrico del espesor del canal se observaron los mayores flujos de aire inducidos de todo el estudio paramétrico, lo que significa que bajo estas configuraciones se observa aún mayor la cantidad de $kgCO_2$ que no se está emitiendo a través del uso de sistemas activos. Para la ChSo-OC orientado al Este y empleando un espesor de $d=0.35m$ se estimaron hasta $103.01 kgCO_{2e}$ mientras que para la ChSo-TC esto se incrementó hasta $201.69 kgCO_{2e}$, esto tomando en cuenta el año completo de evaluación.

En la Fig. F.17 se muestra el comportamiento de los $kgCO_2$ desde la perspectiva de las diferentes configuraciones de muro en ambos modelos de chimenea solar.



a)

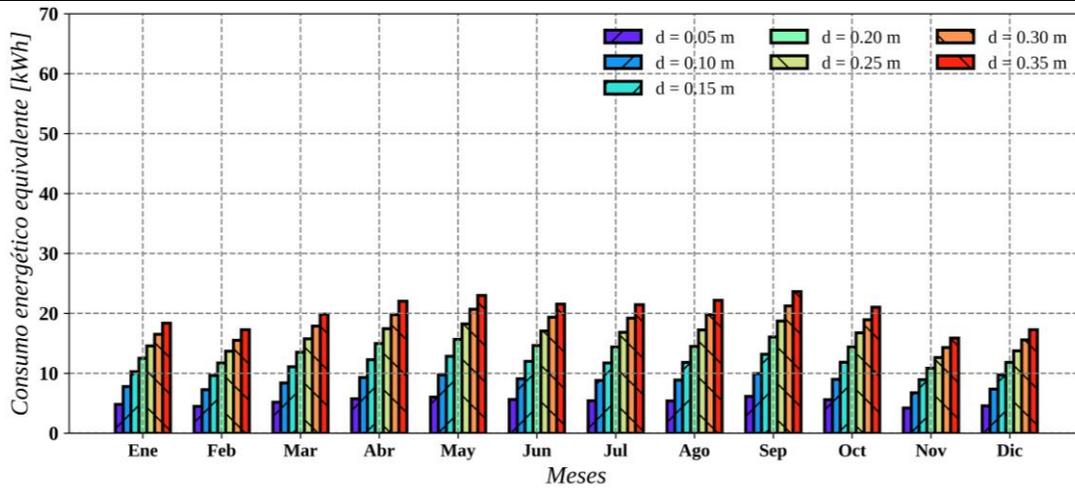


b)

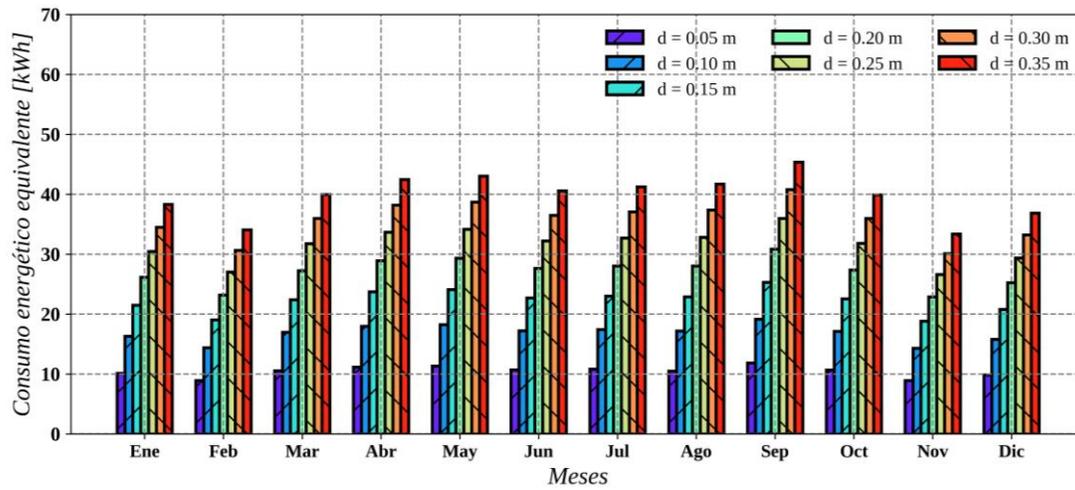
Figura F.17. Equivalencia de kgCO_2 en chimenea solar variando material de pared absorbente (Villahermosa): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

A diferencia del análisis en otros parámetros en ambas configuraciones de chimenea solar, no existe una tendencia a simple vista para determinar que configuración permitió obtener la mayor reducción de kgCO_2 . Al considerar el efecto de emisión en todo el año, para el flujo de aire de la configuración de ChSo-OC con PCM RT35 HC se estimó la mayor cantidad de kgCO_2 , el cual fue de 84.44 kgCO_2 mientras que para la configuración de ChSo-TC con PCM RT35 HC se estimaron hasta 155.88 kgCO_2 . Lo cual demuestra el impacto positivo de la combinación de sistemas pasivos con materiales de cambio de fase para cubrir las demandas de ventilación en edificaciones.

Para la potencia eléctrica de un sistema activo equivalente al flujo de aire inducido por las chimeneas solares, en la Fig. F.18 se muestran nuevamente los comportamientos de cada mes considerando los resultados con mejores desempeños de todo el estudio paramétrico.



a)

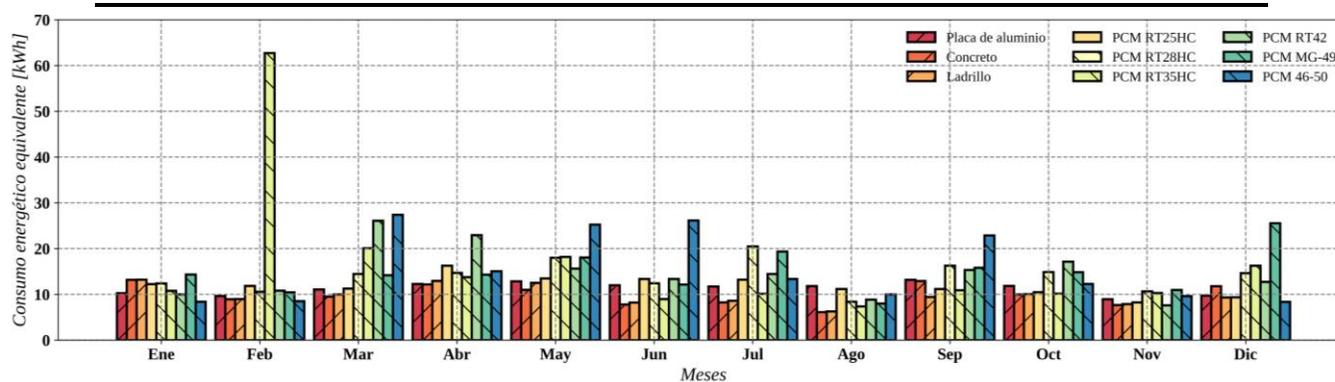


b)

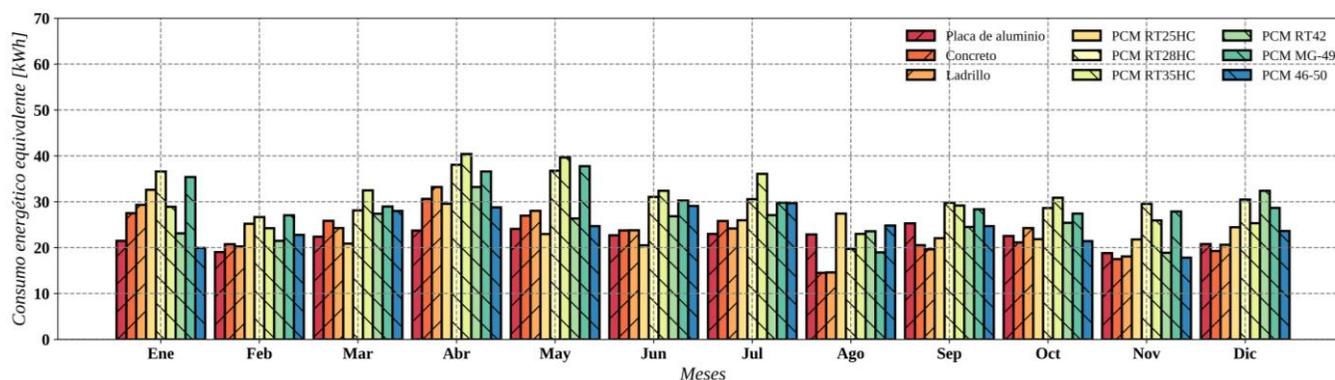
Figura F.18. Consumo energético equivalente variando espesor del canal (Villahermosa):
 a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

Al estimar el consumo eléctrico equivalente anual para los diferentes espesores evaluados, se determinó que para un espesor de $d = 0.35$ m se obtuvo un consumo total anual de 243.53 kWh para la ChSo-OC en la orientación Este, mientras que para la ChSo-TC fue de 476.82 kWh para la orientación Este-Oeste. La ChSo-TC casi duplicó el resultado obtenido por parte de la ChSo-OC. Estos valores revelan la cantidad de energía requerida para activar un sistema activo que permita satisfacer los niveles de ventilación inducidos por las chimeneas solares.

En la Fig. F.19 se presentan los resultados correspondientes al estudio paramétrico de los materiales de la pared absorbente.



a)



b)

Figura F.19. Consumo energético equivalente variando pared absorbente (Villahermosa):
a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

Como se muestra en la Fig. F.19, no es clara la tendencia sobre que configuración presentó un mayor consumo eléctrico equivalente. Sin embargo, al realizar la sumatoria de todos los meses para obtener el consumo anual, se determinó que la ChSo-OC orientada al Este y al emplear un PCM RT35 HC induce suficiente flujo de aire equivalente al de un sistema activo cuyo consumo eléctrico anual es de 199.63 kWh, mientras que para la ChSo-TC el mejor desempeño se obtuvo a través de un PCM RT35 HC equivalente a 368.52 kWh orientada en Este-Oeste. Es considerable el impacto del consumo eléctrico y ambiental si se estuviese implementando un sistema activo de ventilación mecánica.

A partir del cálculo del consumo energético equivalente y del costo de construcción para las diferentes configuraciones de chimenea solar mostrado en la Tabla 7.1, se realizó la estimación de los años de recuperación de la inversión inicial para construir una ChSo-OC y ChSo-TC. En la Tabla F.4 se muestra el impacto económico del consumo energético

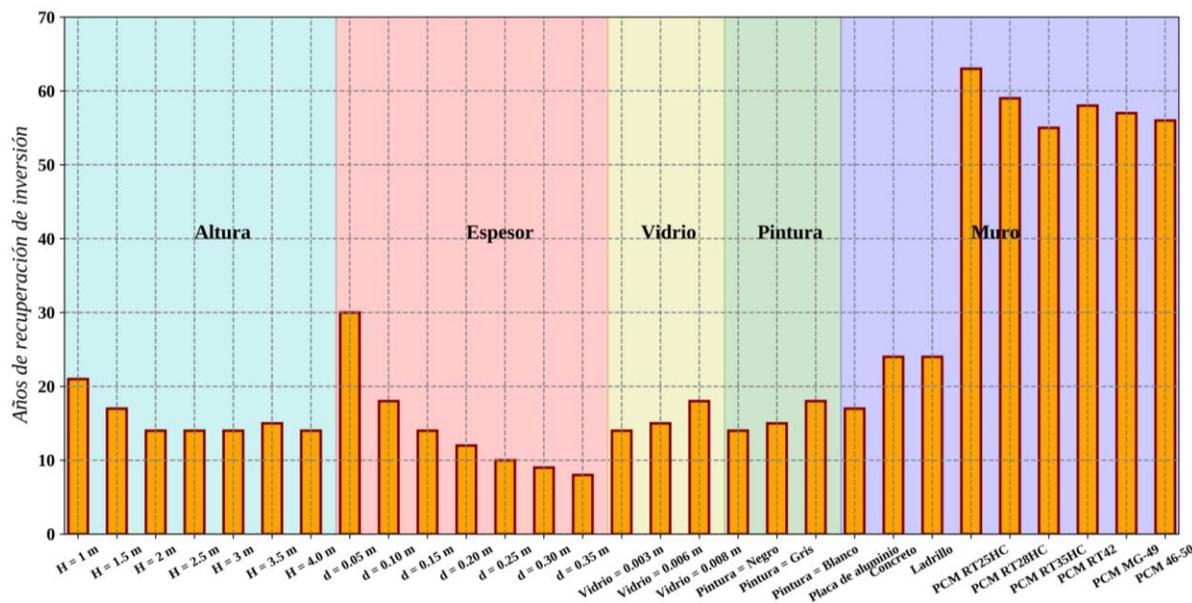
equivalente por configuración de chimenea solar usando la Tarifa 1F de la CFE en un año para la orientación Este de la ChSo-OC y Este-Oeste de la ChSo-TC, mientras que en la Fig. F.20 se muestran los años de recuperación a partir del costo de inversión y del costo del consumo energético equivalente en todas las configuraciones evaluadas para orientaciones Oeste y Este-Oeste de la ChSo-OC y ChSo-TC respectivamente.

