

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS
SUSTENTABLES**

Modelación de un sistema sustentable para el aprovechamiento de la energía
geotérmica de baja entalpía por medio de un intercambiador de calor tierra-
aire

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y
TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES**

P R E S E N T A:

Alfredo Aranda Arizmendi

D I R E C T O R E S:

Dr. Moisés Montiel González Dr. Martín Rodríguez Vázquez

C O M I T É T U T O R A L:

Dra. Mariana Romero Aguilar

Dr. Rosenberg Javier Romero Domínguez

Dr. Luis Cisneros Villalobos

Dr. Jesús Cerezo Román

Dr. Miguel Jiménez Xamán

Agradecimientos

Al consejo nacional de humanidades ciencias y tecnologías (CONAHCyT) por la beca otorgada para la realización de este trabajo de investigación.

A la facultad de ciencias químicas e ingenierías (FCQeI) y a la universidad autónoma del estado de Morelos, por ser las instituciones que permitieron mi desarrollo profesional.

A mis abuelos Rafaela Arizmendi Uribe y Jacinto Correa Sánchez por apoyarme a mí, mis hermanos y mi madre, además de criarme y educarme desde que era un niño.

A mi madre Maricela Aranda Arizmendi por apoyarme en todos mis proyectos y por no rendirse como madre soltera.

A mi asesor el Dr. Moisés Montiel González, por confiar en mí y brindarme las herramientas necesarias para concluir con el presente trabajo.

Al comité revisor por participar activamente con sus comentarios durante el desarrollo de este trabajo.

Carta póstuma

El día 8 de noviembre del 2021 falleció el Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor.

Me tomaré la libertad de utilizar esta página para dedicarle unas palabras de despedida a quien fue mi primer co – asesor de doctorado y profesor durante esta etapa de mi vida.

El día 9 de agosto del 2019 asistí a mi primera clase con el Dr. J. Xamán, el curso fue de métodos numéricos impartido en el CENIDET y fue desde esa primera clase, es decir, me bastaron 2 horas para entender el profundo respeto y admiración que me transmitió mi asesor el Dr. Moisés Montiel González hacia él, quien, en su momento, también fue su alumno y formó parte de la primera generación de alumnos graduados de doctorado con ayuda de su asesoría.

Diligencia, dedicación, compromiso, pasión por la materia e investigación, además de paciencia, amabilidad y respeto, son solo algunos de los adjetivos que se me ocurren en este momento para describir al magnífico ser humano y padre de familia que tuve la fortuna de conocer durante estos últimos años.

Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor, le agradezco profundamente todo lo que me enseñó, toda la atención que me prestó, incluso cuando sé que no tenía realmente el tiempo para atenderme, le agradezco también el haberme incluido en los diversos talleres y demás cátedras en las que compartí el espacio con una pequeña parte de su grupo de trabajo, magníficas personas de las cuales me consta el cariño y respeto que le tenían, así como el que noté reflejado en mi asesor y del que yo ahora formo parte también.

Descanse en paz.

Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor



Contenido

Capítulo 1: Introducción	2
1.1 Producción energética en México	2
1.2 Generalidades del desarrollo sustentable	3
1.3 Ecotecnologías para viviendas sustentables	5
1.4 Incremento en el uso de sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado a nivel mundial	7
1.5 Pobreza energética en México	9
1.6 Sistemas HVAC instalados en México	10
1.7 Regiones climáticas de México	11
1.8 Distribución de suelos según su textura en México	13
1.9 Energía geotérmica de baja entalpía	14
1.10 Inercia térmica del suelo	16
1.11 Los intercambiadores de calor tierra-aire (ICTA)	17
1.12 Revisión bibliográfica de estudios teóricos de ICTA	18
1.13 Revisión bibliográfica de estudios numérico-experimentales de ICTA	21
1.14 Sumario de la revisión bibliográfica.	24
1.15 Justificación	25
1.16 Hipótesis	26
1.17 Objetivo general	26
1.18 Objetivos específicos	26
1.19 Alcance de la investigación	27
Capítulo 2: Marco teórico	28
2.1 Ecuación general simplificada conservativa de convección-difusión	28
2.2 Dinámica de fluidos computacional (CFD)	30

2.3 Método de volumen finito (MVF)	32
2.4 Generación de malla para el MVF	33
2.5 Condiciones de frontera para el MVF	36
2.6 Software comercial para CFD	37
2.7 Limitaciones en el uso de software	38
2.8 Estructura para el desarrollador de código basado en CFD	39
2.9 Propagación de errores e incertidumbre en CFD	40
2.10 Incertidumbre en CFD	41
2.11 Procesos de verificación y validación en CFD	41
2.12 Modelo físico para el ICTA	42
2.13 Consideraciones para determinar el modelo matemático del ICTA	43
2.14 Modelo matemático para el ICTA	43
2.15 Condiciones de frontera en el ICTA	44
Capítulo 3: Metodología numérica	47
3.1 Discretización del modelo matemático	47
3.2 Esquemas numéricos de interpolación	51
3.3 Algoritmos de acople presión velocidad	54
3.4 Solución del sistema de ecuaciones algebraicas	63
3.5 Algoritmo de Thomas	63
3.6 Modificaciones del algoritmo de Thomas para matrices pentadiagonales	64
3.7 Criterio de convergencia	66
Capítulo 4: Verificación, análisis de independencia de malla y validación del código	67
4.1 Flujo laminar en una cavidad cuadrada con pared deslizante	67
4.2 Flujo laminar por convección natural en una cavidad cuadrada calentada diferencialmente.	74

4.3 Flujo laminar en un canal rectangular con convección forzada	80
4.5 Análisis de independencia de malla para el ICTA	83
4.6 Comparación modelos para la distribución de inicial de temperatura del suelo para el ICTA	89
4.7 Validación del código desarrollado para el ICTA	94
4.8 Validación para las estaciones de verano, otoño e invierno en Tabasco México	107
4.9 Errores en mediciones de temperatura	113
Capítulo 5: Resultados y discusión.	115
5.1 Parámetros y consideraciones para las proyecciones obtenidas con el modelado del ICTA	115
5.2 Proyecciones del potencial de operación de los ICTA para fines de calefacción y enfriamiento	116
5.3 Análisis paramétrico del ICTA	122
5.3.1 Análisis paramétrico para evaluar el efecto de la humedad del suelo	125
5.4 Análisis de la longitud aislada en la tubería de salida del ICTA	128
5.5 Proyecciones del potencial de operación de ICTA para los 4 climas predominantes de México	130
5.6 Consumo de energía en una vivienda promedio equipada con sistema HVAC	147
5.7 Análisis costo/beneficio del consumo energético de una vivienda por la implementación de un ICTA	150
5.8 Emisiones de GEI por consumo de energía eléctrica de una vivienda unifamiliar equipada con un sistema HVAC	152
5.9 Reducción en la emisión de GEI por la implementación de un ICTA en una vivienda promedio	153
5.10 Análisis del impacto de los GEI sobre la población	154
5.11 Criterios de sustentabilidad aplicables a un ICTA	156
Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones	156
6.1 Conclusiones	157

6.2 Recomendaciones	159
Referencias	160

Lista de Figuras

Figura 1.1. Combustibles utilizados en la producción de energía eléctrica en México 2014-2022 [2].	2
Figura 1.2. Perspectiva actual y a futuro del consumo energético mundial para fines de enfriamiento de edificaciones [18].	7
Figura 1.3. Demanda energética por aplicación de uso final [18].	8
Figura 1.4. Uso de energía para fines de enfriamiento de edificaciones por país/región [18].	8
Figura 1.5. Participación de los principales usos finales en el consumo total de energía [26].	9
Figura 1.6. Número de equipos de aire acondicionado y porcentaje de viviendas con al menos un equipo por región [27].	11
Figura 1.7. Porcentaje de viviendas particulares habitadas con calefactor por región [27].	11
Figura 1.8. Distribución de climas en México [28].	12
Figura 1.9. Distribución de temperatura media anual en México [28].	12
Figura 1.10. Diagrama triangular para la clasificación del suelo según su textura predominante [29]	13
Figura 1.11. Distribución de suelos según su textura en México [30].	14
Figura 1.12. Evolución de la temperatura del suelo respecto a la profundidad, la línea azul representa la temperatura e invierno, la línea roja: el verano, las líneas verde y amarilla: primavera y otoño respectivamente [37].	16
Figura 1.13. Principio básico de operación de un intercambiador de calor tierra-aire ICTA.	17
Figura 2.1. Disciplinas involucradas en CFD.	31
Figura 2.2. Arreglo de mallas a) contacto con frontera y b) no contacto con frontera, para una malla unidimensional [69].	33
Figura 2.3. Representación de un volumen de control interno del dominio computacional para una malla unidimensional [69].	34
Figura 2.4. Representación de un volumen de control interno del dominio computacional	34

para una malla bidimensional [69].

Figura 2.5. Representación de un volumen de control interno del dominio computacional para una malla tridimensional [69]. 35

Figura 2.6. Ejemplo de un dominio computacional o mallado para un modelo físico bidimensional cuadrado, su entorno, fronteras y distribución nodal. 36

Figura 2.7. Estructura general de un desarrollador de código CFD [69]. 40

Figura 2.8. Modelo físico del ICTA. 42

Figura 2.9. Ubicación de las fronteras en el modelo físico del ICTA. 44

Figura 3.1. Flujos totales en el volumen de control de una malla bidimensional. 48

Figura 3.2. Volúmenes de control para la técnica de mallas desplazadas en un dominio bidimensional [69]. 55

Figura 3.3. Diagrama de flujo para el algoritmo SIMPLE. 62

Figura 4.1. Modelo físico y sus respectivas condiciones de frontera (fronteras de primera clase), para el problema de una cavidad cuadrada con pared deslizante. 67

Figura 4.2. Contornos de velocidad horizontal “ u ” para 3 números de Reynolds respectivamente (100, 400 y 1000). 69

Figura 4.3. Comparación cualitativa de los valores de velocidad obtenidos en la vertical completa ubicada en el centro horizontal del dominio, respecto a los obtenidos por Ghia et al. en 1982. 70

Figura 4.4. Contornos de velocidad de velocidad vertical “ v ” según 3 números de Reynolds respectivamente (100, 400 y 100). 72

Figura 4.5. Comparación de los valores de velocidad obtenidos en la línea horizontal completa ubicada en el centro vertical del dominio, respecto a los obtenidos por Ghia et al. en 1982. 73

Figura 4.6. Modelo físico para el problema de la cavidad calentada diferencialmente. 74

Figura 4.7. Contorno de velocidad horizontal “ u ”, contorno de velocidad vertical “ v ”, líneas de corriente y contorno de temperatura obtenido para un $Ra = 10^3$. 77

Figura 4.8. Contorno de velocidad horizontal “ u ”, contorno de velocidad vertical “ v ”, líneas de corriente y contorno de temperatura obtenido para un $Ra = 10^4$. 78

Figura 4.9. Contorno de velocidad horizontal “ u ”, contorno de velocidad vertical “ v ”, líneas de corriente y contorno de temperatura obtenido para un $Ra = 10^5$. 79

Figura 4.10. Contorno de velocidad horizontal “ u ”, contorno de velocidad vertical “ v ”, líneas de corriente y contorno de temperatura obtenido para un $Ra = 10^6$.	80
Figura 4.11. Modelo físico para un flujo laminar en un canal rectangular con convección forzada.	81
Figura 4.12. Distribución de temperatura según el número de nodos que ocupan el diámetro de la tubería a) para la horizontal ubicada a 1.575 m. de profundidad y b) para la vertical ubicada a 3.15 m. del recorrido horizontal del ICTA.	85
Figura 4.13. Distribución de temperatura según el número de nodos que ocupan el diámetro de la tubería a) en la salida del ICTA y b) en la interfaz aire-material aislante.	85
Figura 4.14. Distribución de temperatura según el número de nodos a) para la horizontal ubicada a 1.575 m. de profundidad y b) para la vertical ubicada a 3.15 m. del recorrido horizontal del ICTA.	87
Figura 4.15. Distribución de temperatura según el número de nodos a) para la zona más profunda ubicada a 3.15 m del recorrido horizontal y b) distribución de temperatura en la salida del ICTA.	87
Figura 4.16. Distribución de nodos ocupando el espacio del modelo físico, malla computacional.	88
Figura 4.17. Temperatura del suelo a distintas profundidades [83].	90
Figura 4.18. Distribución inicial de temperatura del suelo por el modelo obtenido de mediciones experimentales [83].	91
Figura 4.19. Distribución de temperatura inicial del suelo según el modelo analítico propuesto por Givoni Baruch [84].	93
Figura 4.20. Distribución de temperatura resultante del ICTA con; a) la distribución inicial de temperatura del modelo basado en mediciones experimentales y b) la distribución inicial de temperatura del modelo propuesto por Givoni Baruch.	93
Figura 4.21. Detalle de construcción de los ICTA en Villas universitarias Chetumal Quintana Roo y dimensiones de construcción [88].	95
Figura 4.22. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada del ICTA ubicado en Villas universitarias Chetumal Quintana Roo (2 metros de profundidad).	98
Figura 4.23. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada del ICTA ubicado en Villas universitarias Chetumal Quintana Roo (1 metro de profundidad).	98
Figura 4.24. Diagrama, dimensiones y fotografía del ICTA instalado en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco [62].	99
Figura 4.25. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada del ICTA	102

ubicado en la UJAT para el día (01/Agosto/2017).	
Figura 4.26. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada del ICTA ubicado en la UJAT para el día (01/Octubre/2017).	102
Figura 4.27. Detalle del ICTA experimental ubicado en la universidad de Biskra, Argelia, datos y dimensiones reportados por los autores [89].	103
Figura 4.28. Resultados de la validación para las 4 posiciones evaluadas.	106
Figura 4.29. Temperatura de salida experimental vs modelada (15/Agosto/2017).	108
Figura 4.30. Temperatura de salida experimental vs modelada (15/ septiembre /2017).	109
Figura 4.31. Temperatura de salida experimental vs modelada (15/ octubre /2017).	110
Figura 4.32. Temperatura de salida experimental vs modelada (15/noviembre/2017).	111
Figura 4.33. Temperatura de salida experimental vs modelada (15/diciembre/2017).	112
Figura 4.34. Temperatura de salida experimental vs modelada (15/enero/2017).	113
Figura 4.35. Aspectos para tomar en cuenta en mediciones experimentales [91].	113
Figura 5.1. Comparativa de temperatura de entrada y salida del ICTA en la localidad del jicarero en Jojutla Morelos para el día más cálido del año 04/06/2020.	118
Figura 5.2. Comparativa de temperatura de entrada y salida del ICTA en la localidad del jicarero en Jojutla Morelos para el día más frío del año 02/10/2020.	118
Figura 5.3. Comparativa de temperatura de entrada y salida del ICTA en la localidad de la Rosilla Durango para el día más cálido del año 05/06/2020.	120
Figura 5.4. Comparativa de temperatura de entrada y salida del ICTA en la localidad de la Rosilla Durango para el día más frío del año 31/12/2020.	121
Figura 5.5. Efecto de la humedad del suelo en el potencial de operación de un ICTA para fines de enfriamiento para 2 flujos laminares (Jojutla Mor. 04/06/2020 15:00).	126
Figura 5.6. Efecto de la humedad del suelo en el potencial de operación de un ICTA para fines de calefacción para 2 flujos laminares (La Rosilla Dgo 31/12/2020 20:00).	127
Figura 5.7. Distribución de temperatura del ICTA para fines de calefacción (a) y enfriamiento (b) con una profundidad de tubería de 4 m y un número de Reynolds de 250.	128
Figura 5.8. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en Fronteras Sonora.	131
Figura 5.9. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año	132

2022 en Fronteras Sonora.

Figura 5.10. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en San Luis Potosí. 133

Figura 5.11. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en San Luis Potosí. 134

Figura 5.12. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en Mérida, Yucatán. 135

Figura 5.13. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en Mérida, Yucatán. 136

Figura 5.14. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en Tlacotalpan, Veracruz. 137

Figura 5.15. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en Tlacotalpan, Veracruz. 138

Figura 5.16. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en Ciudad Juárez, Chihuahua. 139

Figura 5.17. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en Ciudad Juárez, Chihuahua. 140

Figura 5.18. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en Guayaquil, Baja California N. 141

Figura 5.19. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en Guayaquil, Baja California N. 142

Figura 5.20. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en La Rosilla, Guanaceví Durango. 143

Figura 5.21. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en La Rosilla, Guanaceví Durango. 144

Figura 5.22. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en St. Tomás Ajusco CDMX. 145

Figura 5.23. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en St. Tomás Ajusco CDMX. 146

Lista de tablas

Tabla 1.1. Aportaciones de los diferentes combustibles utilizados en la producción de energía eléctrica en México 2014-2022 (Petajoules, PJ)	3
Tabla 1.2. Hogares en situación de pobreza energética y privación de bienes económicos [25]	10
Tabla 1.3. Distribución de hogares en los estados con zonas climáticas cálidas y templadas [25]	10
Tabla 1.4. Clasificación de la energía geotérmica según la temperatura del suelo [30]	15
Tabla 1.5. Alcances de la investigación	27
Tabla 2.1. Comparativa según el método de análisis [69]	31
Tabla 2.2. Desarrollo de software comercial para CFD	38
Tabla 2.3. Costos y limitaciones de licencias comerciales para algunos softwares de CFD [70]	39
Tabla 3.1. Función $A(Pe_e)$	54
Tabla 4.1. Comparación cuantitativa para la componente de velocidad “u” del problema de flujo laminar en una cavidad cuadrada con pared deslizante	71
Tabla 4.2. Comparación cuantitativa para la componente de velocidad “v” del problema Driven Cavity	73
Tabla 4.3. Comparación cuantitativa para el número de Nusselt en el presente trabajo respecto a lo reportado por De Vahl Davis (1983) para un $Ra = 10^3$	77
Tabla 4.4. Comparación cuantitativa para el número de Nusselt en el presente trabajo respecto a lo reportado por De Vahl Davis (1983) para un $Ra = 10^4$	78
Tabla 4.5. Comparación cuantitativa para el número de Nusselt en el presente trabajo respecto a lo reportado por De Vahl Davis (1983) para un $Ra = 10^5$	79
Tabla 4.6. Comparación cuantitativa para el número de Nusselt obtenido en el presente trabajo respecto a lo reportado por De Vahl Davis (1983) para un $Ra = 10^6$	80
Tabla 4.7. Comparación cuantitativa entre los resultados obtenidos por el modelado numérico respecto a la solución analítica propuesta por Oosthuizen (1999)	82
Tabla 4.8. Parámetros para el análisis de independencia de malla del ICTA	83
Tabla 4.9. Dimensiones utilizadas para el análisis e independencia de malla del ICTA	84
Tabla 4.10. Número de nodos distribuidos por sección del ICTA (Diámetro)	84

Tabla 4.11. Temperatura promedio en la salida del ICTA según el número de nodos para el diámetro y tiempo de cómputo	86
Tabla 4.12. Número de nodos distribuidos por sección del ICTA (longitud horizontal y vertical)	86
Tabla 4.13. Temperatura promedio en la salida del ICTA según el número de nodos longitudinal del ICTA y tiempo de cómputo	88
Tabla 4.14. Número de nodos distribuidos por sección del ICTA	89
Tabla 4.15. Factor de amortiguamiento (F) para diferentes climas y tipos de suelo [85]	92
Tabla 4.16. Retraso temporal (L) para diferentes climas y tipos de suelo [85]	92
Tabla 4.17. Temperatura promedio de salida según la distribución inicial de temperatura del suelo	94
Tabla 4.18. Condiciones de operación del ICTA, Chetumal Quintana Roo (30/julio/2016) [88]	95
Tabla 4.19. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (2 metros de profundidad)	96
Tabla 4.20. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (1 metro de profundidad)	97
Tabla 4.21. Condiciones de operación del ICTA instalado en la UJAT para el 01/agosto/2017	99
Tabla 4.22. Condiciones de operación del ICTA instalado en la UJAT para el 01/octubre/2017	100
Tabla 4.23. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (01/Agosto/2017)	101
Tabla 4.24. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (01/Octubre/2017)	101
Tabla 4.25. Condiciones climatológicas para los días 04/08/2013 y 05/08/2013 en la universidad de Biskra, Argelia	104
Tabla 4.26. Comparativa y cuantificación de errores de resultados experimentales vs modelados (ICTA instalado en Biskra, Argelia)	105
Tabla 4.27. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (15/agosto/2017)	107
Tabla 4.28. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (15/septiembre/2017)	108

Tabla 4.29. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (15/octubre/2017)	109
Tabla 4.30. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (15/noviembre/2017)	110
Tabla 4.31. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (15/diciembre/2017)	111
Tabla 4.32. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (15/enero/2018)	112
Tabla 4.33. Termopares comerciales, rangos de aplicación e incertidumbre [92].	114
Tabla 5.1. Parámetros para tomar en cuenta para las proyecciones con el modelado del ICTA	115
Tabla 5.2. Condiciones de operación y resultados obtenidos por el modelado, en la localidad del Jicarero en Jojutla Morelos, día cálido (04/06/2020)	116
Tabla 5.3. Condiciones de operación y resultados obtenidos por el modelado, en la localidad del Jicarero en Jojutla Morelos, día frío (02/10/2020)	116
Tabla 5.4. Condiciones de operación y resultados obtenidos por el modelado, en la localidad de la Rosilla Durango, día cálido (05/06/2020)	119
Tabla 5.5. Condiciones de operación y resultados obtenidos por el modelado, en la localidad de la Rosilla Durango, día frío (31/12/2020)	120
Tabla 5.6. Parámetros climatológicos de operación seleccionados para el análisis paramétrico	122
Tabla 5.7. Potencial de enfriamiento según las dimensiones del ICTA	122
Tabla 5.8. Potencial de calentamiento según las dimensiones del ICTA	123
Tabla 5.9. Configuraciones recomendadas para la instalación de ICTA	123
Tabla 5.10. Análisis paramétrico del potencial de enfriamiento según las condiciones climatológicas del ICTA	124
Tabla 5.11. Análisis paramétrico del potencial de calentamiento según las condiciones climatológicas del ICTA	125
Tabla 5.12. Análisis paramétrico del efecto de la humedad del suelo para fines de enfriamiento (Jojutla Mor. 04/06/2020 15:00)	126
Tabla 5.13. Análisis paramétrico del efecto de la humedad del suelo para fines de calefacción (La Rosilla Dgo 31/12/2020 20:00)	127