Tabla F.4. Costo anual del consumo energético equivalente para las configuraciones de chimenea solar (Villahermosa)

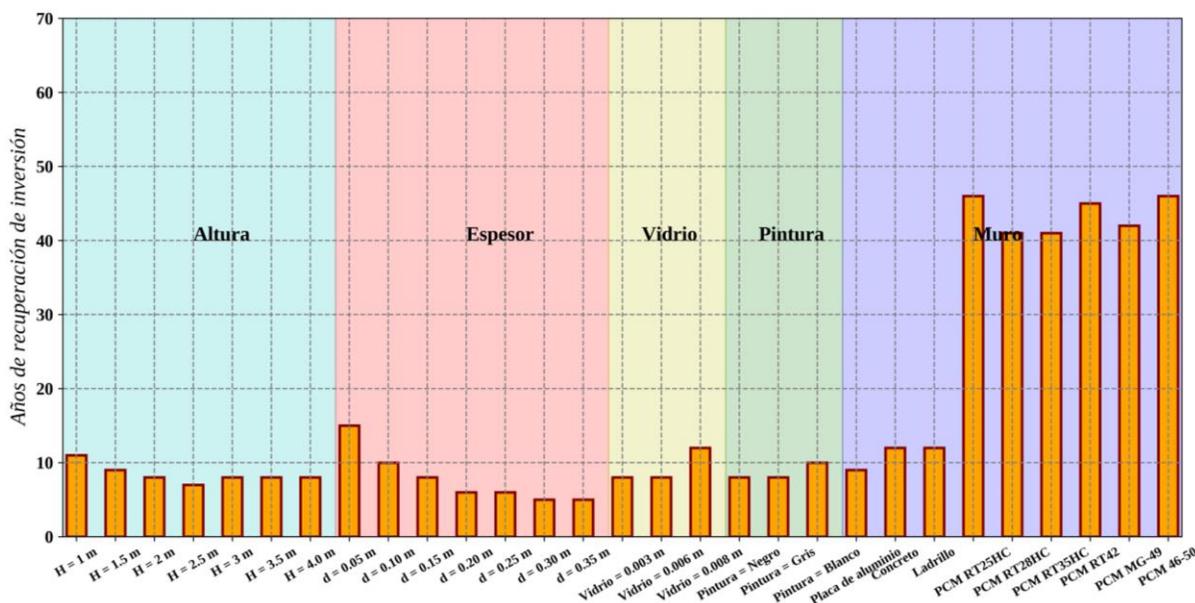
Configuración	ChSo-OC (orientación Este) Costo de consumo eléctrico [\$]	ChSo-TC (orientación Este-Oeste) Costo de consumo eléctrico [\$]
H = 1.0 m	285.96	559.70
H = 1.5 m	367.21	721.70
H = 2.0 m	438.39	864.07
H = 2.5 m	502.89	993.38
H = 3.0 m	562.50	1113.09
H = 3.5 m	618.31	1225.37
H = 4.0 m	671.07	1331.62
d = 0.05 m	204.87	405.95
d = 0.10 m	331.48	654.46
d = 0.15 m	438.39	864.07
d = 0.20 m	534.46	1052.11
d = 0.25 m	624.26	1225.81
d = 0.30 m	708.53	1389.08
d = 0.35 m	788.69	1544.29
Vidrio 3mm	438.39	864.07
Vidrio 6mm	437.82	862.56
Vidrio 8mm	429.87	846.29
Pintura negra	438.39	864.07
Pintura gris	403.72	792.68
Pintura blanca	337.81	619.04
Placa Metálica	438.39	864.07
Concreto	386.38	886.05
Ladrillo	379.51	905.94
PCM RT25 HC	459.26	955.40
PCM RT28 HC	544.00	1184.35
PCM RT35 HC	641.58	1192.31
PCM RT42	565.44	1005.39
PCM MG-49	577.59	1155.22
PCM 46-50	605.32	956.18

Como se observa en la Tabla F.4, las configuraciones de ChSo-OC y ChSo-TC con mayor impacto en el consumo energético equivalente para inducir ventilación natural son aquellas donde se varía el espesor de canal (zona naranja), seguido de la altura de la chimenea solar (zona azul) y el material masivo empleado en el muro masivo (zona purpura). El mayor costo

del consumo energético equivalente de la ChSo-OC obtenido en un año de operación fue de \$788.69 MXN, mientras que para la ChSo-TC fue de \$1544.29 MXN, ambos valores se obtuvieron para una configuración de espesor de canal $d = 0.35$ m.



a)



b)

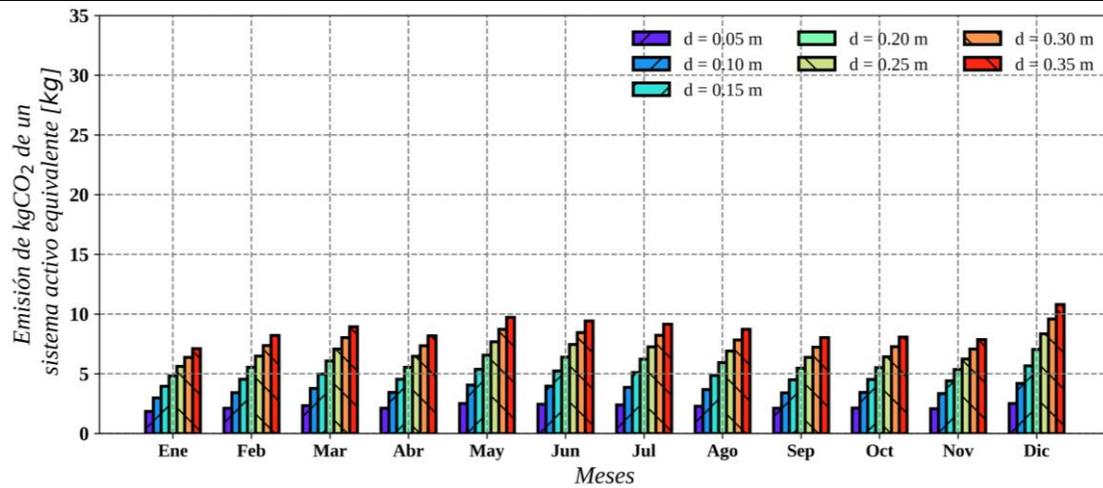
Figura F.20. Años de recuperación de inversión (Villahermosa): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

La Fig. F.20 muestra que los tiempos de recuperación de la inversión inicial para la construcción de la ChSo-OC y ChSo-TC bajo las condiciones de Villahermosa, son prolongados para las configuraciones que emplean PCM. El menor tiempo de recuperación para la ChSo-OC orientada al Este fue de ocho años al emplear un espesor $d = 0.35$ m. Entre los tiempos de recuperación más bajos en la evaluación de materiales masivos se encuentra el uso de concreto y ladrillo como materiales masivos (24 años). El resto de las configuraciones sin PCM presentan un tiempo de recuperación menor a 31 años, mientras que las configuraciones de ChSo-OC con PCM presentan un tiempo de recuperación promedio de 58 años.

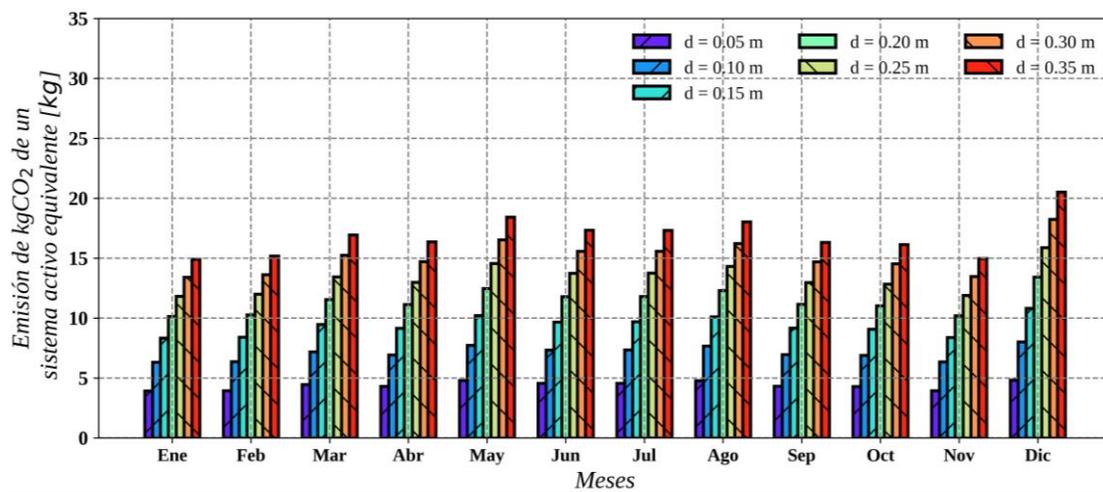
En el caso de la ChSo-TC el menor tiempo de recuperación se obtuvo de nueva cuenta con la configuración de espesor de $d = 0.35$ m el cual fue de cinco años. El resto de las configuraciones sin PCM presentaron tiempos de recuperación menores a los 16 años. En el caso de los materiales masivos, las configuraciones de concreto y ladrillo fueron de las configuraciones con materiales masivos que menor tiempo de recuperación presentaron: 12 años. Las configuraciones con PCM presentaron tiempos de recuperación de 44 años en promedio. De igual forma que el caso de la ChSo-OC, es necesario buscar una configuración óptima que genere que el uso de los PCM en chimeneas solares sea rentable.

F.5. Mérida, Yucatán

Para el estudio realizado bajo las condiciones de Mérida, en la Fig. F.21 se presenta el comportamiento anual de las mayores emisiones de dióxido de carbono que se están evitando a través del uso de la ChSo-OC y la ChSo-TC. Solo se presentan los resultados de la variación de espesores del canal, con el cual se obtuvieron los mejores resultados.



a)

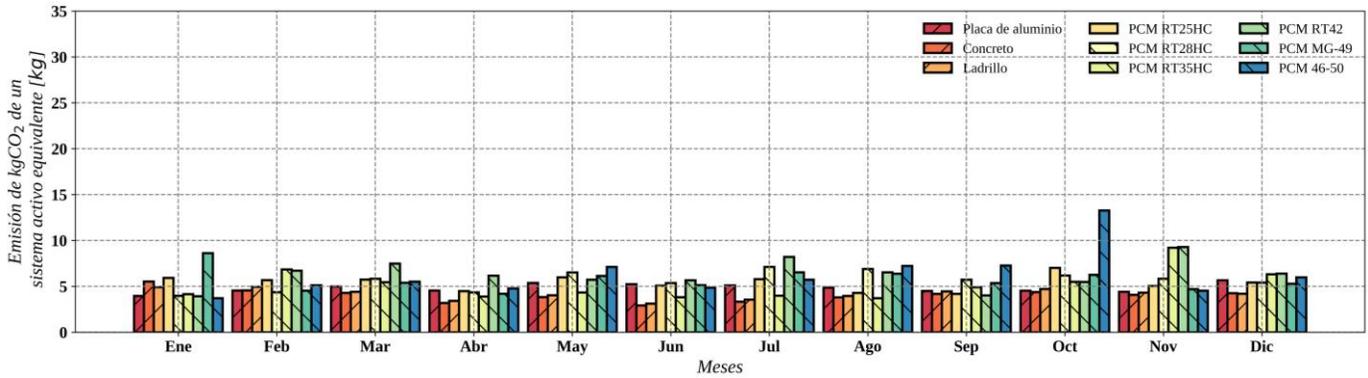


b)

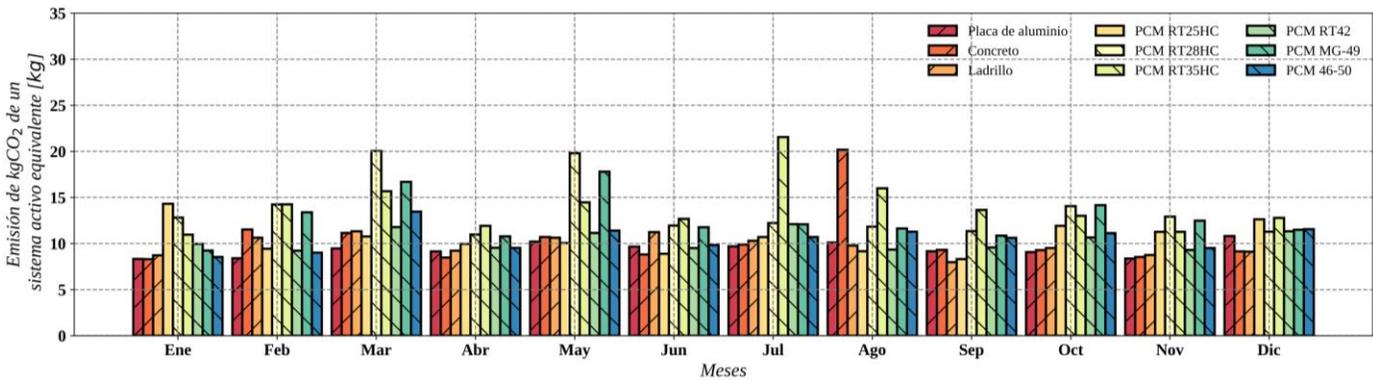
Figura F.21. Equivalencia de kgCO_2 en chimenea solar variando espesor del canal (Mérida): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

Como se muestra en la Fig. F.21, la capacidad de reducir contaminantes por medio de ChSo-TC es completamente superior al comportamiento de la ChSo-OC. En el estudio paramétrico del espesor del canal se observaron los mayores flujos de aire inducidos de todo el estudio paramétrico, lo que significa que bajo estas configuraciones se observa aún mayor la cantidad de kgCO_2 que no se está emitiendo a través del uso de sistemas activos. Para la ChSo-OC orientado al Este y empleando un espesor de $d=0.35\text{m}$ se estimaron hasta 104.25 kgCO_{2e} mientras que para la ChSo-TC esto se incrementó hasta 202.44 kgCO_{2e} , esto tomando en cuenta el año completo de evaluación.