Tabla 5.14. Resultados del potencial de enfriamiento según la longitud aislada de la tubería de salida del ICTA	129
Tabla 5.15. Resultados del potencial de calentamiento según la longitud aislada del tubo de salida del ICTA	129
Tabla 5.16. Ubicaciones representativas para los 4 climas más comunes de México	130
Tabla 5.17. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en Fronteras, Sonora (12/Junio/2022)	131
Tabla 5.18. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en Fronteras, Sonora (04/febrero/2022)	132
Tabla 5.19. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en San Luis Potosí (08/Mayo/2022)	133
Tabla 5.20. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en San Luis Potosí (13/Febrero/2022)	134
Tabla 5.21. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en Mérida, Yucatán (08/Mayo/2022)	135
Tabla 5.22. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en Mérida, Yucatán (18/Enero/2022)	136
Tabla 5.23. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en Tlacotalpan, Veracruz (08/Mayo/2022)	137
Tabla 5.24. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en Tlacotalpan, Veracruz (05/Febrero/2022)	138
Tabla 5.25. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en Ciudad Juárez, Chihuahua (19/Julio/2022)	139
Tabla 5.26. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en Ciudad Juárez, Chihuahua (04/Febrero/2022)	140
Tabla 5.27. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en Guayaquil, Baja California Norte (31/Agosto/2022)	141
Tabla 5.28. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en Guayaquil, Baja California norte (24/Febrero/2022)	142
Tabla 5.29. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en La Rosilla, Guanaceví Durango (11/Junio/2022)	143
Tabla 5.30. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en La Rosilla, Guanaceví Durango (07/Febrero/2022)	144

Tabla 5.31. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en St. Tomás Ajusco cdmx (16/Abril/2022)	145
Tabla 5.32. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en St. Tomás Ajusco cdmx (10/Febrero/2022)	146
Tabla 5.33. Potencial de operación del ICTA	147
Tabla 5.34. Aplicación de tarifas domésticas de CFE según el consumo mensual (2023) [28]	148
Tabla 5.35. Ejemplo de tarifa normal vs tarifa especial de verano para la CFE.	148
Tabla 5.36. Consumo mensual de electrodomésticos [98]	149
Tabla 5.37. Posible reducción del consumo energético mensual y anual debido a la implementación de un ICTA en una casa habitación.	150
Tabla 5.38. Porcentajes de reducción del consumo energético por la implementación de un ICTA	152
Tabla 5.39. Propiedades de los combustibles más utilizados en México para la producción de energía eléctrica [100]	152
Tabla 5.40. Emisiones estimadas anuales de CO ₂ , CH ₄ , y N ₂ O emitidas por una vivienda promedio	153
Tabla 5.41. Emisiones estimadas anuales de CO ₂ , CH ₄ , y N ₂ O emitidas por una vivienda promedio	153
Tabla 5.42. Efectos en la salud humana por la exposición constante a GEI	154

Nomenclatura y simbología

Nombre	Símbolo (Unidad)
Constante de conductividad térmica	λ (W/m°C)
Calor específico a presión constante	C_p (J/kg°C)
Temperatura	T (°C)
Longitud horizontal total	H_x (m)
Longitud vertical total	H_y (m)
Número de nodos horizontales	N_x
Número de nodos verticales	N_y
Tamaño horizontal del elemento	Δx (m)
Tamaño vertical del elemento	Δy (m)
distancia nodal horizontal	δx (m)
distancia nodal vertical	δy (m)
Término fuente	g (W)
Densidad	ρ (kg/m ³)
Flujo de calor por conducción	Q_{cond} (W/m ²)
Flujo de calor convectivo	Q_{conv} (W/m ²)
Flujo de calor evaporativo	Q_{evap} (W/m ²)
Irradiancia solar	G_b (W/m ²)
Componente de velocidad vertical	v (m/s)
Componente de velocidad horizontal	u (m/s)
Presión	P (Pa)
Coeficiente de convección suelo-aire	h_{sup} (W/m ² °C)
Coeficiente de emisividad	ε
Coeficiente de absorptividad	α
Viscosidad dinámica	μ (m ² /s ²)
Coeficiente convectivo de transferencia de calor	h_{sup}
Variable dependiente genérica de transporte	ϕ
Incremento temporal	Δt (s)
Coeficientes utilizados de la ecuación de coeficientes agrupados	$a_p, a_E, a_W, a_N, a_S, b$
Flujos difusivos a través del volumen de control "P"	D_e, D_w, D_n, D_s
Flujos convectivos a través del volumen de control "P"	F_e, F_w, F_n, F_s
Flujos totales convectivo - difusivos a través del volumen de control "P"	F_e, F_w, F_n, F_s
Número de Reynolds	Re
Número de Rayleigh	Ra
Número de Péclet	Pe
Término fuente en los modelos matemáticos	S
Intercambiador de calor tierra - aire	ICTA
Método de volumen finito	MVF
Dinámica de fluidos computacional	CFD

Capítulo 1: Introducción.

A principios del siglo XX con el inicio de la segunda revolución industrial los avances tecnológicos enfocados a la aplicación de nuevas fuentes de energía como el gas y el petróleo, además del ya utilizado carbón, permitieron el desarrollo del transporte, la comunicación, maquinaria pesada, entre otros beneficios tecnológicos, sin embargo, al tener como fuente de energía principal la quema de estos combustibles fósiles, surgió un problema de carácter ambiental debido a la sobreproducción artificial de gases de efecto invernadero, cenizas y exposición de contaminantes al ambiente, etc.

En la década de 1970 se empezó a considerar a las energías renovables como una alternativa a la quema de combustibles fósiles para la producción de energía, debido a su disponibilidad y al menor impacto ambiental que presenta su explotación.

En diciembre de 2015 en París, los líderes mundiales de 195 países incluido México, se comprometieron a lograr la descarbonización neta global de las actividades humanas antes de 2100, además, acordaron proseguir los esfuerzos para limitar el aumento promedio global de la temperatura a 1.5 °C por encima de los niveles preindustriales [1].

1.1 Producción energética en México

Actualmente en México la producción de energía proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles, según los datos reportados por la Secretaría de energía (SENER) y la Subsecretaría de planeación y transición energética, en su informe anual del 2022, se reporta que la quema de hidrocarburos aportó el 80.71 % a la producción de energía, la quema de carbón con un 1.84 %, la energía producida por fisión nuclear un 2.05 % y la producción de energía por fuentes renovables es del 15.4 %, en la figura 1.1 y tabla 1.1 se muestra la variación en la producción de energía según el tipo de combustible del año 2012 y 2014 respectivamente hasta el año 2022 [2].

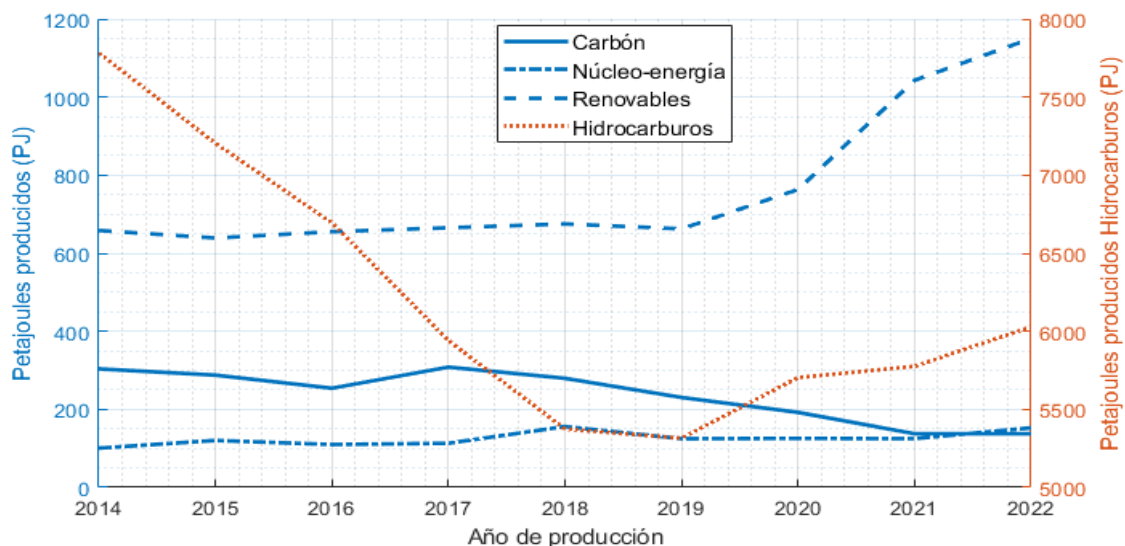


Figura 1.1. Combustibles utilizados en la producción de energía eléctrica en México 2014-2022 [2].

Tabla 1.1. Aportaciones de los diferentes combustibles utilizados en la producción de energía eléctrica en México 2014-2022 (Petajoules, PJ) [2]

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Total	8,845	8,250	7,714	7,027	6,484	6,332	6,784	7,081	7,468
Carbón	303	287	254	308	279	230	192	137	137
Hidrocarburos	7,782	7,203	6,694	5,940	5,374	5,315	5,703	5,775	6,028
Petróleo crudo	5,597	5,067	4,826	4,354	4,045	3,788	3,820	3,905	3,807
Condensados	106	98	88	67	48	60	140	293	563
Gas natural	2,079	2,037	1,779	1,518	1,279	1,466	1,741	1,576	1,657
Núcleo-energía	100	120	109	113	156	124	125	124	152
Renovables	658	638	655	665	675	662	763	1,042	1,150
Hidroenergía	140	111	110	114	116	84	96	282	315
Geoenergía	129	134	132	127	113	112	112	92	98
Energía eólica	23	31	37	38	47	60	70	166	180
Energía solar	0	0	11	15	23	40	50	150	196
Biogás	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Biomasa	363	359	361	367	371	361	429	349	357
Bagazo de caña	109	107	110	116	121	113	99	103	112
Leña	254	252	251	250	249	247	330	245	244

La quema de hidrocarburos en la actualidad sigue siendo el principal medio de producción de energía eléctrica en México, según lo observado en la figura 1.1 y la tabla 1.1, ya que la producción de energía por medios renovables hasta el año 2021 no había alcanzado los 1000 PJ, de los más de 7000 PJ producidos ese mismo año, sin embargo, la quema de hidrocarburos también se puede reducir al disminuir el consumo energético por la implementación de ecotecnologías o tecnologías sustentables, que cubran necesidades como la calefacción y enfriamiento de edificaciones.

1.2 Generalidades del desarrollo sustentable.

El desarrollo sustentable es un enfoque holístico y equitativo para abordar los desafíos globales respecto a la protección del medio ambiente y el desarrollo sustentable, con la finalidad de satisfacer las necesidades de la actualidad sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas. Este concepto se basa en el hecho de que los recursos naturales son limitados y que debemos utilizarlos de manera responsable y eficiente para asegurar un equilibrio entre el progreso humano y la preservación del medio ambiente [3].