En la Fig. F.22 se muestra el comportamiento de los kgCO₂ desde la perspectiva de las diferentes configuraciones de muro en ambos modelos de chimenea solar.



a)

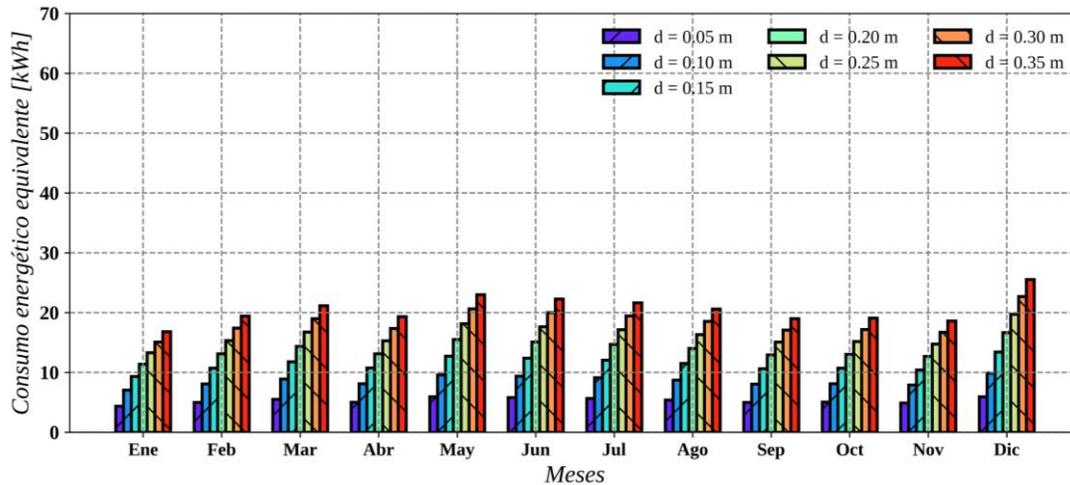


b)

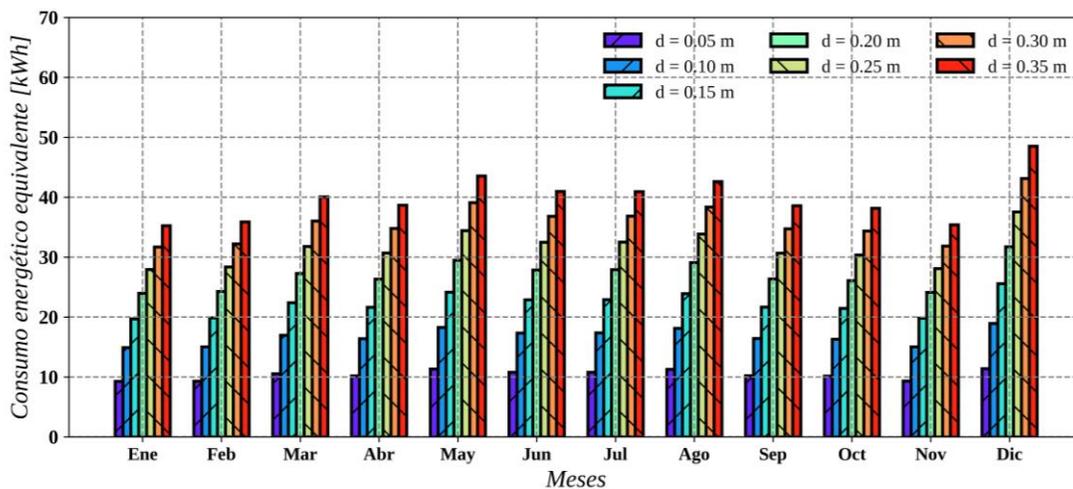
Figura F.22. Equivalencia de kgCO₂ en chimenea solar variando material de pared absorbente (Tabasco): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

A diferencia del análisis en otros parámetros en ambas configuraciones de chimenea solar, no existe una tendencia a simple vista para determinar que configuración permitió obtener la mayor reducción de kgCO₂. Al considerar el efecto de emisión en todo el año, para el flujo de aire de la configuración de ChSo-OC con PCM RT42 se estimó la mayor cantidad de kgCO₂, el cual fue de 75.605 kgCO₂ mientras que para la configuración de ChSo-TC con PCM RT35 HC se estimaron hasta 168.26 kgCO₂. Lo cual demuestra el impacto positivo de la combinación de sistemas pasivos con materiales de cambio de fase para cubrir las demandas de ventilación en edificaciones.

Para la potencia eléctrica de un sistema activo equivalente al flujo de aire inducido por las chimeneas solares, en la Fig. F.23 se muestran nuevamente los comportamientos de cada mes considerando los resultados con mejores desempeños de todo el estudio paramétrico.



a)



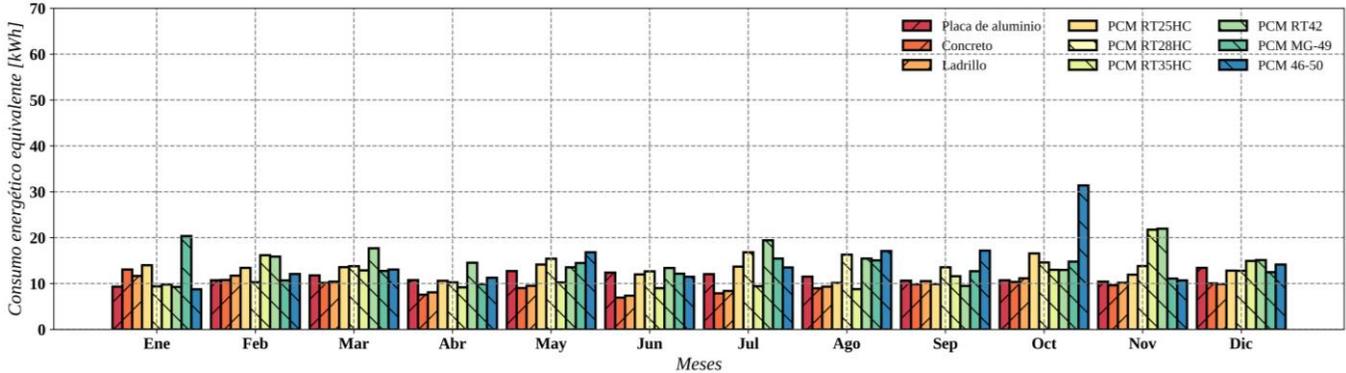
b)

Figura F.23. Consumo energético equivalente variando espesor del canal (Mérida): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

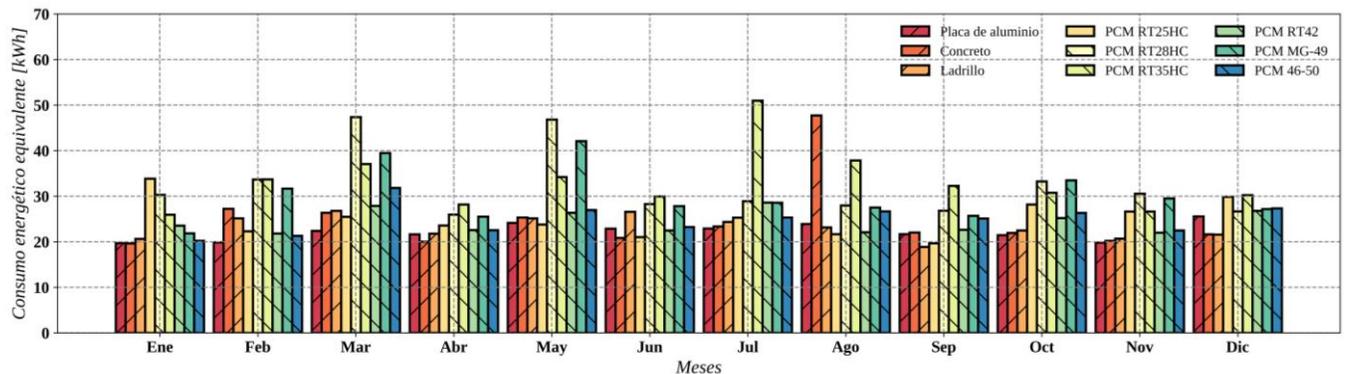
Al estimar el consumo eléctrico equivalente anual para los diferentes espesores evaluados, se determinó que para un espesor de $d = 0.35$ m se obtuvo un consumo total anual de 246.46 kWh para la ChSo-OC en la orientación Este, mientras que para la ChSo-TC fue de 478.58 kWh para la orientación Este-Oeste. La ChSo-TC casi duplicó el resultado obtenido por parte

de la ChSo-OC. Estos valores revelan la cantidad de energía requerida para activar un sistema activo que permita satisfacer los niveles de ventilación inducidos por las chimeneas solares.

En la Fig. F.24 se presentan los resultados correspondientes al estudio paramétrico de los materiales de la pared absorbente.



a)



b)

Figura F.24. Consumo energético equivalente variando pared absorbente (Mérida): a) ChSo-OC orientación Este b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

Como se muestra en la Fig. F.24, no es clara la tendencia sobre que configuración presentó un mayor consumo eléctrico equivalente. Sin embargo, al realizar la sumatoria de todos los meses para obtener el consumo anual, se determinó que la ChSo-OC orientada al Este y al emplear un PCM RT42 induce suficiente flujo de aire equivalente al de un sistema activo cuyo consumo eléctrico anual es de 178.73 kWh, mientras que para la ChSo-TC el mejor desempeño se obtuvo a través de un PCM RT35 HC equivalente a 397.79 kWh orientada en

Este-Oeste. Es considerable el impacto del consumo eléctrico y ambiental si se estuviese implementando un sistema activo de ventilación mecánica.

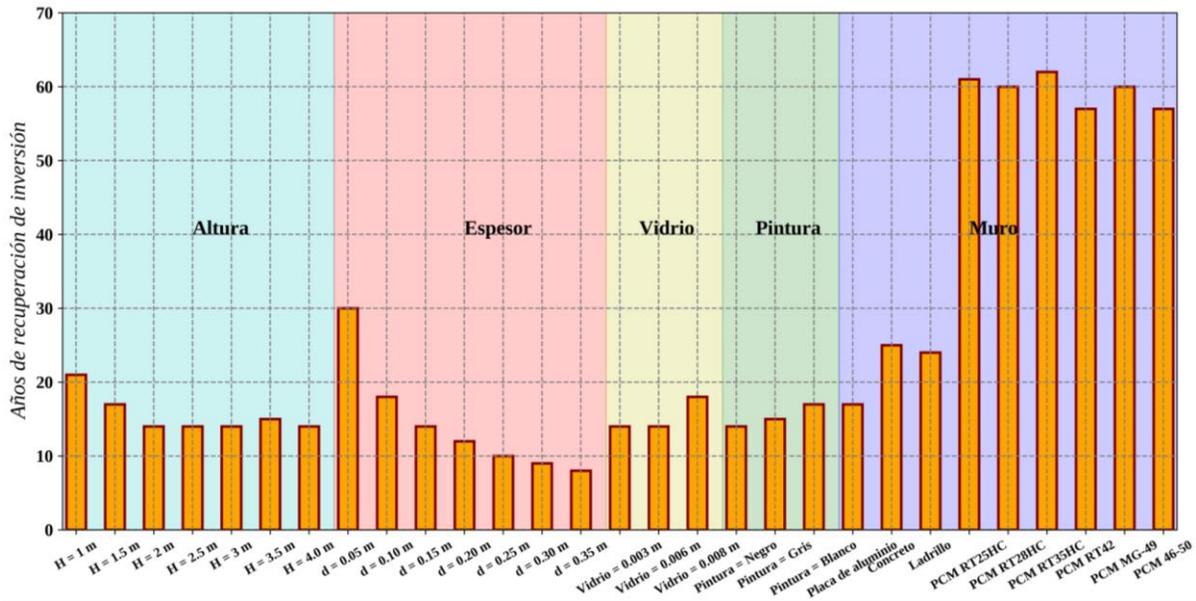
A partir del cálculo del consumo energético equivalente y del costo de construcción para las diferentes configuraciones de chimenea solar mostrado en la Tabla 7.1, se realizó la estimación de los años de recuperación de la inversión inicial para construir una ChSo-OC y ChSo-TC. En la Tabla F.5 se muestra el impacto económico del consumo energético equivalente por configuración de chimenea solar usando la Tarifa 1F de la CFE en un año para la orientación Este de la ChSo-OC y Este-Oeste de la ChSo-TC, mientras que en la Fig. F.25 se muestran los años de recuperación a partir del costo de inversión y del costo del consumo energético equivalente en todas las configuraciones evaluadas para orientaciones Oeste y Este-Oeste de la ChSo-OC y ChSo-TC respectivamente.