El desarrollo sustentable implica la adopción de prácticas y políticas que promuevan la conservación de los recursos naturales, la reducción de la contaminación, la equidad social y económica. Se busca integrar la dimensión ambiental, social y económica en todas las decisiones y acciones que tomamos como sociedad, ya sea a nivel local, nacional o global.

El concepto de sustentabilidad tiene 4 ejes principales, o aspectos que deben ser tomados en cuenta en cualquier proyecto de sustentabilidad energética, estos son:

Sustentabilidad Política

Implica que el desarrollo de una tecnología sustentable no entre en conflicto con la política pública de un país, región o grupo social. Una tecnología energética se considera como sustentable en el marco político si está en concordancia con el sistema legal de la entidad federativa donde esta se pretende aplicar [4].

Sustentabilidad social

La sustentabilidad social está enfocada en principios éticos, los cuales están orientados hacia la creación de condiciones que favorezcan el desarrollo completo del individuo sin comprometer las condiciones y circunstancias que garanticen la continuidad de las vidas futuras.

Una tecnología energética es socialmente sustentable mientras se tenga acceso igualitario para todos los miembros de una sociedad, de manera similar, se considera más sustentable cuando la disponibilidad del recurso energético es equitativa. Otro aspecto de la sustentabilidad, desde la perspectiva del consumo, está vinculado a las necesidades que impulsaron su demanda. Por lo tanto, la energía generada por sistema energético será más sustentable si las necesidades que motivaron la innovación son más fundamentales [5].

Sustentabilidad económica

La sustentabilidad económica de una tecnología energética debe ser evaluada durante todo su ciclo de vida. Esta puede ser evaluada en los siguientes términos [5, 6].

1. La asequibilidad. Esta característica alude a la capacidad del usuario de una tecnología para contar con los recursos requeridos para la instalación, el funcionamiento y la desinstalación de un dispositivo tecnológico.
2. La capacidad de reutilización. Implica la posibilidad de emplear las piezas de un dispositivo en otros al llegar al final de su ciclo de vida, de esta forma, cuanto mayor sea la proporción de piezas reutilizables, mayor será el nivel de sustentabilidad asociado.
3. La disponibilidad local de los recursos. Una tecnología se considera más sustentable a medida que los recursos necesarios para su operación sean locales o no requieran de elevados costos de transporte para su operación.

Sustentabilidad ambiental

La sustentabilidad ambiental para una tecnología energética sustentable implica que el impacto ocasionado al medio ambiente debido a la implementación de dicha tecnología sea mínimo, en el uso de recursos y en producción de residuos.

Además de los aspectos social, político, económico y ambiental, en el ámbito de las tecnologías, es crucial incorporar otro factor: la sustentabilidad técnica, esto con la finalidad de no solo considerar la factibilidad técnica de cada objeto y proceso de manera individual, de esta forma, se considera también como se relacionan con la infraestructura técnica del entorno donde se implementará una tecnología [7].

Sustentabilidad tecnológica

Se basa en la existencia de una infraestructura compatible, lo que implica que el sistema tecnológico ya establecido sea el adecuado y que haya personal capacitado para utilizar y operar dicha tecnología de manera eficaz. Una infraestructura inadecuada puede ocasionar la inoperatividad de la tecnología generando pérdidas económicas. Asimismo, operadores sin la capacitación adecuada también pueden provocar pérdidas económicas y situaciones de riesgo, por un uso incorrecto de la tecnología en cuestión [7].

1.3 Ecotecnologías para viviendas sustentables.

Las ecotecnologías surgen en la década de 1960 y 1970, en su progreso han agregado distintas contribuciones desde áreas del conocimiento predictivas y cuantitativas hasta nociones cualitativas sociales y culturales.

Ecotecnología puede definirse como: “los diferentes dispositivos, métodos y/o procesos que brindan beneficios sociales y económicos a sus usuarios en armonía con el ambiente y con referencia a un contexto socio-ecológico específico” [8]. Esta propuesta plantea que los procesos de innovación eco-tecnológica deben considerar una serie de criterios esenciales, entre los cuales se destacan:

- Los usuarios deben involucrarse por medio de estrategias participativas del desarrollo tecnológico.
- La vinculación tanto de conocimientos científicos y conocimientos o información local.
- Fomento a la colaboración entre diversos actores, incluyendo la academia y las organizaciones de la sociedad civil.
- Garantizar un efecto positivo en la vida diaria y en la calidad de vida del usuario.

El impacto ambiental de una edificación es proporcional a la cantidad de recursos y emisiones que se relacionan con las actividades y procesos que suceden en la edificación durante su ciclo de vida. Por tanto, una edificación que pretende ser ecológica debe considerar los siguientes aspectos:

- Consumo de energía.
- Consumo de agua.
- Uso de suelo con valor ecológico.
- Consumo de materiales escasos.
- Emisiones atmosféricas.
- Impacto ecológico.

La eficiencia energética de un edificio se determina mediante la medición de la energía que utiliza durante un año bajo condiciones habituales de uso y ocupación, abarcando aspectos como calefacción, enfriamiento, ventilación, agua caliente, iluminación, entre otros. Estos datos representan los valores finales de consumo energético, medidos en (kWh/m² año) y en (kg CO₂/m² año). Es decir, para medir la eficiencia energética de un edificio se usan los indicadores de: el consumo anual de energía primaria no renovable que registra esa vivienda y las emisiones anuales de CO₂ [9].

Conceptos básicos para la implementación de ecotecnologías en edificaciones

La implementación de ecotecnologías se está convirtiendo en una tendencia global como estrategia para reducir la huella de carbono de edificaciones convencionales.

Para lograr una reducción en el consumo energético de una edificación, se deben hacer esfuerzos para reducir el uso general de energía al máximo mediante la integración ecotecnologías [10]. Según la revisión bibliográfica realizada se concluyó que:

- El enfriamiento y la ventilación causan la mayor parte del consumo de energía en edificaciones convencionales [11].
- Es importante concentrarse en todas las posibles acciones pasivas de ahorro de energía antes de adoptar medidas activas [12].
- Los sistemas de recuperación de calor son necesarios en localidades con climas fríos [13].
- Se debe planificar cada parte y aspecto del edificio y los programas de modelado matemático pueden ayudar a estimar el rendimiento energético [14].
- La dirección y velocidad del viento son las principales responsables de la eficiencia de los sistemas de ventilación natural. Las fuerzas impulsadas por el viento son responsables de un 76% más de flujo de aire interior que las fuerzas impulsadas por la flotabilidad [15].
- Los vientos turbulentos resultan difíciles de predecir y pueden provocar una falta o un aumento de la ventilación, mientras que los vientos laminares crean una ventilación constante [16].

La dificultad para los arquitectos e ingenieros es combinar diferentes tecnologías de manera eficiente y asequible para establecer una pauta normalizada. Dado que la mayor parte de la energía eléctrica es consumida por los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés), las nuevas tecnologías, deben desempeñar su papel en la mejora del rendimiento energético general de las edificaciones.

1.4 Incremento en el uso de sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado a nivel mundial

Actualmente la demanda y capacidad instalada de enfriamiento en edificaciones está aumentando exponencialmente, principalmente debido a las siguientes 3 razones [17]:

1. El calentamiento global está aumentando los requerimientos de enfriamiento en localidades a nivel mundial donde antes no era necesario.
2. Los países con economías emergentes se ubican principalmente en zonas con climas cálidos. Por lo tanto, a medida que mejora el estilo de vida en estos países, aumenta también el requerimiento de confort térmico.
3. La proliferación de edificios con una gran cantidad de acristalamiento, sin el tipo de vidrio o las protecciones solares adecuadas.

En un informe publicado por la Agencia Internacional de la Energía titulado “The future of cooling” (2018) [18], se muestra una perspectiva global del consumo energético para fines de enfriamiento de edificaciones hasta el año 2050 (figura 1.2). Además, el consumo energético para enfriamiento de edificaciones será el de mayor crecimiento para el 2050 según las proyecciones realizadas por los autores como se observa en la figura 1.3.

En el informe The future of cooling también se prevé que el uso mundial de energía para el enfriamiento de espacios pase de 2020 TWh en 2016 a 6200 TWh en 2050, un sorprendente aumento de poco más del 200 %. Casi el 70 % de este aumento proviene del sector residencial, donde la necesidad de enfriamiento de espacios es mayor (algunas oficinas, comercios, hospitales y edificios públicos ya cuentan con aire acondicionado); la participación del sector residencial en la demanda total de energía para enfriamiento de espacios aumenta del 45 % a casi el 65 % [18].

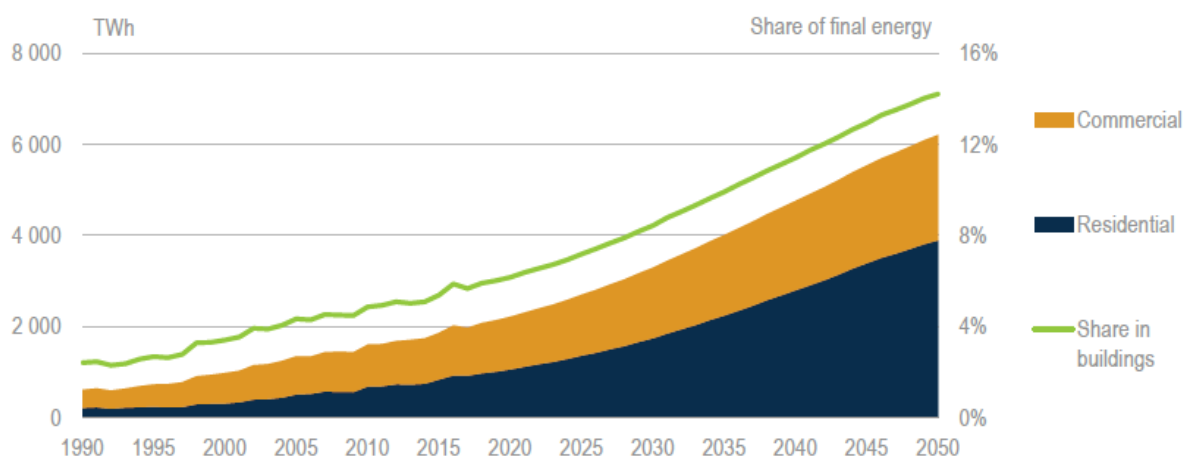


Figura 1.2. Perspectiva actual y a futuro del consumo energético mundial para fines de enfriamiento de edificaciones [18].