Tabla F.5 Costo anual del consumo energético equivalente para las configuraciones de chimenea solar (Mérida)

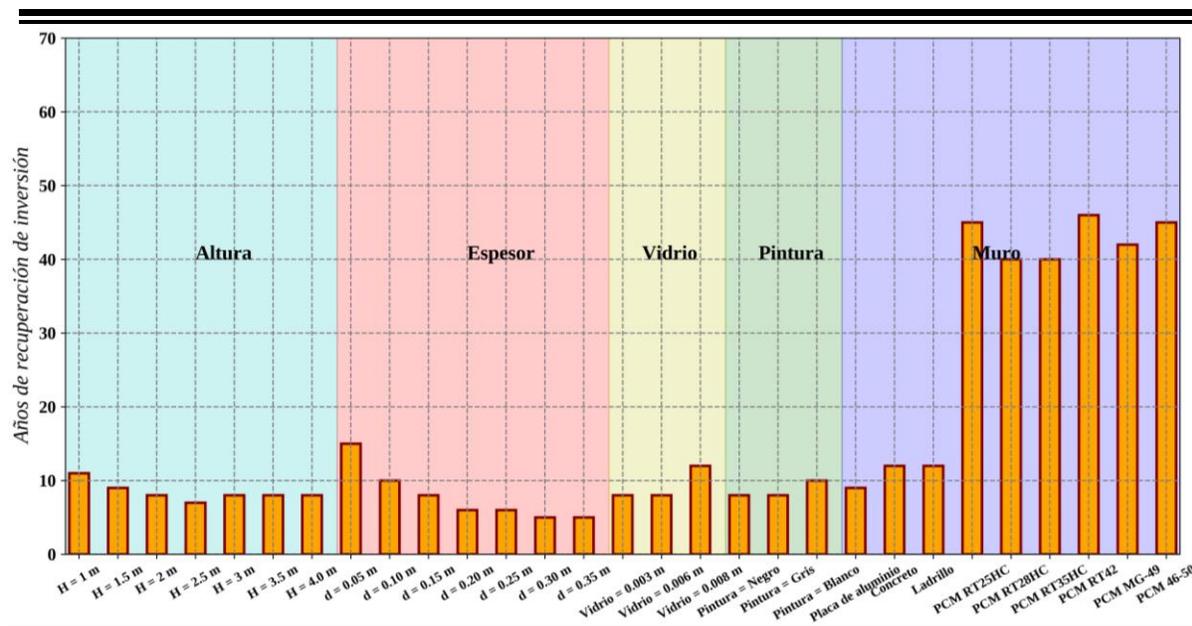
Configuración	ChSo-OC (orientación Este) Costo de consumo eléctrico [\$]	ChSo-TC (orientación Este-Oeste) Costo de consumo eléctrico [\$]
H = 1.0 m	288.81	558.73
H = 1.5 m	370.59	720.16
H = 2.0 m	442.31	861.99
H = 2.5 m	507.28	990.74
H = 3.0 m	567.34	1109.92
H = 3.5 m	623.59	1221.65
H = 4.0 m	676.73	1327.36
d = 0.05 m	206.16	403.48
d = 0.10 m	333.90	651.58
d = 0.15 m	442.31	861.99
d = 0.20 m	540.15	1051.62
d = 0.25 m	631.05	1227.45
d = 0.30 m	716.93	1393.25
d = 0.35 m	798.93	1551.35
Vidrio 3mm	442.31	861.99
Vidrio 6mm	444.11	863.00
Vidrio 8mm	437.86	848.53
Pintura negra	442.31	861.99
Pintura gris	411.04	793.99
Pintura blanca	373.75	638.80
Placa Metálica	442.31	861.99
Concreto	370.09	960.10
Ladrillo	383.09	897.00
PCM RT25 HC	494.81	976.00
PCM RT28 HC	518.22	1250.00

PCM RT35 HC	476.88	1288.36
PCM RT42	579.63	945.84
PCM MG-49	524.08	1166.93
PCM 46-50	576.98	970.21

Como se observa en la Tabla F.5, las configuraciones de ChSo-OC y ChSo-TC con mayor impacto en el consumo energético equivalente para inducir ventilación natural son aquellas donde se varía el espesor de canal (zona naranja), seguido de la altura de la chimenea solar (zona azul) y el material masivo empleado en el muro masivo (zona púrpura). El mayor costo del consumo energético equivalente de la ChSo-OC obtenido en un año de operación fue de \$798.93 MXN, mientras que para la ChSo-TC fue de \$1551.35 MXN, ambos valores se obtuvieron para una configuración de espesor de canal $d = 0.35$ m.



a)



b)

Figura F.25. Años de recuperación de inversión (Mérida): a) ChSo-OC orientación Este
b) ChSo-TC orientación Este-Oeste

La Fig. F.25 muestra que los tiempos de recuperación de la inversión inicial para la construcción de la ChSo-OC y ChSo-TC bajo las condiciones de Mérida, son prolongados para las configuraciones que emplean PCM. El menor tiempo de recuperación para la ChSo-OC orientada al Este fue de ocho años al emplear un espesor $d = 0.35$ m. Entre los tiempos de recuperación más bajos en la evaluación de materiales masivos se encuentra el uso de concreto y ladrillo como materiales masivos (25 y 24 años respectivamente). El resto de las configuraciones sin PCM presentan un tiempo de recuperación menor a 31 años, mientras que las configuraciones de ChSo-OC con PCM presentan un tiempo de recuperación promedio de 60 años.

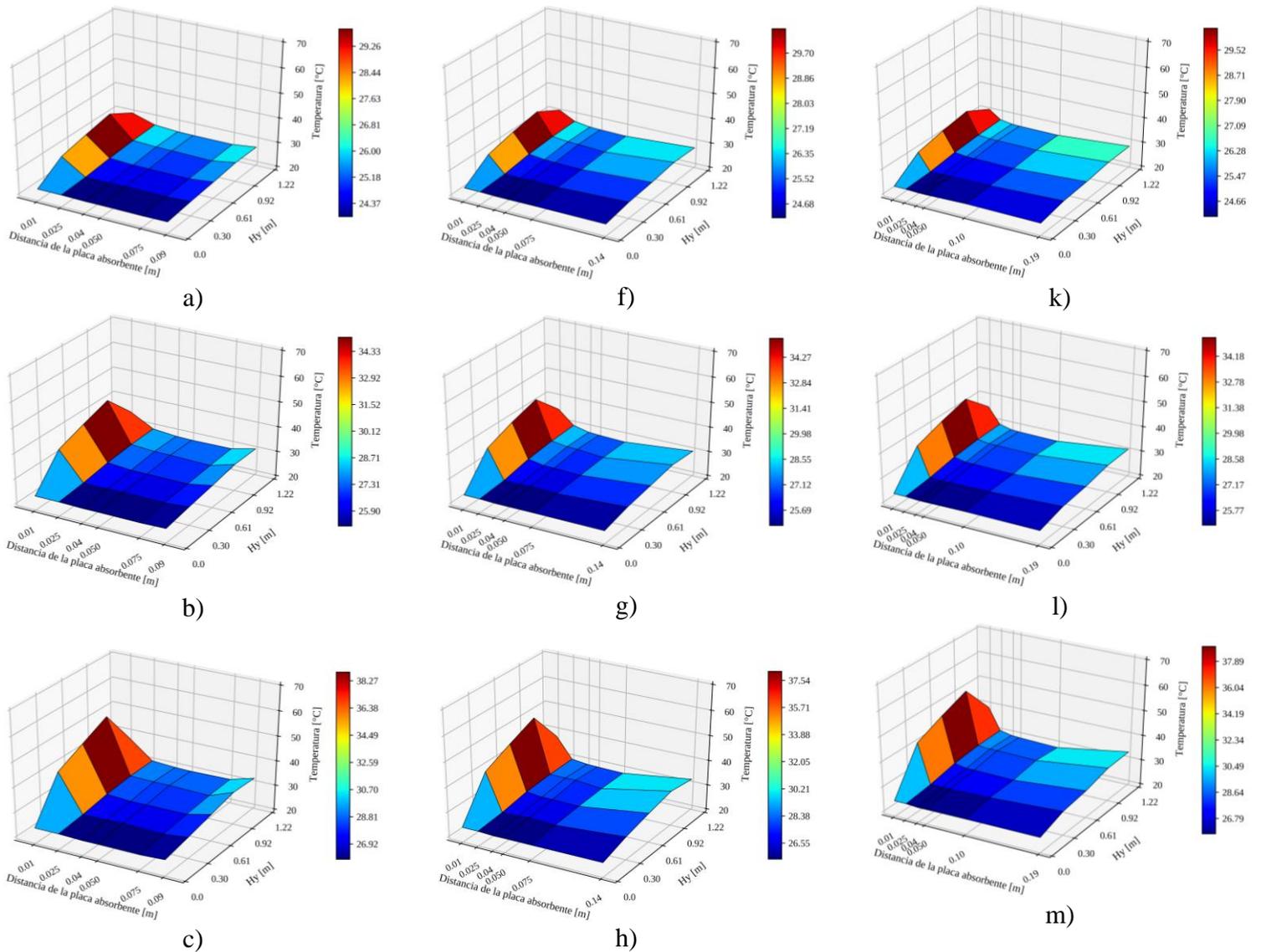
En el caso de la ChSo-TC el menor tiempo de recuperación se obtuvo de nueva cuenta con la configuración de espesor de $d = 0.35$ m el cual fue de cinco años. El resto de las configuraciones sin PCM presentaron tiempos de recuperación menores a los 16 años. En el caso de los materiales masivos, las configuraciones de concreto y ladrillo fueron de las configuraciones con materiales masivos que menor tiempo de recuperación presentaron: 12 años. Las configuraciones con PCM presentaron tiempos de recuperación de 43 años en promedio. De igual forma que el caso de la ChSo-OC, es necesario buscar una configuración óptima que genere que el uso de los PCM en chimeneas solares sea rentable.

ANEXO G

CAPA LÍMITE

En esta sección se presenta una discusión de los resultados obtenidos experimentalmente sobre la formación de la capa límite en las envolventes del canal del prototipo de chimenea solar.

En la Fig. G.1 se presentan los cambios de temperatura al interior del canal para el estudio paramétrico del prototipo experimental de chimenea solar de un canal.



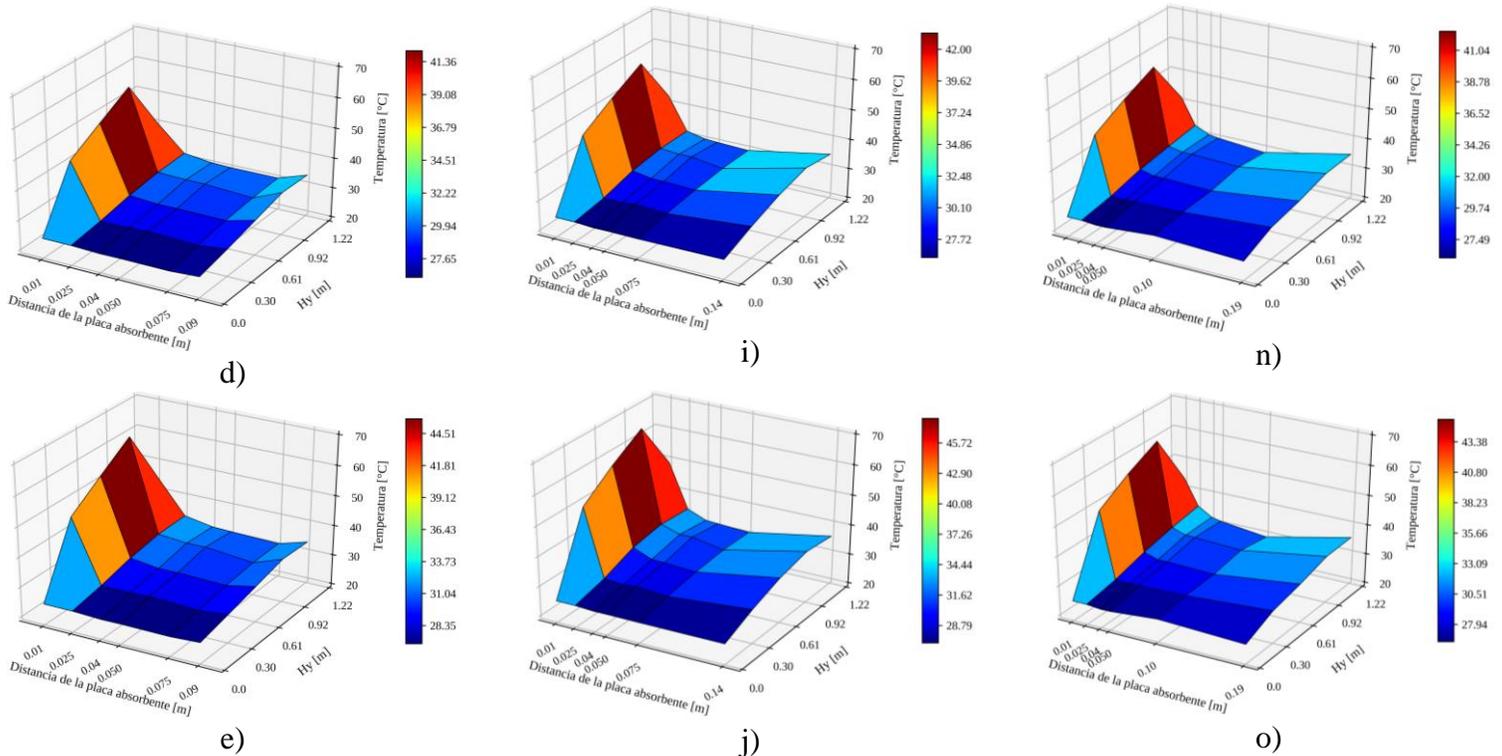


Figura G.1. Temperatura de aire del canal: a) $d=0.10m$ $100Wm^{-2}$, b) $d=0.10m$ $200Wm^{-2}$, c) $d=0.10m$ $300Wm^{-2}$, d) $d=0.10m$ $400Wm^{-2}$, e) $d=0.10m$ $500Wm^{-2}$, f) $d=0.15m$ $100Wm^{-2}$, g) $d=0.15m$ $200Wm^{-2}$, h) $d=0.15m$ $300Wm^{-2}$, i) $d=0.15m$ $400Wm^{-2}$, j) $d=0.15m$ $500Wm^{-2}$, k) $d=0.20m$ $100Wm^{-2}$, l) $d=0.20m$ $200Wm^{-2}$, m) $d=0.20m$ $300Wm^{-2}$, n) $d=0.20m$ $400Wm^{-2}$, o) $d=0.20m$ $500Wm^{-2}$