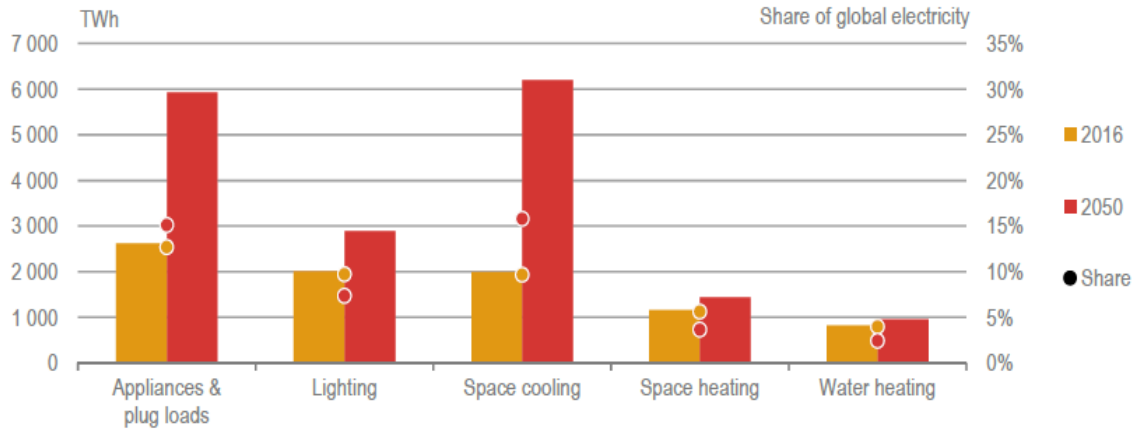


Figura 1.3. Demanda energética por aplicación de uso final [18].

La mayor parte del crecimiento proyectado en el uso de energía para enfriamiento de edificaciones proviene de los países con economías emergentes, en los cuales se encuentra México (figura 1.4) en la octava posición con mayor demanda para el año 2050.

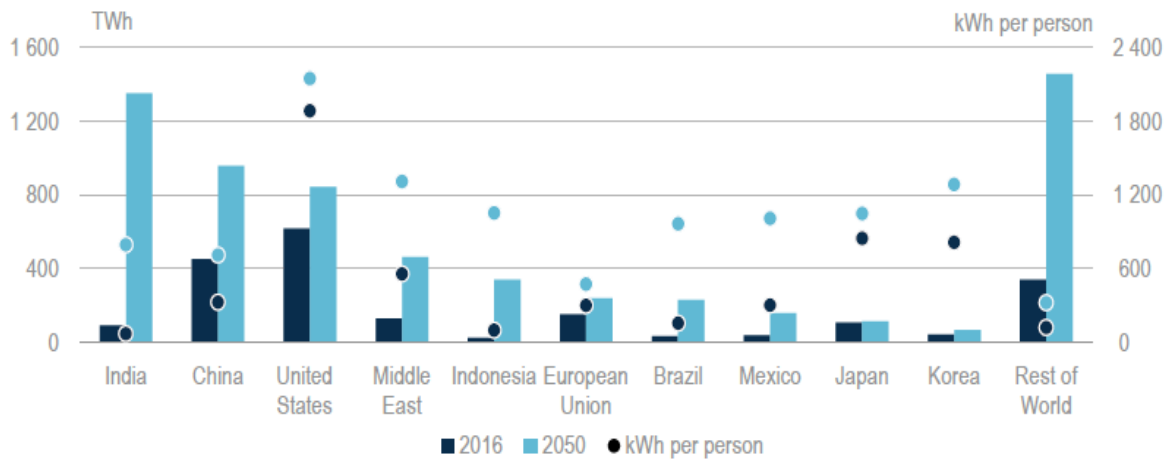


Figura 1.4. Uso de energía para fines de enfriamiento de edificaciones por país/región [18].

Otros autores como Pierre-Louis (2018) estiman que las unidades instaladas de aire acondicionado crecerán drásticamente de 1600 millones a 5600 millones de unidades instaladas para el año 2050, principalmente por la contribución de países como China, India e Indonesia [19]. Además, este crecimiento en uso de sistemas de aire acondicionado tiene como consecuencia un aumento en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), lo que provoca un ciclo de retroalimentación, que incrementa el calentamiento global y produce a su vez una mayor necesidad de enfriamiento de edificaciones [20].

Una de las variables más importantes a tomar en cuenta referente al incremento de sistemas de aire acondicionado enfocados al enfriamiento de edificaciones, es el aspecto económico, principalmente para comunidades y sectores de la población que tienen bajos ingresos o son insuficientes para mantener el gasto económico que requieren este tipo de sistemas [21]. También

se debe considerar que cada vez los periodos cálidos serán más intensos y severos, en consecuencia, es evidente la necesidad de implementar sistemas de enfriamiento sustentables y económicamente asequibles, es decir, que no representen un problema en la economía de la mayoría de la población y que a su vez evite la privación del confort térmico, que es un indicador de pobreza energética [22,23].

1.5 Pobreza energética en México

La pobreza energética se define como la condición en la que un hogar no puede costear una cantidad adecuada de energía para cubrir sus necesidades domésticas básicas [24].

Boardman (1991) define que un hogar se encuentra en pobreza energética cuando no puede cubrir los servicios adecuados de energía con el 10% de sus ingresos [25].

Según un estudio publicado en 2016 por Rigoberto García-Ochoa y Boris Graizbord. El 36.7% de los hogares mexicanos viven en pobreza energética, además determinaron los usos finales de energía más importantes en el sector residencial del país, los cuales se ven reflejados en la figura 1.5 y son: calentamiento de agua, cocción de alimentos, uso de refrigerador, iluminación, confort térmico y entretenimiento [26].

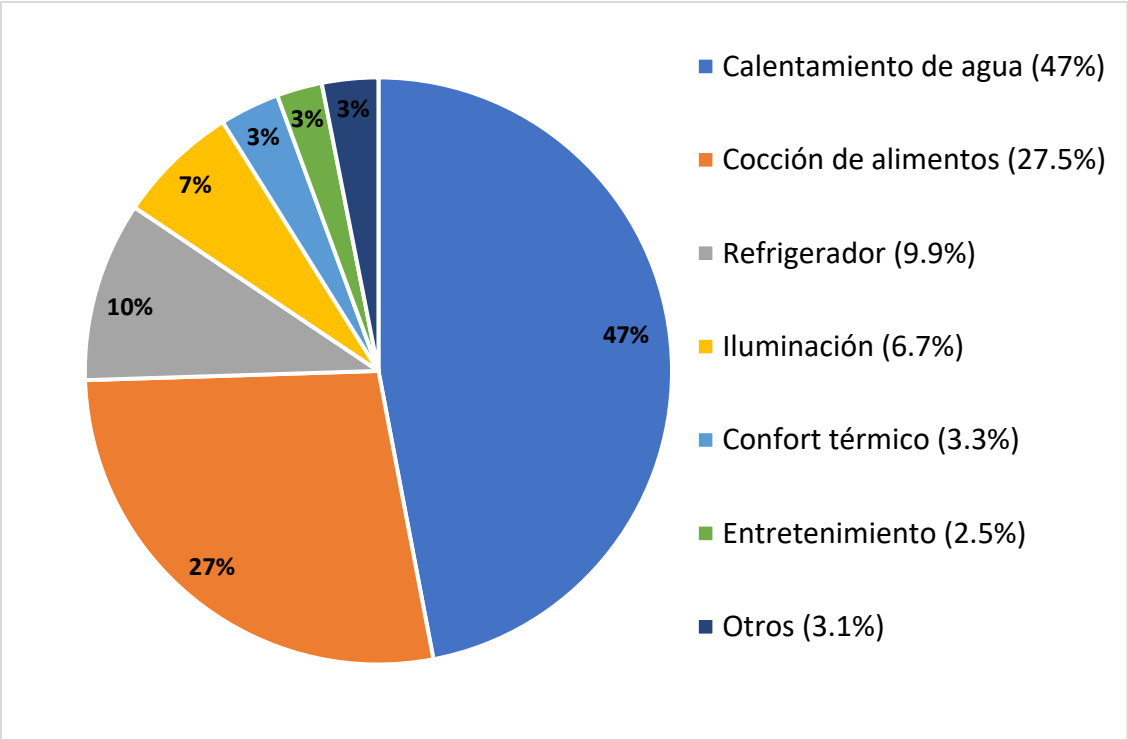


Figura 1.5. Participación de los principales usos finales en el consumo total de energía [26].

Al aplicar un método denominado como “Método de satisfacción de necesidades absolutas de energía”, Rigoberto García-Ochoa y compañía también obtuvieron una estimación de la cantidad

de hogares que se encuentran en situación de pobreza energética y los clasificaron según los bienes o servicios de privación según la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Hogares en situación de pobreza energética y privación de bienes económicos [26]

Concepto	Número de Hogares	%
Iluminación	674,651	2.2
Entretenimiento	1,657,686	5.5
Calentamiento de agua	2,625,363	8.7
Cocción de alimentos	5,016,868	16.6
Enfriamiento eficiente	6,394,895	21.1
Confort térmico	3,841,903	33.0

Los bienes económicos que presentan mayor carencia son el confort térmico en primer lugar con un 33%, seguido de refrigerador eficiente con un 21.1%, la estufa de gas o eléctrica con un 16.6%; mientras que calentamiento de agua (8.7%), entretenimiento (5.5%) e iluminación (2.2%) son los que presentan menor privación en México [26].

Para determinar la cantidad de hogares que requieren el bien de confort térmico a partir de datos obtenidos por el INEGI en 2013 y 2014, se tiene la distribución de estos en la tabla 1.3.

Tabla 1.3. Distribución de hogares en los estados con zonas climáticas cálidas y templadas [26]

Estado	Cantidad de hogares localizados en climas cálidos	%	Cantidad de hogares localizados en climas templados	%	Total
Coahuila	323,994	43,4	421,830	56,6	745,824
Chiapas	935,564	82,0	205,531	18,0	1,141,095
Durango	177,004	41,3	251,576	58,7	428,580
Jalisco	213,705	11,3	1,684,862	88,7	1,898,567
Michoacán	159,352	19,0	679,343	81,0	838,695
Morelos	488,936	98,1	9364	1,9	498,300
Oaxaca	565,601	58,1	407,894	41,9	973,495
San Luis Potosí	309,846	46,4	357,529	53,6	667,375
Zacatecas	185,984	48,7	196,251	51,3	382,235

Tomando como ejemplo el estado de Morelos, según la tabla 1.3, el 98% de las viviendas se encuentran ubicadas en climas cálidos, lo que implica que la población de esta entidad requiere de confort térmico, principalmente para fines de enfriamiento, sin embargo, a nivel nacional el 33% de la población se priva de este bien por razones económicas, además, se tiene que tomar en cuenta que las tecnologías (HVAC) consumen una gran cantidad de energía, al mismo tiempo que contaminan el ambiente.

1.6 Sistemas HVAC instalados en México

En México, según datos recolectados y reportados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en 2018 la presencia de equipos de aire acondicionado es más alta en las regiones cálidas, donde al menos un 48% de las viviendas tiene al menos un equipo de aire acondicionado, como se muestra en la figura 1.6, para el caso de sistemas de calefacción, a diferencia de las estimaciones de la Unión Europea y España, en México se estima que solo el 6.3% de la población, tiene algún sistema de calefacción de aire (figura 1.7).

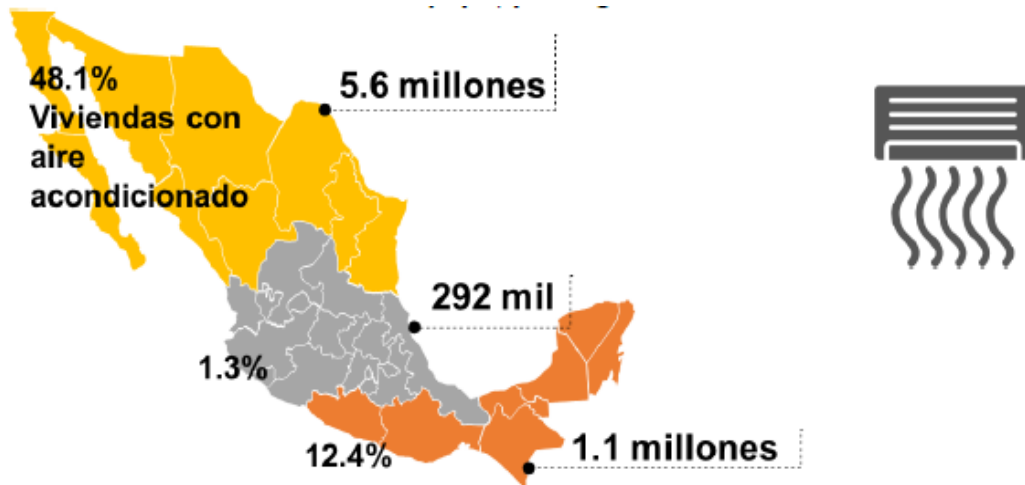


Figura 1.6. Número de equipos de aire acondicionado y porcentaje de viviendas con al menos un equipo por región [27].

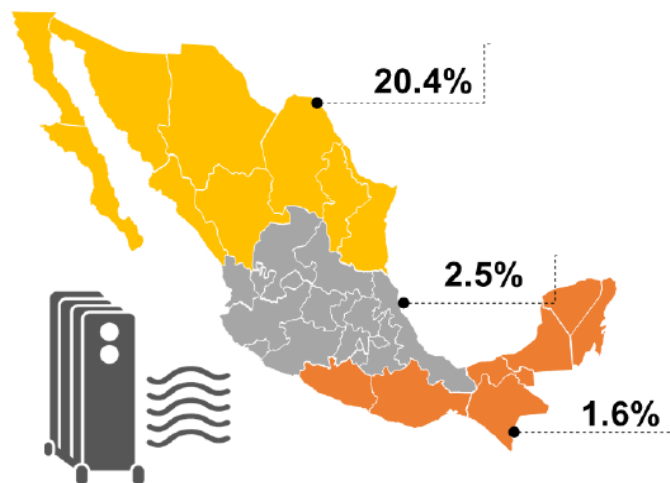


Figura 1.7. Porcentaje de viviendas particulares habitadas con calefactor por región [27].

1.7 Regiones climáticas de México

En el territorio mexicano se identifican 7 grandes tipos de clima (figura 1.8) de los cuales 4 de ellos destacan con la mayor extensión geográfica empezando con el clima seco y/o semiseco con una

extensión del 32.02 % del total, seguido del clima cálido subhúmedo con un 28.87 %, muy seco o seco desértico con 21.09 % y templado subhúmedo con un 10.36 %, mientras que los 3 climas restantes son el cálido húmedo con un 6.94 %, templado húmedo con un 0.69 % y por último el clima frío con 0.03 % [28].

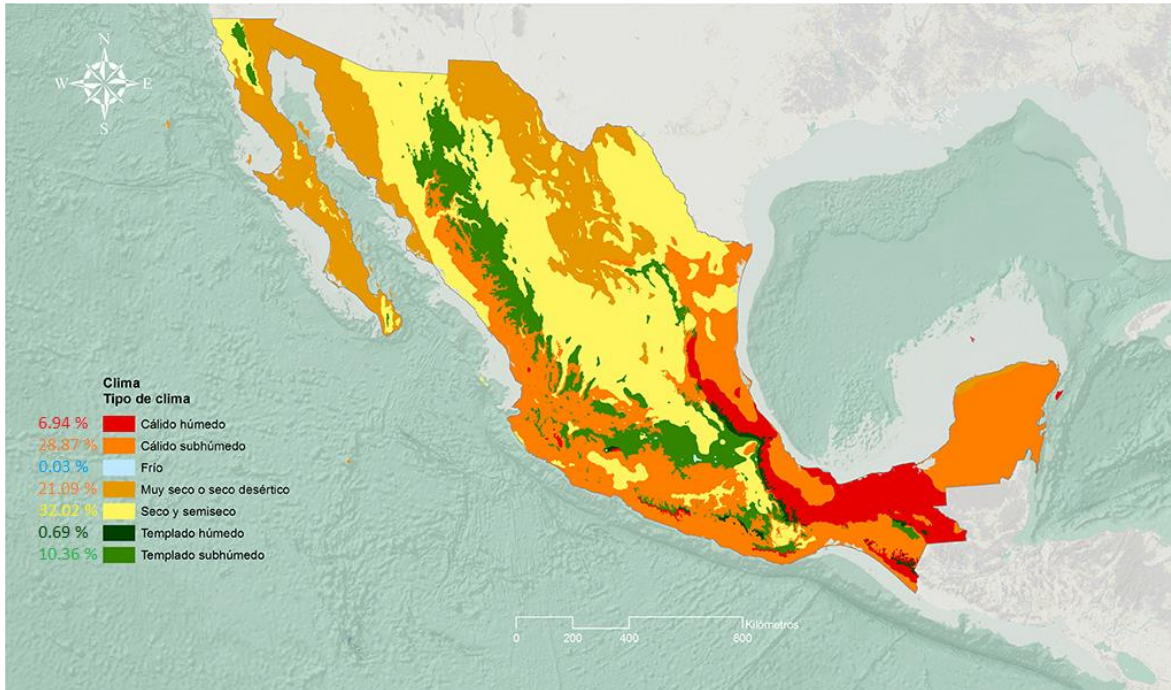


Figura 1.8. Distribución de climas en México [28].

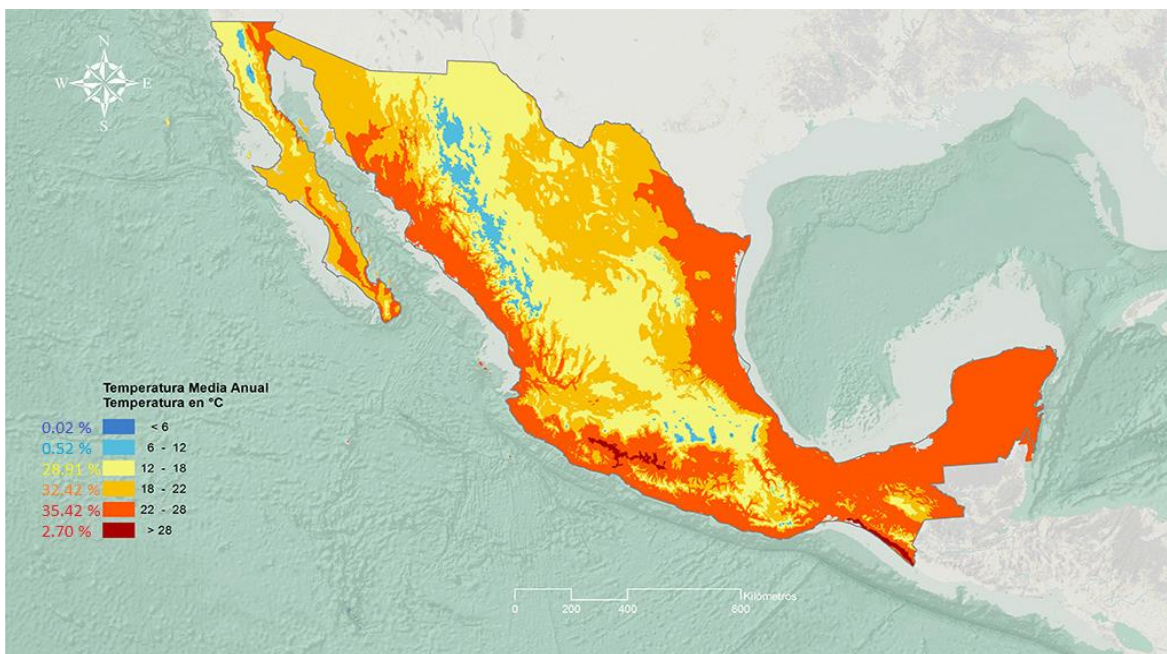


Figura 1.9. Distribución de temperatura media anual en México [28].

La distribución de temperatura media anual en México se reporta en la figura 1.9 con ayuda del atlas digital publicado por la SEMARNAT, donde la mayor parte del territorio mexicano tiene temperaturas medias anuales que se encuentran en el intervalo de 22 – 28 °C con un 35.42 % de la extensión total, seguida por temperaturas entre 18 – 22 °C con 32.42 % y temperaturas de 12 – 18 °C con 28.91 %, mientras que los intervalos de 6 – 12, < 6 y >28 °C apenas suman un 3.27 % de la extensión total.

1.8 Distribución de suelos según su textura en México

Se conoce como textura del suelo al porcentaje de partículas gruesas, medias y finas que presenta una determinada muestra de suelo, las partículas con mayor tamaño son arenas (2 – 0.02 mm), las partículas con tamaño intermedio se conocen como limo (0.02 – 0.002 mm) y a las partículas más finas que componen los suelos llevan el nombre de arcillas (< 0.002 mm), y se pueden clasificar según el diagrama triangular de suelos según su textura (figura 1.10) [29].

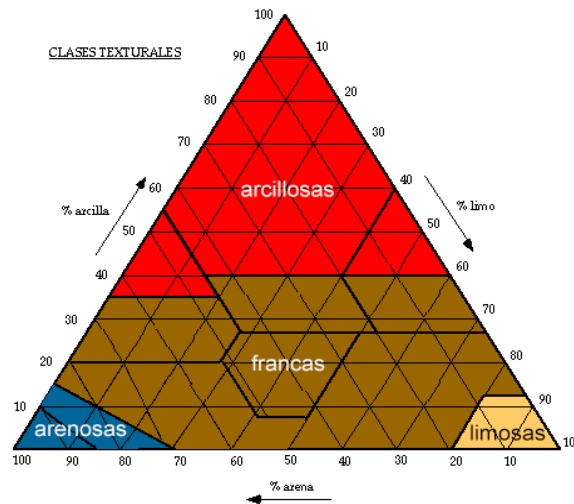


Figura 1.10. Diagrama triangular para la clasificación del suelo según su textura predominante [29].

En la figura 1.11 se presenta la distribución de suelos según su textura en el territorio mexicano, donde se observa una predominancia del suelo tipo franco con un 61.42 %, seguido de los suelos arcillosos con un 20.75 % de la extensión total [30].