Como se muestra en la Fig. G.1, se registraron altas diferencias de temperatura de aire en las zonas de mayor cercanía de la placa absorbente. Las mediciones corresponden a los sensores que se ubican a 1 cm de distancia de la placa de metal. Las temperaturas del aire posteriores a 2.5 y 4.0 cm disminuyen drásticamente. Sin embargo, a través de esta información no es posible determinar el espesor exacto de la capa límite térmica debido a que se debe tener una mayor resolución en la zona de muestreo. Inicialmente la propuesta de incluir más sensores en los primeros centímetros de distancia de la placa absorbente fue para observar el efecto del calentamiento al interior del canal, pero ya con la información obtenida se concluyó que en caso de obtener coeficientes de transferencia de calor, se requieren realizar más pruebas para aumentar los parámetros evaluados como flux de calor emulados en la placa absorbente y colocar más sensores a lo largo del eje y y x en el canal para no solamente determinar los espesores de la capa límite. Lo que sí es posible para las configuraciones evaluadas, es

establecer aproximadamente que la capa límite térmica puede encontrarse dentro de los primeros 5 cm de distancia de la placa absorbente.

Como se esperaba, las diferencias más significativas de la temperatura del aire incrementaron a la par del flux de calor evaluado sobre la placa absorbente y, aunque no se observó una clara tendencia con los datos obtenidos de las configuraciones evaluadas, el espesor del canal también afecta el desarrollo de la capa límite térmica. Entre otros factores se encuentra el efecto del intercambio radiativo con las otras envolventes, la pérdida a través de la entrada y salida del canal, así como la energía absorbida, emitida y dispersada por el aire del canal. Esta última forma de intercambio energético depende de la cantidad del contenido de humedad del aire.

Por otro lado, para determinar la capa límite hidrodinámica es necesario realizar las mediciones correspondientes con el anemómetro de hilo caliente en varias posiciones a lo largo de los ejes x y y . Sin embargo, la sonda de medición puede ser invasivo e ineficiente en las zonas de mayor proximidad, por lo que debe ajustarse una estrategia diferente como el incorporar un sistema de trazadores de humo para observar con claridad el espesor de la capa límite e incluso las zonas con mayor perturbación del flujo de aire que afectan el desempeño de la ventilación natural.

ANEXO H

PRODUCTOS Y BENEFICIOS ESPERADOS

En esta sección se presentan los productos y beneficios obtenidos durante la elaboración del trabajo de tesis; de la misma forma se añaden las constancias de actividades de retribución social; a continuación, se enlistan las actividades mencionadas:

- a) Artículo sometido en la revista *Engineering Computations* con el título “An evolutionary algorithm for controlling numerical convergence of the radiative transfer equation with participating media using TVD interpolation schemes”.
- b) Artículo sometido en la revista *Renewable Energy* con el título “Data engineering for digital twinning and optimization of naturally ventilated solar façade with phase changing material under global projections scenarios”.
- c) Artículo sometido en la revista *Building and Environment* con el título “Digital twin models for optimization and global projection of building-integrated solar chimney”.
- d) Artículo sometido en la revista *Journal of Building Physics* con el título “Experimental study and numerical análisis of radiative losses of single-channel solar chimney”.
- e) Participación en congreso *Coloquio de Investigación Multidisciplinaria Orizaba 2022* con el trabajo titulado “Evaluación anual de una chimenea solar de un canal en condiciones de clima cálido-húmedo”.
- f) Participación en congreso *8ª Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada* con el trabajo titulado “Análisis dinámico de la condición inicial en modelo matemático de chimenea solar de un canal considerando un material masivo en la pared absorbente”.
- g) Participación en congreso *V Iberoamerican Conference of Smart Cities-ICSC-CITIES 2022* con el trabajo titulado “Global energy balances for energy análisis in buildings”.
- h) Realización de *Estancia Académica de Investigación* del 5 de septiembre de 2022 al 6 de marzo de 2023 en el Programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería

(CONACYT, PNPC 04284) en la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

- i) Instructor Curso-Taller “Programación en Python para aplicaciones en ingeniería” impartido del 08 al 11 de julio de 2019 *Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*.
- j) Conferencia “Desarrollo de Software: áreas de oportunidad para la implementación de métodos numéricos en la ingeniería” impartida el 29 de mayo de 2021 en el *Colegio de Ingenieros, Licenciados y Técnicos de Informática del Estado de Morelos A.C.*
- k) Conferencia “Desarrollo de Software: áreas de oportunidad para la implementación de métodos numéricos en la ingeniería” impartida el 29 de mayo de 2021 en la *Universidad Autónoma del Estado de Morelos*.
- l) Conferencia “Aplicaciones de los métodos numéricos en ingeniería” impartida el 09 de diciembre de 2021 en el Tecnológico Nacional de México campus *Instituto Tecnológico de Campeche*.
- m) Conferencia “Áreas de oportunidad para la implementación de métodos numéricos en la ingeniería” impartida el 11 de mayo de 2022 en la *Universidad Autónoma del Estado de Morelos*.
- n) Conferencia “Chimeneas solares para ventilación natural en edificaciones” impartida el 16 de noviembre de 2022 en el *Tecnológico Nacional de México campus Instituto Tecnológico de Morelia*.
- o) Instructor Curso-Taller “Python para aplicaciones en ingeniería” impartido del 27 de junio al 05 de julio de 2022 en la *Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*.
- p) Instructor Curso-Taller “Diseño asistido por computadora para aplicaciones en ingeniería” impartido del 20 al 24 de febrero de 2023 en la *Universidad Juárez Autónoma de Tabasco*.

a) Publicación

The current issue and full text archive of this journal is available on Emerald Insight at:
<https://www.emerald.com/insight/0264-4401.htm>

EC
38,6

2552

Received 30 July 2020
 Revised 29 October 2020
 10 November 2020
 Accepted 11 November 2020

An evolutionary algorithm for controlling numerical convergence of the radiative transfer equation with participating media using TVD interpolation schemes

Carlos Enrique Torres-Aguilar

*Department of Mechanical Engineering, Tecnológico Nacional de México/
 CENIDET, Cuernavaca, Mexico*

Pedro Moreno-Bernal

*Facultad de Contaduría, Administración e Informática,
 Universidad Autónoma del Estado de Morelos – UAEM, Cuernavaca, Mexico*

Jesús Xamán

*Department of Mechanical Engineering, Tecnológico Nacional de México/
 CENIDET, Cuernavaca, Mexico*

Ivett Zavala Guillen

*Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada – CICESE,
 Ensenada, México, and*

Irving Osiris Hernández-López

Universidad de Sonora – UNISON, Hermosillo, México

Abstract

Purpose – This paper aims to present an evolutionary algorithm (EA) to accelerate the convergence for the radiative transfer equation (RTE) numerical solution using high-order and high-resolution schemes by the relaxation coefficients optimization.

Design methodology/approach – The objective function minimizes the residual value difference between iterations in each control volume until its difference is lower than the convergence criterion. The EA approach is evaluated in two configurations, a two-dimensional cavity with scattering media and absorbing media.

Findings – Experimental results show the capacity to obtain the numerical solution for both cases on all interpolation schemes tested by the EA approach. The EA approach reduces CPU time for the RTE numerical solution using SUPERBEE, SWEBY and MUSCL schemes until 97% and 135% in scattering and absorbing media cases, respectively. The relaxation coefficients optimized every two numerical solution iterations achieve a significant reduction of the CPU time compared to the deferred correction procedure with fixed relaxation coefficients.



Engineering Computations
 Vol. 38 No. 6, 2021
 pp. 2552-2574
 © Emerald Publishing Limited
 0264-4401
 DOI 10.1108/EC-07-2020-0421

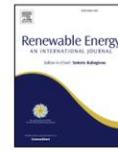
This work acknowledges Shirley Ainsworth Gore and Juan Manuel Hurtado Ramirez of the Biotechnology Institute, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) for bibliography support.

b) Publicación



Contents lists available at ScienceDirect

Renewable Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/renene

Data engineering for digital twinning and optimization of naturally ventilated solar façade with phase changing material under global projection scenarios



Rasikh Tariq^{a,*}, C.E. Torres-Aguilar^b, Nadeem Ahmed Sheikh^c, Tanveer Ahmad^d,
J. Xamán^{b,1}, A. Bassam^a

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Av. Industrias No Contaminantes por Anillo Periférico Norte, Apdo. Postal 150, Cordemex, Mérida, 97203, Yucatán, Mexico

^b Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Pro. Av. Palmira S/N. col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, CP. 62490, Mexico

^c Department of Mechanical Engineering, International Islamic University, Islamabad, Pakistan

^d Energy and Electricity Research Center, International Energy College, Jinan University, Zhuhai, Guangdong Province, 519070, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25 October 2021

Received in revised form

22 December 2021

Accepted 11 January 2022

Available online 18 January 2022

Keywords:

Digital twin models

Energy storage

Building envelope

Solar chimney

Genetic algorithm

Multicriteria decision analysis

ABSTRACT

The use of phase change materials (PCM) and its efficient integration can significantly lower the carbon emissions of building sector. However, optimal integration of thermal energy storages, including PCM, in the buildings is a challenging problem. Digital engineering offers a reliable mechanism to optimize such integration. In order to realize the usefulness of digital resources, especially on the global scale, a methodological approach is required based on validated and data-driven model(s) supported by optimal solution selection in the set of localized as well as external variables. This recommendation system, for the optimal solution, is exemplified here as a novel approach offering solution for an integrated solar chimney (naturally ventilated solar façade) for a building with passive energy storage based on PCM. The complete novel methodology is demonstrated for the sake of illustrating the procedure, followed by regional solutions and their impacts on a global scale. While the solution and results have significance in terms of their quantification; the real purpose and novelty of data engineering mechanism is the robustness and procedural illustration of the digital twin generation from the perspective of energy systems and building performances. The sequential procedure is summarized here with the case study of a solar chimney that has PCM storage in a building. The building is simulated for the four climatic zones covering a major chunk of the world map. The influencing variables are selected along with viable ranges for the prediction of optimal configurations. The multi-objective optimization leads to the region-specific characteristics of the geometry as well as phase-changing material (PCM) selections. While the response parameters have their own projections in their own specific climates. The results has indicated that multilayer perceptron artificial neural network model trained with Levenberg-Marquardt and Bayesian regularization algorithm having topology architecture 10-[10]-1 and 10-[40]-1 can predict the Air Changes per Hour (ACH) and energy efficiency by providing a coefficient of determination of 0.9997 and 0.9998, respectively. Sensitivity analysis has indicated that the solar radiation, width of the solar chimney, distance from the glazing to the wall, specific heat, and the temperature of fusion are the most significant to model the number of air changes per hour marking up to 16%, 11%, 11%, 17%, and 12%, respectively. Whereas wind velocity is the least sensitive parameter. The configuration of solar chimney with phase changing material can provide a ventilation rate of 4.00 1/h, 2.19 1/h, 4.9 1/h, and 2.85, while an energy efficiency of 37.6%, 40.33%, 39.35%, and 39.17% for tropical, dry, temperate, and continental climatic zone, respectively. The global predictions exemplify the impact of double-skin solar façade system with energy storage in the digital twin, thereby indicating the usefulness of digital data engineering.

© 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.

* Corresponding author.

E-mail addresses: rasikhtariq@gmail.com, rasikhtariq@alumnos.uady.mx (R. Tariq).

URL: <https://sites.google.com/view/rasikhtariq>

¹ This work is dedicated with love to the departed soul of Professor Jesús Perfecto Xamán Villaseñor (academically known as J. Xamán).