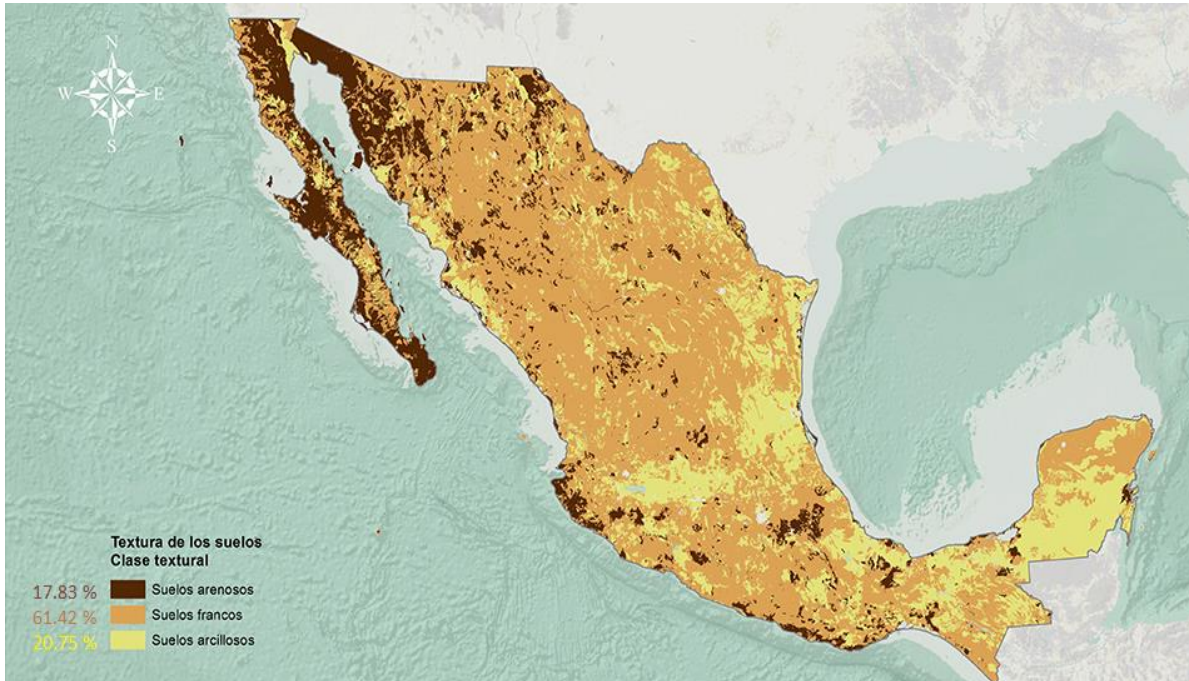


Figura 1.11. Distribución de suelos según su textura en México [30].

1.9 Energía geotérmica de baja entalpía.

En 1930, Islandia se convirtió en el primer país en establecer un servicio de calefacción geotérmica a gran escala, inaugurando esta innovadora tecnología en la ciudad de Reykjavik. Desde la década de 1920, la geotermia ya se había empleado para calentar invernaderos, y poco después, se comenzó a utilizar el calor proveniente de la tierra en la industria textil para el lavado de lanas. Sin embargo, fue después de la crisis del petróleo cuando el interés por esta fuente limpia de energía se disparó en todo el mundo. Entre 1975 y 1995, el crecimiento medio de la electricidad geotérmica alcanzó un 9% anual, mientras que los usos directos aumentaron a una tasa del 6% anual, cifras significativamente altas en comparación con otras fuentes de energía no renovables y más contaminantes [31].

Según el Consejo Europeo de la Energía Geotérmica, la geotermia se define como la energía almacenada en forma de calor debajo de la superficie de la tierra. Por otro lado, el Instituto Geológico y Minero de España la define como una fuente de energía renovable abundante, cuya explotación es viable desde el punto de vista técnico y económico, y que contribuye a evitar emisiones de gases de efecto invernadero. Además, su existencia en nuestro subsuelo está comprobada [33].

El nivel energético del suelo depende de dos fuentes de energía exclusivamente.

1. Energía en forma de radiación proveniente del sol.
2. Energía terrestre o geotérmica proveniente del magma.

El aprovechamiento de la energía geotérmica está experimentando un crecimiento constante debido a sus ventajas económicas y su bajo impacto ambiental. México cuenta con un gran potencial en este recurso; desde el año 2011, la Comisión Reguladora de Energía informó que la Comisión Federal de Electricidad tiene una reserva probada de 1142 megawatts eléctricos (MWe) en cada uno de los campos en operación, una reserva posible de 7,422 MWe y una estimación probable de 2,077 MWe [34]. La energía geotérmica puede clasificarse según el rango de temperaturas de trabajo, como se muestra en la tabla 1.4.

Tabla 1.4. Clasificación de la energía geotérmica según la temperatura del suelo [31].

Clasificación	Tipo de yacimiento	Rango de temperatura	Principal aplicación
Muy baja entalpía	Subsuelo con o sin agua	$5^{\circ}\text{C} < T < 30^{\circ}\text{C}$	Climatización
	Aguas subterráneas	$10^{\circ}\text{C} < T < 40^{\circ}\text{C}$	
Baja entalpía	Aguas termales	$22^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C}$	balnearios, acuicultura
	Zonas volcánicas	$T < 100^{\circ}\text{C}$	Climatización (calefacción)
	Almacenes sedimentarios profundos		
Media entalpía	Zonas volcánicas	$100^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$	Producción de energía eléctrica
Alta entalpía	Zonas volcánicas	$T > 150^{\circ}\text{C}$	

Como se puede observar en la tabla 1.4, la energía geotérmica no necesariamente puede explotarse con fines de producción de energía eléctrica, como es el caso de la energía geotérmica de baja entalpía.

Un ejemplo de una aplicación distinta a la producción de energía eléctrica mediante el uso y aprovechamiento de la energía geotérmica, es la calefacción y acondicionamiento del aire en espacios habitacionales, el estudio de estas aplicaciones se sustenta en que el suelo al poseer una gran cantidad de masa interconectada presenta poca variación en su temperatura en comparación con la atmósfera, específicamente la tropósfera, además, a cierta profundidad, el suelo conserva una temperatura constante a lo largo del año, a este fenómeno se le conoce como inercia térmica del suelo.

1.10 Inercia térmica del suelo

El concepto de inercia térmica hace referencia a la capacidad que tiene un determinado material para conservar su temperatura y la velocidad con la que cede o absorbe calor, de tal forma que está fuertemente ligado a la capacidad calorífica a presión o volumen constante y a su conductividad térmica, se puede decir entonces que; la inercia térmica del suelo representa la resistencia de un determinado tipo de suelo al cambio de temperatura, cuanto mayor sea la

inercia térmica, menor será el cambio en la temperatura del suelo a medida que se incremente la profundidad [35].

Otros autores como Dai Matsushima (2018) definen a la inercia térmica del suelo como un parámetro que caracteriza una propiedad del suelo que se define como la raíz cuadrada del producto de la capacidad calorífica volumétrica y la conductividad térmica, además, argumenta que ambas propiedades se incrementan al aumentar la humedad del suelo, sin embargo, tanto la capacidad calorífica volumétrica, así como la conductividad térmica de un suelo para un determinado porcentaje de humedad, son variables de las cuales generalmente se desconoce con precisión el valor que adquieren, y por tanto, la estimación de cómo varía la inercia térmica en el suelo según su profundidad, resulta en una tarea especialmente complicada, si no se cuenta con experimentación que valide un determinado modelo predictivo para determinar el cambio de la temperatura en función de la profundidad del suelo [36].

Lo que es un hecho, es que el cambio en la temperatura que se da en el suelo a partir de una cierta profundidad es mucho más estable que la temperatura de los gases de la tropósfera, de tal forma que, la temperatura al interior del suelo tiende a permanecer constante durante todo el año como se aprecia en la figura 1.12.

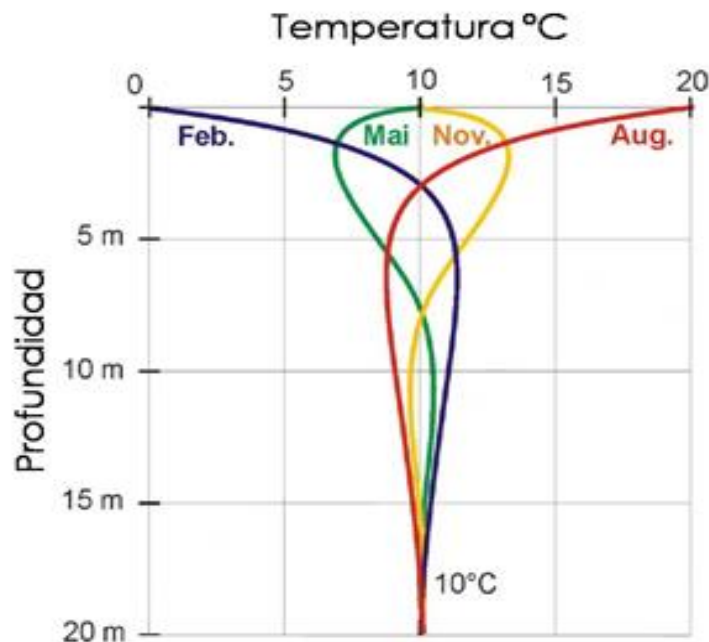


Figura 1.12. Evolución de la temperatura del suelo respecto a la profundidad, la línea azul representa la temperatura e invierno, la línea roja: el verano, las líneas verde y amarilla: primavera y otoño respectivamente [37].

El patrón de temperatura del suelo ilustrado en la figura 1.12 solo es válido hasta cierta profundidad. Más allá de ese punto, a medida que se profundiza, la temperatura comenzará a aumentar debido a las presiones ejercidas sobre las capas terrestres.

Se puede decir entonces que la energía geotérmica de baja entalpía está disponible a unos pocos metros de profundidad, a lo largo de todo el año y es accesible en todo el suelo del planeta.

1.11 Los intercambiadores de calor tierra-aire (ICTA)

Los sistemas que emplean la energía geotérmica de baja entalpía/potencia para la climatización y el acondicionamiento de edificios abarcan métodos como las bombas de calor geotérmicas y los intercambiadores de calor tierra-aire (ICTA). Su efecto es muy similar a un sistema HVAC tradicional que funciona tanto para enfriar o calentar el aire al interior de una edificación a lo largo del año, esto gracias al fenómeno físico de inercia térmica del suelo, y su principio de operación se puede ver de manera ilustrativa en la figura 1.13.

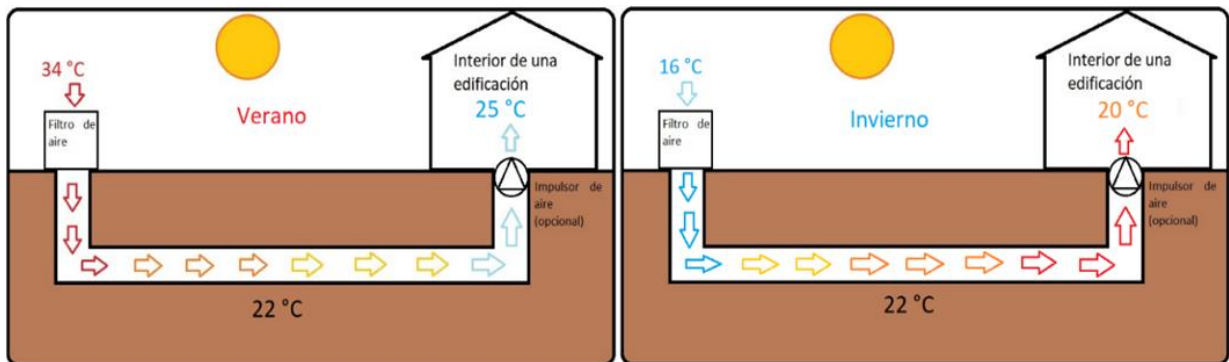


Figura 1.13. Principio básico de operación de un intercambiador de calor tierra-aire ICTA.