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.044>
0960-1481/© 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.

c) Publicación

ARTICLE IN PRESS

Building and Environment xxx (xxxx) xxx



Contents lists available at ScienceDirect

Building and Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/buildenv

Digital twin models for optimization and global projection of building-integrated solar chimney

Rasikh Tariq^{a,*}, C.E. Torres-Aguilar^b, J. Xamán^{b,1}, I. Zavala-Guillén^c, A. Bassam^a, Luis J. Ricalde^a, O. Carvente^a

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Av. Industrias No Contaminantes por Anillo Periférico Norte, Apdo. Postal 150, Cordemex, Mérida, Yucatán, Mexico

^b Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Prol. Av. Palmira S/N. Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos, CP. 62490, Mexico

^c Laboratorio de Energías Renovables, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, División de Física Aplicada, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE, Carretera Ensenada Tijuana No. 3918, Zona Playittas, Ensenada, Baja California, CP 22860, Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:

Thermal management
Passive cooling
Artificial intelligence
Solar chimney
Optimization
Global projection
Sustainability

ABSTRACT

Current research on solar chimneys has focused on developing regression-based empirical models, which might not be correct enough compared to the soft computing tools i.e., techniques of artificial intelligence. Current research has also published the search algorithm-based single-objective optimization of solar chimneys, whereas the latest genetic algorithm-based multi-objective optimization can be more useful for decision-making purposes. Current research has also not focused on the macro or global impact of the usage of solar chimneys in context with the energy, economic, environmental, social, and political framework of the world. This research fills these gaps by the development of a digital twin model of the solar chimney using a multivariate regression model based on the least square method and an artificial intelligence (AI) method based on multilayer perceptron artificial neural network (MLP-ANN) and their comparison. A multiobjective optimization study along with the application of Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) is applied to optimize the geometric dimensions of the solar chimney considering four different climatic zones using an elitist non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) to maximize the number of air changes per hour, energy efficiency, and specific environmental influence. The results have shown that the statistical performance indicators like the coefficient of regression, etc., are higher for the MLP-ANN technique as compared to the multivariate regression method, thus, the AI technique is preferred. Comparison of optimization results with the base case condition has shown that the number of air changes can be improved between ~71% and 87%. The global projection has demonstrated that the integration of solar chimneys in low-income countries with high air-conditioners installation rates must be necessary. It is also recommended to use solar chimneys in high-income countries for the renovation of the existing built environment to decrease the energy intensity of the building sector.

1. Introduction

World Green Building Council has outlined that the green buildings can improve the lives of billions and helps to achieve the sustainable development goals of the United Nations [1] especially no. 3: good health and well-being, no. 7: affordable and clean energy, no. 8: decent work and economic growth, no. 9: industry, innovation, and infrastructure, no. 11: sustainable cities and communities, no. 12: responsible consumption and production, no. 13: climate action, no. 15: life on land,

and no. 17: partnerships for the goals. Better and sustainable design of the buildings can also avoid the sick building syndrome [2] resulting from poor indoor quality caused by inadequate ventilation, fluctuations in temperature, and inadequate humidity levels. The role of buildings has also grown up to be more significant in the COVID-19 pandemic especially when the latest research has correlated the association of COVID-19 infection rates with the poor ventilation design of the buildings [3–5]. On the other hand, the COP23 climate change conference held in Bonn, Germany has declared that the urban areas account for

* Corresponding author.

E-mail addresses: rasikhtariq@gmail.com, rasikhtariq@alumnos.uady.mx (R. Tariq).

¹ This work is dedicated with love to the departed soul of Professor Jesús Perfecto Xamán Villaseñor (academically known as J. Xamán).

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108807>

Received 5 November 2021; Received in revised form 13 January 2022; Accepted 16 January 2022

Available online 21 January 2022

0360-1323/© 2022 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Please cite this article as: Rasikh Tariq, *Building and Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108807>

d) Publicación



Research Paper

Experimental study and numerical analysis of radiative losses of single-channel solar chimney

JOURNAL OF
BUILDING
PHYSICS

Journal of Building Physics

2022, Vol. 46(3) 340–371

© The Author(s) 2022

Article reuse guidelines:

sagepub.com/journals-permissions

DOI: 10.1177/17442591221127279

journals.sagepub.com/home/jen

CE Torres-Aguilar¹ , J Arce¹, J Xamán^{1†}
and EV Macias-Melo²

Abstract

Solar chimneys provide natural ventilation for buildings, reducing the energy consumption of mechanical systems. Therefore, analyzing energy losses through solar chimney components and inlet/outlet of air channel is critical to develop a suitable design for this passive ventilation system. In this study, the performance and energy losses analysis of a single-channel solar chimney (SC-SOCH) is described; a parametric study under laboratory conditions was conducted regarding the air gap (0.10, 0.15, and 0.20 m) and heat flux of absorber plate (100, 200, 300, 400, and 500 Wm⁻²). The energy losses were analyzed with temperature sensors, heat flow transducers, and a net radiation transfer model. The parametric study results showed that between 10% and 15% of the total energy supplied to the absorber plate was dissipated to the laboratory environment through the glass cover. Furthermore, combining the different thermal insulation layers on the backside of the absorber plate and sidewalls of the air channel permitted only energy losses below 8% of the total energy supplied. The highest energy losses occurred due to radiative exchange; the radiative losses through the inlet and outlet of the air channel were between 9.38% and 25.78% of the total energy supplied. However, the radiative energy loss rate decreased as airflow increased; the volumetric flow rate was from 34.11 to 94.92 m³h⁻¹, which was enough to satisfy the requirements of total

¹Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Cuernavaca, Morelos, México²Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura (DAIA-UJAT), Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km. 1, Cunduacán, Tabasco, México[†]This work is dedicated with love and affection to the departed soul of Professor Jesús Perfecto Xamán Villaseñor (academic know as J. Xamán)

Corresponding author:

CE Torres-Aguilar, Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Prol. Av. Palmira S/N Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos 62490, México.

Email: carlos.torres17ma@cenidet.edu.mx

e) Congreso

Coloquio de Investigación Multidisciplinaria 2022
Journal CIM Vol. 10, Núm. 1
Octubre de 2022

ISSN: 2007 8102

Evaluación anual de una chimenea solar de un canal en condiciones de clima cálido-húmedo

C.E. Torres-Aguilar¹, J. Arce², R. Vargas-López³, E.V. Macias-Melo⁴, K.M. Aguilar-Castro⁵

¹Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET)

carlos.torres17ma@cenidet.edu.mx,

²Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET) jesus.al@cenidet.tecnm.mx,

³Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (TecNM/CENIDET)

rogelio.vargas.lopez@gmail.com,

⁴Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) edqar.macias@ujat.mx,

⁵Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT) karla.aguilar@ujat.mx

Área de participación: Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Resumen

En el presente estudio se expone la evaluación anual de una chimenea solar de un solo canal bajo las condiciones climáticas de Villahermosa, Tabasco. El modelo se desarrolló en estado transitorio y con balances de energía, además que las condiciones de frontera se alimentaron con datos obtenidos por una estación meteorológica. La chimenea solar se consideró con una pared absorbente de placa metálica y fue orientada hacia el oeste. La chimenea solar generó hasta 0.05 kgs^{-1} o $160 \text{ m}^3\text{hr}^{-1}$ de flujo de aire. Los flujos de aire más altos se generaron durante las estaciones de primavera y verano. El flujo de aire promedio fue suficiente para satisfacer la ventilación necesaria para un área de 18m^2 y el tiempo de operación del sistema fue de entre 8.48 y 13.25 horas. La chimenea solar de un solo canal demostró ser una alternativa de solución para proveer ventilación natural de forma pasiva.

Palabras clave: Chimenea solar, transitorio, balances de energía, ventilación.

Abstract

The present study explains the annual evaluation of a single-channel solar chimney under climate conditions of Villahermosa, Tabasco. The model was developed for unsteady state and using energy balances. Also, the recorded data from a weather station was used in boundary conditions. The solar chimney was oriented to the west, and a metallic plate was used for the absorber wall. The solar chimney induced until 0.05 kgs^{-1} or $160\text{m}^3\text{hr}^{-1}$ of airflow. The highest airflows were performed during the spring and summer seasons. The average airflow was enough to cover the necessary ventilation to an area of 18m^2 , and the operation time the of system was from 8.48 to 13.25 hours. Therefore, the single-channel solar chimney is an alternative solution to provide natural ventilation.

Key words: Solar chimney, unsteady, energy balances, ventilation.



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA**

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR

POR SU DESTACADA PARTICIPACIÓN COMO PONENTE
EN LA CONFERENCIA:

**“EVALUACIÓN ANUAL DE UNA CHIMENEA SOLAR DE UN
CANAL EN CONDICIONES DE CLIMA CÁLIDO-HÚMEDO”**

EFFECTUADA DENTRO DEL MARCO DEL EVENTO INTERNACIONAL “COLOQUIO
DE INVESTIGACIÓN MULTIDISCIPLINARIA ORIZABA 2022” LLEVADO A CABO EN
EL TECN, CAMPUS ORIZABA,
DEL 17 AL 21 DE OCTUBRE DE 2022.

ORIZABA, VER., A 21 DE OCTUBRE DE 2022.

CIENCIA – TÉCNICA- CULTURA ®

RICOBERTO REYES VALENZUELA
DIRECTOR



4035/22

f) Congreso

Análisis dinámico de la condición inicial en modelo matemático de chimenea solar de un canal considerando un material masivo en la pared absorbente

C. E. Torres-Aguilar*, J. Arce**

*Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), C.P. 62080 Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: carlos.torres17ma@cenidet.edu.mx).

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), C.P. 62080 Cuernavaca, Morelos, México (e-mail: jesus.al@cenidet.edu.mx).

Resumen: El presente estudio describe la solución y análisis de la condición inicial de un modelo de chimenea solar de un solo canal bajo las condiciones climáticas de Hermosillo, Sonora. Se consideró el efecto de un material masivo para prolongar la ventilación natural. El sistema se evaluó durante tres días de modelación y se compararon los valores de temperatura y flujo de aire inducido en diferentes horarios. Los resultados mostraron que la comparación entre el primer y segundo día de modelación, la temperatura del muro varió hasta 17.89% y el flujo másico hasta 66.86% en las primeras seis horas de modelación. Entre el segundo y tercer día, las variaciones de temperatura y flujo de aire fueron menores a 1.13%. Se estableció que los resultados del segundo y tercer día son independientes de la condición inicial. El análisis de la condición inicial debe ser parte del análisis paramétrico de chimeneas solares para mejorar la predicción del comportamiento térmico del sistema.

Palabras clave: Chimenea solar, ventilación natural, condición inicial, balance de energía, estado transitorio.

Abstract: The present study focused on the solution and analysis of the initial condition of a single channel solar chimney model under climate conditions of Hermosillo, Sonora. The mathematical model considered the effect of a massive material to extend the natural ventilation. The system was evaluated during three modeling days, and the temperature and mass flow rate results were compared at different times. The results showed that the comparison between the first and second modeling days revealed wall temperature and mass flow rate variations of 17.89 and 66.86%, respectively; this occurred during the first six modeling hours. The solution differences between the second and third days were below 1.13% in temperature and mass flow rate results. The second and third modeling days showed suitable independence of the initial condition. The analysis of the initial condition must be included in the parametric analysis of solar chimneys to improve the accuracy of the results and predict the thermal behavior of the systems.

Keywords: Solar chimney, natural ventilation, initial condition, energy balance, unsteady state.

1. INTRODUCCIÓN

La ventilación es necesaria para el bienestar de los ocupantes ya que permite la remoción de contaminantes y facilita alcanzar un estado de confort térmico al introducir o extraer energía. Por ello, gran parte de la población recurre al uso de sistemas activos como aires acondicionados y ventiladores mecánicos. Sin embargo, la adquisición e implementación de estos sistemas activos, entre otros factores, ha generado un creciente incremento en el consumo energético a nivel mundial, ya que solo para el sector residencial y de construcción se ha cuantificado el 36% del consumo energético para el año 2018 (International Energy Agency, 2019). Mientras que en México el porcentaje de consumo energético para el sector

residencial, comercial y público es de 17.2% (Balance Nacional de Energía, 2017).

En la búsqueda de proveer ventilación al interior de las edificaciones, se han buscado alternativas que permitan satisfacer esta necesidad de tal forma que no exceda el consumo energético y sin dañar el medio ambiente. Por tal motivo, en los últimos años se han llevado a cabo estudios relacionados con nuevos diseños o adaptaciones de las componentes de edificaciones que permitan inducir la ventilación natural. Entre los diferentes estudios se ha propuesto la implementación de sistemas pasivos como las chimeneas solares (Awbi, 2003), con los que se busca inducir la mayor cantidad de ventilación natural posible y que sustituya



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR AND JESÚS ARCE LANDA

POR LA PRESENTACIÓN DEL ARTICULO:

ANÁLISIS DINÁMICO DE LA CONDICIÓN INICIAL EN MODELO MATEMÁTICO DE CHIMENEAS
SOLAR DE UN CANAL CONSIDERANDO UN MATERIAL MASIVO EN LA PARED ABSORBENTE
EN EL MARCO DE LA 8ª JORNADA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA APLICADA, CELEBRADA
DEL 25 AL 27 DE MAYO DE 2022, EN EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO/CENIDET.

CUERNAVACA, MORELOS, 27 DE MAYO DE 2022



JCYTA036022

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

DRA. YESICA IMELDA SAAVEDRA BENÍTEZ
DIRECTORA DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Sello Digital:

AZzCJr9ln6zwiLLj+X+8BkPqudIocv2J45pnGy/JOZrSUw+XySMkflr/jthh80BNhhKmyCDKjH3IDaKiQZERWB
QTKvcTFXL7a9v106xLE72DPo7MgnkHVfKpDhNAMIJuu22SkDuGLSOv8CgEFv1ASFwF6NzgaqReeu+j+9LhTi jr
jIM3buIPGh+8Xo75W211UvLRhcuOV2H9aHs4C7obFNbJtrSVgWow0LPGDnZomknh7FVMDNyYaUpsbduB5Enp2G
pSvZtI2u0pVoeEZq2xjCb4ESoNs0QwuloRTNiONKSH39Dp/ho9754gaL+HVjaenrJzHQ8MOgCvPFCH9qlbBA=

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Global energy balances for energy analysis in buildings

Carlos E. Torres-Aguilar¹[0000-0001-6187-4519],
Pedro Moreno-Bernal²[0000-0002-2811-5331],
Jesús Xamán^{†1}, Sergio Nesmachnow³[0000-0002-8146-4012], and
Luis Cisneros-Villalobos²[0000-0002-9409-1374]

¹ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, México
carlos.torres17ma@cenidet.edu.mx

² Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería,
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México
{pmoreno,luis.cisneros}@uaem.mx

³ Universidad de la República, Uruguay
sergion@fing.edu.uy

Abstract. This article presents a global energy balance solution for a one-dimension wall of multiple nodes in an unsteady state by diffusion in the context of energy efficiency and sustainability. The studied system considered Dirichlet boundary conditions. Experimental validation compares the proposed energy balance with an analytical solution reported in the literature. The main results indicate that the energy balance solution approximates the analytical solution in 6.81% when using a time step of 0.1s, and in 0.006% when using a time step of 0.0001s.

Keywords: Global energy balance, energy efficiency, thermal comfort in buildings

1 Introduction

Nowadays, human activities are related to energy production and consumption for economic and social interests. New advances in human welfare and societies have permitted the World population increases with considerable acceleration. According to the United Nations Department of Economic and Social Affairs, demographic growth expectations will increase from 7.7 billion in 2020 to 9.7 billion persons in 2050 [15]. The demographic growth implies an increase in electrical energy consumption for the following years. Exclusively, electrical energy consumption in the residential sector has been increasing over the years, mainly due to active refrigeration and air conditioning systems that provide thermal comfort to the interior. Recently, electrical energy consumption in the residential

This article is dedicated to the memory of our friend Jesús Perfecto Xamán Villaseñor (academically known as J. Xamán), who was the forerunner of this work.



UCUENCA

CERTIFICATE OF PARTICIPATION

This is to certify that

Carlos Enrique Torres-Aguilar, Pedro Moreno-Bernal, Sergio Nesmachnow and Luis Cisneros-Villalobos

have participated with the **ARTICLE** entitled:

9461 - Global energy balances for energy analysis in buildings

At the V Iberoamerican Conference of Smart Cities - ICSC-CITIES 2022, on November 28-30

Cuenca, Ecuador - November 30, 2022

María Augusta Hermida Palacios
UNIVERSIDAD DE CUENCA
RECTORA

Juan Leonardo Espinoza Abad
UNIVERSIDAD DE CUENCA
VICERRECTOR ACADEMICO

h) Estancia académica



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

FOLIO: AP/DAIA/109/2022

FECHA: Lunes 29/08/2022

ASUNTO: Aceptación para realizar estancia de investigación

**M.C. CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR
ESTUDIANTE DEL DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
P R E S E N T E**

Por este medio me es grato comunicarle que ha sido **ACEPTADO** para realizar una estancia académica durante los días del **05/septiembre 2022** al **06/marzo 2023** dentro del Programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería (CONACYT, PNPC 04284) en la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, ubicada en Cuauacán, Tabasco. Lo anterior, para trabajar bajo la supervisión del **Dr. Edgar Vicente Macias Melo**, considerando el plan de trabajo adjunto a este oficio.

La realización de la estancia contribuirá en su formación profesional mediante su capacitación con el uso del software de código abierto, que le permitan realizar un estudio de modelación numérica de una chimenea solar a través de software de código abierto (OpenFOAM). Aunado a lo anterior, obtendrá información para el análisis de propagación de error para el conjunto de datos de mediciones experimentales que ha obtenido previamente. Estas actividades contribuyen al proyecto doctoral titulado “*Estudio teórico-experimental de una chimenea solar con y sin material de cambio de fase*”.

Sin más, aprovecho la presente para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

**M.C. Juan Carlos Solís Cortazar
Jefatura del Área de Posgrado**

**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
DIV. ACADÉMICA DE ING. Y ARQ.**



**COORDINACIÓN
DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

c.c.p. Dra. Dora María Frías Márquez – Directora
Mtra. Xochilt Cornelio Rodríguez – Coordinadora de Investigación y Posgrado
Dra. Laura Lorena Días Flores – Coordinadora Académica del DCI
Archivo

i) Instructor



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”



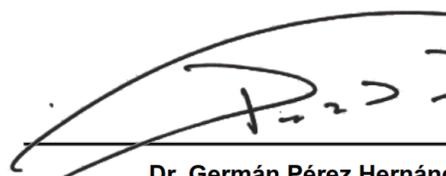
Otorga la presente

CONSTANCIA

A: Carlos Enrique Torres Aguilar

Por su participación como **instructor** en el Curso-Taller “**Programación en Python para Aplicaciones en Ingeniería**” realizado en las instalaciones de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de esta casa de estudios, del 08 al 11 de Julio de 2019 con una duración de 30 horas.

Cunduacán, Tabasco; Viernes 02 de Agosto de 2019


UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Dr. Germán Pérez Hernández
DIRECTOR DIRECCIÓN

DAIA/GI/2019/001

j) Conferencia impartida



La Universidad Autónoma del Estado de Morelos
a través de la
Facultad de Contaduría, Administración e Informática



otorga el presente

Reconocimiento

a M.C. CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR

Por su participación con la conferencia:

**“DESARROLLO DE SOFTWARE: ÁREAS DE OPORTUNIDAD PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN LA INGENIERÍA”**

Impartida en colaboración con el Colegio de Ingenieros, Licenciados y
Técnicos en Informática del Estado de Morelos A.C.
el día sábado 29 de mayo de 2021

Cuernavaca Morelos, a 16 de junio de 2021

*Por una humanidad culta
Una universidad de excelencia*

Mtro. Felipe de Jesús Bonilla Sánchez
Director de la FCAeI

Por una Facultad innovadora creando un futuro sostenible.



Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

FELIPE DE JESUS BONILLA SANCHEZ | Fecha:2021-06-08 12:30:35 | Firmante
vcVozr/3bR0ulzqtAOcV3f9aoBsGyuYML+opqm6ZeMf0LxvZGZD15dlJUAZ1rUTJ05pDzgz6x3oBBwUrNlujfmTpV+2RuwnfpqHjUqh+FYdMHIQHpf1RZ4iZsgQ5zLqK5lwruBzUcku3
TFz3x5i7x1ArYBP42O3WC/v4ctaDiV6O+6e0d/xtx4WV6VKd09+vYvXjet6euk6VvH0pRTVMhba1WAovudyB/aNVyqOQUPvvoEsFP+kxs/qUZ0VY3a5HrGYpb3VKh24KMIFp1IFsy
M5k4zCjUMCq/kb5Zkyhqj56bBYSKHm6gvNk77O1u+URARtrWcOiBmhunJPj0BbQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



o8GZQM

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/YtlzGqQqb4JEz8S5puiNmWCfm0FWvqLV>



Una universidad de excelencia

RECTORÍA
2017-2023

k) Conferencia impartida



**EL COLEGIO DE INGENIEROS, LICENCIADOS Y TÉCNICOS
EN INFORMÁTICA DEL ESTADO DE MORELOS A.C.**

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

A

CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR

POR SU PARTICIPACIÓN CON LA CONFERENCIA TITULADA

**“DESARROLLO DE SOFTWARE: ÁREAS DE OPORTUNIDAD PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN LA INGENIERÍA”**

CUERNAVACA, MOR. A 29 DE MAYO DE 2021



**COLEGIO DE INGENIEROS,
LICENCIADOS Y TÉCNICOS
EN INFORMÁTICA
DEL ESTADO DE MORELOS A.C.**

Dr. Pedro Moreno Bernal
Presidente del Consejo Directivo

2019 - 2021

1) Conferencia impartida



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CAMPECHE

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR

POR HABER IMPARTIDO LA CONFERENCIA: "APLICACIONES DE LOS MÉTODOS
NUMÉRICOS EN INGENIERÍA", EFECTUADA DENTRO DE LAS ACTIVIDADES DEL
RINCÓN DE LA INGENIERÍA, EL DÍA 9 DE DICIEMBRE DE 2021.

LERMA, CAMPECHE, DICIEMBRE DE 2021.

JAVIER CHACHA COTO
DIRECTOR



FOLIO: 437



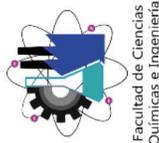
m) Conferencia impartida



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



ANIVERSARIO
FACULTAD DE CIENCIAS
QUÍMICAS E INGENIERÍA



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

La Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería a través de la Secretaría de Investigación y Posgrado FCQeI

otorga el presente

RECONOCIMIENTO

al M.C. Carlos Enrique Torres Aguilar

Por su valiosa participación con la conferencia titulada
"Áreas de oportunidad para la implementación de métodos
numéricos en la ingeniería"

en el marco del Ciclo de Conferencias en Tecnología e Ingeniería
Cuernavaca, Morelos, 11 de mayo de 2022
Atentamente

Dra. Viridiana Aydee León Hernández
Directora de la FCQeI

Dra. María del Carmen Torres Salazar
Secretaría de Investigación y Posgrado FCQeI

Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería

#SomosFCQeI



Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

MARIA DEL CARMEN TORRES SALAZAR | Fecha:2022-05-13 14:33:54 | Firmante yFb5V0ko8164JIS9j38eHSuXNdxvko+jiD5iOgl+7jvk68N3SuHX68IZQaXNkiDvJ9VochWfMmNz38G7zRPiG5QBbnEGD9B9yUAbFFLY5swKP00CaIkV0VVULISHetmJCXhCuX8gAMit6QyDXOKLGLJh+IKgY6OWcCkO48E6e9vrvKUtoJLKn4f732QHlyctqgmBx+XpbMyYbqsrCbYx6YYkO4g+goA3VcaizxRplUlgw9Zi85TcVahrZiH0rX92bNl9T+y07KRHfieDpk9kXqLsZ6AkLssigPHRF7z2latMCOhWPOpPnrHqnujXGLaF+ CJZG-wikSYA==

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2022-05-14 11:46:21 | Firmante m6y5zSB8sGh+Z33Np8eHvgasJPSJlU4efmClwra7uaceE9p9eMPJkbT6xZLoHu60n7.0kCOF4p4mybsvLBoLL0TMg0+5Bg2eXKOIMsF+AwHDIWgOwLVORR4NwETmmGhoOa4L7Y2kqIWQaHFTOVHtmMOIZ+aN3OZukKeymA2F6390LfuMlLAq80pS9OCIMb5kF+zzrgSh5gpdulKht1r0TUDVAyW3Rc0vpuJX30h8TF8WJMPzJGC9nMA0ONuhTGS5AcYHRHZNJMC2C86+PQBmpuRTIu7EEI2AIw3AwT18e3KlhWpsOvYpabIWYGYX8eJz+2ydhGj2sw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



KYwLFdgo

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/Sxppv1mtTCF9aTZca3cTUwUVELms>



RECTORIA
2017-2023

Una universidad de excelencia

n) Conferencia impartida

 **TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**

El TecNM Campus Instituto Tecnológico de Morelia
otorga el presente

Reconocimiento

al

M.C.I. Carlos Enrique Torres

por su participación como ponente de la conferencia

Chimeneas solares para ventilación natural en edificaciones

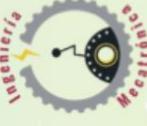
enmarcada en las actividades del evento

Círculos de estudios en energías renovables

Morelia Mich. a 16 de noviembre, 2022

"Técnica, Progreso de México"