Los ICTA también son conocidos como pozos canadienses, ya que se han utilizado desde el siglo pasado con la finalidad de ahorrar energía en climatización de edificaciones, un pozo canadiense, es prácticamente un intercambiador de calor tierra aire (ICTA), pensado principalmente para fines de calefacción, debido a las bajas temperaturas de Canadá, estos surgen como una tecnología que ayuda a la sustentabilidad de las edificaciones [38, 39] de manera análoga, y aunque el principio de operación es prácticamente el mismo, este tipo de sistemas también reciben el nombre de pozos provenzales, debido a que eran utilizados para fines de enfriamiento en los veranos de Provenza, Francia.

Los intercambiadores de calor tierra aire (ICTA), pozos canadienses o provenzales se componen de cinco elementos fundamentales.

1. Una entrada de aire proveniente del exterior (instalada a cierta altura, mínimo 40 centímetros del suelo para evitar aire contaminado y filtraciones de agua, plantas, roedores e insectos).
2. El ducto o tubería de intercambio de calor (se coloca de 2 a 5 metros de profundidad)
3. Pozo de drenaje. Se emplea para retener la humedad que se acumula en el tubo de intercambio de calor, que se origina por la condensación, y puede ubicarse al principio o al final de la tubería.

4. Impulsor de aire. Es un ventilador o extractor que se encarga de hacer circular el aire en el interior del tubo de intercambio de calor.
5. Filtros de aire adecuados para garantizar la calidad de aire que ingresa a la edificación.

Las principales ventajas dadas por la implementación de ICTA en edificaciones son:

- Costo inicial reducido: En comparación con otros sistemas de climatización, la inversión inicial es mínima. Esto es especialmente cierto si la instalación se lleva a cabo antes de construir la vivienda.
- Mínimo gasto energético, el único gasto en energía sería en el caso de utilizar un ventilador o extractor de aire, el cual es mínimo.
- Mantenimiento económico: En este caso, solo se requiere limpiar o sustituir los filtros, realizar una limpieza de las tuberías y, de manera periódica, efectuar una purga del depósito de drenaje.
- Sistema natural, amigable con el medioambiente y con la salud, al no alterar la composición natural del suelo o del aire.
- Los diversos sistemas de climatización tienen un gran impacto en el ecosistema, mientras que los intercambiadores de calor tierra-aire (ICTA) utilizan recursos naturales abundantes como la energía geotérmica.
- Los ICTA renuevan continuamente el aire de la vivienda, manteniendo los niveles de humedad óptimos, a diferencia de los sistemas convencionales de climatización, que suelen alterar la humedad relativa del aire.

Sin embargo, y a pesar de todas las ventajas mencionadas anteriormente referente a los ICTA, es necesario probar su eficacia para distintos climas y tipos de suelo, además de tomar en cuenta en medida de lo posible, las características edafológicas del suelo. Por esta razón, esta investigación tiene como propósito modelar numéricamente el comportamiento de estos sistemas, tomando en cuenta las características edafológicas más relevantes del suelo, con la finalidad de tener una idea clara de cómo afectan estas variables el intercambio de calor del sistema en distintas condiciones de operación, ya que el desarrollo de una herramienta computacional para modelar estos sistemas, nos brinda la posibilidad de modificar el escenario de operación de manera virtual, a diferencia de la experimentación.

1.12 Revisión bibliográfica de estudios teóricos de ICTA

Mihalakakoub et al. (1994) Implementaron un modelo numérico transitorio basado en el acoplamiento simultáneo de transferencia de calor y masa en la tierra y el tubo intercambiador de calor. Los modelos propuestos se desarrollaron en el simulador TRNSYS. Demostraron que el tipo de superficie del suelo puede ser un factor controlable para mejorar el rendimiento de los ICTA, debido a que concluyeron que una superficie de suelo cubierta con hierva corta incrementa la capacidad de sistema para fines de enfriamiento [40].

Gauthier et al. (1997) propusieron un modelo para predecir el comportamiento térmico difusivo de la tierra para un arreglo en paralelo de tubos intercambiadores de calor múltiples mediante una formulación transitoria y tridimensional. En su estudio se despreció la transferencia de calor por gradiente de humedad en la tierra. Concluyeron que la velocidad óptima para el aire circulando dentro del ICTA es de 4 m/s, observaron también que la capacidad de almacenamiento de energía de la tierra aumenta con el incremento de humedad, sin embargo, este efecto se hace despreciable a medida que se incrementa la longitud del tubo y se disminuye la velocidad del aire [41].

Salah El-Din (1999) desarrolló dos modelos matemáticos para predecir la temperatura en la tierra de forma unidimensional y transitoria. El primer modelo es una aproximación de onda sinusoidal y el segundo una basada en las series de Fourier. Después de un análisis paramétrico con ambos modelos, determinó que la temperatura en la tierra se incrementa al incrementarse la humedad relativa del aire y la absorptividad de la tierra. La temperatura decrece al aumentar la evaporación en la tierra y la velocidad del viento [42].

Su et al. (2012) desarrollaron un modelo de simulación numérica para sistemas de ICTA enterrados a diversas profundidades. Este modelo consta de dos submodelos: uno que describe la temperatura y la humedad del aire mediante procesos de convección-difusión, y otro que permite calcular la conducción de calor para determinar la temperatura de la roca circundante, resolviendo la ecuación de difusión-convección de manera unidimensional en estado transitorio para prever la temperatura y la humedad del aire dentro del ICTA a una profundidad específica. Determinaron por medio del modelado numérico que la temperatura de la tierra permanece constante a partir de 10 metros de profundidad [43].

Ramírez-Dávila et al (2014) realizaron un estudio numérico para predecir el comportamiento térmico de un ICTA en tres ciudades de México. Estas ciudades presentan diferentes condiciones climáticas: un calor extremo en verano y bajas temperaturas en invierno (Ciudad Juárez, Chihuahua), clima templado (Ciudad de México) y clima cálido (Mérida, Yucatán). Se evaluó el rendimiento del ICTA utilizando un código de dinámica de fluidos computacional desarrollado con el método de volumen finito. La evaluación consideró cuatro diferentes flujos laminares correspondientes a los siguientes números de Reynolds, $Re = 100, 500, 1000, 1500$. Los resultados revelaron una reducción promedio de la temperatura del aire de 6.6 y 3.2°C durante el verano, y un aumento de 2.1 y 2.7°C durante el invierno para Ciudad Juárez y Ciudad de México, respectivamente. Para la ciudad de Mérida, Yucatán, el ICTA mostró su mejor rendimiento térmico durante el invierno, con un incremento de la temperatura del aire de 3.8°C. Concluyeron que el uso de ICTA es adecuado para la calefacción o enfriamiento de edificaciones en localidades con temperaturas extremas y moderadas, ya que el efecto de la inercia térmica en el suelo es más pronunciado [44].

Xamán et al. (2014) llevaron a cabo un estudio numérico para prever el comportamiento térmico de un intercambiador de calor tierra-aire con aislamiento térmico de poliestireno en la tubería de salida. Este estudio se realizó en tres ciudades de México: Ciudad de México, que tiene un clima

templado; Ciudad de Mérida, Yucatán, con clima cálido-húmedo; y Ciudad Juárez, Chihuahua, con un clima extremo. Consideraron el suelo como un medio sólido donde el calor se transfiere por conducción. Se encontró que el aislamiento con un espesor de 0.05 metros mejora el rendimiento del ICTA en climas templados y cálidos-húmedos. En invierno, el aislamiento aumenta el efecto de calentamiento entre 2 y 2.6°C en comparación con el ICTA sin aislamiento. En verano, el aislamiento térmico mejora el efecto de enfriamiento entre 1.3 y 5°C en comparación con el ICTA sin aislamiento. El aislamiento térmico de 0.05 metros de espesor instalado en la tubería de salida del ICTA demostró mejorar el rendimiento térmico del ICTA en climas templados y cálidos-húmedos. Sin embargo, para climas extremos, no se observó ninguna mejora en el rendimiento del ICTA debido a la inclusión del material aislante [45].

Xamán et al. (2015) realizaron un estudio numérico pseudo-transitorio para el comportamiento térmico de un ICTA en tres localidades de México. Consideraron las condiciones climáticas del día más caluroso en verano y el día más frío en invierno para un clima extremo (Juárez, Chihuahua), clima templado (Ciudad de México) y clima cálido-húmedo (Mérida, Yucatán). Las modelaciones del ICTA se realizaron utilizando un código basado en el método de volumen finito, con intervalos de una hora y considerando cuatro números de Reynolds (100, 500, 1000, 1500). Observaron que el ICTA funcionó correctamente para enfriamiento y calefacción durante todo el día. Sin embargo, para Mérida y Ciudad de México, el ICTA no funcionó durante ciertos períodos. El potencial máximo de enfriamiento proporcionado por el ICTA fue de 17.4, 10.2 y 10 °C en Juárez, Mérida y Ciudad de México. Por otro lado, el potencial máximo de calentamiento obtenido por el ICTA fue de 6.3, 12.5 y 3.2 °C en Juárez, Mérida y Ciudad de México, respectivamente. Concluyeron que los ICTA presentan un gran potencial en climas extremos como el de Ciudad Juárez, y también tienen un rendimiento aceptable para climas como el de Mérida y Ciudad de México. Por lo tanto, estos sistemas pasivos resultan en una opción a considerar en México para fines de confort térmico en edificaciones [46].

Haibin Wei y Dong Yang (2019) evaluaron un ICTA con una tubería que tiene una sección transversal rectangular plana, desarrollaron un modelo matemático para calcular su desempeño térmico en un ambiente térmico armónico y compararon los resultados teóricos usando un modelo numérico tridimensional. Sus resultados indican que en comparación con un ICTA circular de la misma área transversal, la fluctuación de la temperatura del aire de salida del ICTA rectangular plano es un 24.7 % menor y el rango de perturbación térmica del suelo es más corto, lo que da como resultado una onda de temperatura en el suelo alrededor de la tubería enterrada que decae más rápido y crea una temperatura más estable en la pared de la tubería. Adicionalmente, encontraron también que el coeficiente de rendimiento es mayor para tuberías con sección transversal circular, debido a que la caída de presión y el consumo de energía del ventilador del ICTA rectangular plano es mayor que el del ICTA circular [47].

Rosa et al. en 2020 utilizaron el software comercial ANSYS-CFX para evaluar numéricamente la influencia de tres parámetros en el rendimiento térmico general de un sistema ICTA para edificios residenciales en un clima mediterráneo de verano cálido: el espacio entre las tuberías, el diámetro de las tuberías y la velocidad del aire que fluye. Encontraron en su investigación que existe una

relación decreciente para el desempeño térmico de los ICTA a medida que se incrementa la velocidad del flujo de aire que circula en la tubería, aspecto que se hace notar en mayor medida para fines de enfriamiento, además, determinaron numéricamente que para sistemas con tuberías paralelas es posible reducir la distancia de tuberías hasta 0.5 metros sin comprometer el rendimiento del