 **Ingeniería MECÁNICA**

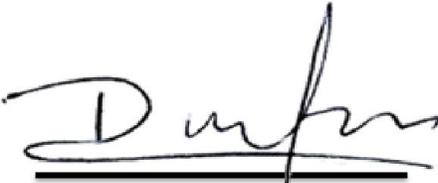
 **Ingeniería Mecatrónica**



Dr. José Luis Gil Vázquez
Director



o) Instructor

 <p>UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO "ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"</p>	 <p>División Académica de Ingeniería y Arquitectura</p>	 <p>2022 Ricardo Flores Magón</p>
<p>Otorga la presente</p> <h1>CONSTANCIA</h1>		
<h2>A: Carlos Enrique Torres Aguilar</h2>		
<p>Por su participación como Instructor del curso: "Python para aplicaciones en ingeniería" en el marco de la Jornada de Cursos de Formación Disciplinar para Profesores, llevado a cabo en nuestra División Académica en modalidad híbrida, del 27 de junio al 5 de julio del presente, con una duración de 30 horas.</p>		
<p>Cunduacán, Tabasco; 05 de agosto de 2022.</p>		
		 <p>DIRECCIÓN</p>
<p>Dra. Dora María Frías Márquez Directora</p>		
<p>Folio: CDCE/2022/2493</p>		

p) Instructor

	UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO "ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"		División Académica de Ingeniería y Arquitectura	
Otorga la presente CONSTANCIA				
A: Carlos Enrique Torres Aguilar				
<p>Por su participación como instructor del <i>Curso Pre-Congreso de Ingeniería Mecánica Eléctrica 2023 "Diseño asistido por computadora para aplicaciones en ingeniería"</i>, llevado a cabo en nuestra División Académica del 20 al 24 de febrero del presente, con una duración de 25 horas.</p>				
Cunduacán, Tabasco; 02 de marzo de 2023.				
 DIRECCIÓN				
Dra. Dora María Frías Márquez Directora				
Folio: CDCE/2023/329				

En cuanto a la participación en cursos de formación disciplinar, se enlistan en orden cronológico los cursos tomados a partir del segundo periodo semestral del 2019 al presente (junio 2023):

- “Simulación de sistemas pasivos en edificaciones mediante modelos de balance de energía” (2019) impartido por el TecNM/CENIDET.
- “Programación dinámica de métodos numéricos en C/C++” (2019) impartido por el TecNM/CENIDET.
- “Búsqueda, análisis y sistematización de la información” (2020) impartido por el TecNM/CENIDET.
- “Teoría-práctica de instrumentación de termopilas y transductores de flujo de calor” (2020) impartido por el TecNM/CENIDET.
- “Energía eólica y Energía Renovable Marina” (2020) impartido por el IER-UNAM.
- “Introducción a la dinámica de fluidos computacional (DFC) para la energía eólica (OpenFOAM)” (2020) impartido por el IER-UNAM.
- “ANSI/ASHRAE Standard 140 en Energy Plus” (2021) impartido por el TecNM/CENIDET.
- “Writing workshop” (2021) impartido por el TecNM/CENIDET.
- “Conversation workshop” (2021) impartido por el TecNM/CENIDET.
- “Gráficas y manejo de datos experimentales” (2022) impartido por el TecNM/CENIDET.
- “Simulaciones energéticas de edificaciones usando OpenStudio y Energy Plus” (2022) impartido por el IER-UNAM.

A continuación, se presentan las constancias correspondientes a los cursos tomados.



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

al

M.C. CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR

POR SU PARTICIPACIÓN EN EL CURSO:
“SIMULACIÓN DE SISTEMAS PASIVOS EN EDIFICACIONES MEDIANTE
MODELOS DE BALANCES DE ENERGÍA”, EL CUAL SE LLEVO A CABO
DEL DÍA 13 DE SEPTIEMBRE AL 15 DE NOVIEMBRE DE 2019, CON UNA
DURACIÓN DE 25 HORAS.

CUERNAVACA, MOR; A 20 DE NOVIEMBRE DE 2019

DRA. YESICA IMELDA SAAVEDRA BENÍTEZ
DIRECTORA



S. E. P.

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACION
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

cenidet[®]
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

al

M.C. CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR

POR SU PARTICIPACIÓN EN EL CURSO **“PROGRAMACIÓN
DINÁMICA DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN C/C++”**, EL CUAL SE
LLEVO A CABO DEL DÍA 04 DE SEPTIEMBRE AL 04 DE
DICIEMBRE DE 2019, CON UNA DURACIÓN DE 60 HORAS, EN
LAS INSTALACIONES DE CENIDET.

CUERNAVACA, MORELOS, 04 DE DICIEMBRE 2019.


DRA. YESICA IMELDA SAAVEDRA BENÍTEZ
DIRECTORA

cenidet[®]
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR

POR HABER ASISTIDO AL CURSO
BÚSQUEDA, ANÁLISIS Y SISTEMATIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN
CIENTÍFICA
DEL 20 AL 24 DE JULIO Y CON DURACIÓN DE 30 HORAS.

CUERNAVACA, MORELOS., 14 DE SEPTIEMBRE 2020

DRA. YESICA IMELDA SAAVEDRA BENÍTEZ
DIRECTORA



Sello Digital:

gnUx+fIEA4mc7Q95MOM+x+CQwGXA7At8+Uqq50Y2n138aX8rpATepQ1mZOCzT6+xjH/FbeApIkL8ZKjuFHHM
onOOWMopyk/KEUyGJELOrBd+mCHLAMOHOyRNiwQVKOLG6gg7E5R+TM+OFnbKTstFDBmi/ZeAcMsyOTIXo405gq
GJXZAvi7xELkdS1X+tVzP6unM9/QqFf39gf1M1WdoNbnKyAXHg32w9cyRrJ/PAE6DK17giDzWn5ePCFVT7/D31
f3umxM7S0bmneNxLqRYKevq8bNfdF3aa3sDtUJ6ZK9nPhcdwN1fm7jXFK117jXMFnxTfPprdpZnDz5KN/ZLA==

TAC013820

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490 Cuernavaca, Morelos.
Tel. (01) 777 3 62 77 70, ext. 4101, e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx
www.tecnm.mx | www.cenidet.tecnm.mx





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA EL PRESENTE

RECONOCIMIENTO

al

M.C. CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR

POR HABER PARTICIPADO EN EL CURSO: **“TEORÍA-PRÁCTICA DE INSTRUMENTACIÓN DE TERMOPILAS Y TRANSDUCTORES DE FLUJO DE CALOR”**, QUE SE LLEVÓ A CABO DEL 09 AL 20 DE MARZO DE 2020, Y CON UNA DURACIÓN DE 30 HORAS.

CUERNAVACA, MOR; A 20 DE MARZO DE 2020.

DRA. YESICA IMELDA SAAVEDRA BENITEZ
DIRECTORA



S. E. P.

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACION
Y DESARROLLO TECNOLÓGICO



Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Energías Renovables

a través del

Proyecto "Fortalecimiento del campo de Energía Eólica en el Programa de Doctorado
en Ingeniería Campo de conocimiento en Energía"

Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a:

Carlos Enrique Torres Aguilar

Por su asistencia al curso

Energía Eólica y Energía Renovable Marina

"Por mi raza hablará el espíritu"

Temixco, Morelos, 02 - 30 de septiembre de 2020



Dr. Markus Sebastian Gross
Instructor del curso



Dra. Vanesa Magar Brunner
Instructora del curso



Dr. Osvaldo Rodríguez Hernández
Responsable Técnico del proyecto



Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Energías Renovables

a través del

Proyecto "Fortalecimiento del campo de Energía Eólica en el Programa de Doctorado
en Ingeniería Campo de conocimiento en Energía"

Otorga el presente

RECONOCIMIENTO

a:

Carlos Enrique Torres Aguilar

Por su asistencia al curso

**Introducción a la dinámica de fluidos computacional (DFC)
para la energía eólica (OpenFOAM)**

M. en I. David Roberto Domínguez Lozoya
Instructor del curso

"Por mi raza hablará el espíritu"
Temixco, Morelos, 24 - 28 de agosto de 2020

Dr. Osvaldo Rodríguez Hernández
Responsable Técnico del proyecto



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA EL PRESENTE

CONSTANCIA

A

CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR

TECNM/CENIDET

POR HABER ASISTIDO Y ACREDITADO EL CURSO: ANSI/ASHRAE
STANDARD 140 EN ENERGY PLUS, DEL 5 AL 9 DE JULIO DE 2021, CON UNA
DURACIÓN DE 30 HORAS.

CUERNAVACA, MORELOS., 1 DE SEPTIEMBRE DE 2021



DRA. YESICA IMELDA SAAVEDRA BENÍTEZ
DIRECTORA

Sello Digital:

z5iu3Wwb7K39bMX3C6On6c1pHt6EFAYueiRc1dzId/FdQ4xfY+4S2ojDXc1ht23PspT5Zte5qaAvbeEm+EQrOt
JLVhBQqriFmvLlh5MBRpdag0H8jFE43BYj1wAPErBdKJS30tgjuNdr6HLKRuG0m7CQXbzFswFJWorYi8TuPlbM
AKg4CUnPrkHYCYMvOgQ4ZDIg2aOG1I2U2E8dKPGAGReq4P14ohihWAidTE4M8/TPglGOMggCFJKMD8kQ64t3W
160huRSW6GvPXRNUFFMhvaJrgcyUZP1G4Yez1OAXjupHaKD7pK6R+Ebu2o1fI63wyUp4m4HO1PEYw6S1Xg==

TAC015321

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos
Tel. (01) 777 3 62 77 70, ext. 4201,
e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx

www.tecnm.mx | www.cenidet.tecnm.mx





**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR

TECNM/CENIDET

POR HABER ASISTIDO Y ACREDITADO CON EXCELENCIA EL CURSO: WRITING
WORKSHOP, IMPARTIDO DEL 13 DE SEPTIEMBRE AL 13 DE DICIEMBRE DE 2021, CON UNA
DURACIÓN DE 30 HORAS.

CUERNAVACA, MORELOS., 12 DE ENERO DE 2022

DRA. YESICA IMELDA SAAVEDRA BENÍTEZ
DIRECTORA



TAC001822

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>

Sello Digital:

JK8swIv6f2wcTpdAIBMCWHE5EzbpGF76/d9wEYIkqyrgLbCPDPkXjBeCvL22+k/McNV5d2/HnSHiSyMIacgdjG
qBaxLCjDZ/VAPGXS1lq7Vway0rffNdMghgl7bujoFYwsoB+2FTlprgehqfpzxlJhFk1qGUVDK5QvHUW5zjsup
/R/8MZ9hNi3P25/DM8oYt0dWENDJhWEgwToZFMCLyC8XYqFG1TT/m9M15TYkrqfPKos2JduPwzjMydN/ZcuQF
IeFVyq07AK5aqfB1Kb0F8XNTbMIywt6W4juTGO8XWPzAdCzMGHS25hb6iAb0DUZ/Ipsw/X9YcM91ceyJq8+A==



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos
Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4101, e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



2022 Flores
Año de
Magón
PRECURSOR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA



**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
A TRAVÉS DEL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO TECNOLÓGICO**

OTORGA LA PRESENTE

CONSTANCIA

A

CARLOS ENRIQUE TORRES AGUILAR

TECNM/CENIDET

POR HABER ASISTIDO Y ACREDITADO CON EXCELENCIA EL CURSO: CONVERSATION
WORKSHOP, IMPARTIDO DEL 13 DE SEPTIEMBRE AL 13 DE DICIEMBRE DE 2021, CON UNA
DURACIÓN DE 30 HORAS.

CUERNAVACA, MORELOS., 12 DE ENERO DE 2022

DRA. YESICA IMELDA SAAVEDRA BENÍTEZ
DIRECTORA



Sello Digital:

s52BWXsiUqLB6nHxmW6VYmn0cC6xnGbIahSMwK8U1d31Y55pR6wc9jOLpNORF8JiZsiGO/EiBwhPqBjixG//W
B7aU0fO/mZg5UPxE0mMg0MVT6domk4186b6s8F1ArUy9jba7ueqoNBCsDqA4ScnWbarn3CRc9M2pLTlcTjXyN
bBtqy8b5NDcKymVtqaCR9QhhUz411+Ry851nbPK+pn4F7fbd/aGMR7sdeVhJ72sWXXSA/JqTr2L5yHcNMI2Y0m
c32Rt2Lh1Apk+JbRYwyNdjafSXzhF16FzyekE0mvawCZ7XuEziKSkNX2Xzr09+zNkUH5+71LrBEI5gTzUduA==

TAC002222

<http://constancias.cenidet.tecnm.mx>



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos

Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4101, e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx | tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



UNAM

IER
Instituto de Energías
Renovables

REDEC UNAM

RENOVANDO TALENTOS
en energías renovables

Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Energías Renovables

Otorga la presente

CONSTANCIA

a: Carlos Enrique Torres Aguilar

Por haber concluido satisfactoriamente el curso

Gráficas y manejo de datos experimentales

en la modalidad a distancia (asíncrona) con una duración de 8 horas.

"Por mi raza hablará el espíritu"
Temixco, Morelos, febrero de 2022.

Lic. Celeste Morales Santiago
Coordinadora de la Unidad de Educación
Continua del IER-UNAM



RENOVANDO TALENTOS
en energías renovables

Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Energías Renovables

Otorga la presente

CONSTANCIA

a: Carlos Enrique Torres Aguilar

Por su participación como asistente en el curso:

**Simulaciones energéticas de edificaciones
usando OpenStudio y EnergyPlus**

realizado en modalidad a distancia el 19 de abril al 24 de mayo de 2022, con una duración de 20 horas.

"Por mi raza hablará el espíritu"

Temixco, Morelos., a 24 de mayo de 2022.



Dra. Marina Elizabeth Rincón González
Directora del
IER-UNAM



Lic. Celeste Morales Santiago
Coordinadora de la Unidad de Educación
Continua del IER-UNAM



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**

cenidet[®]
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico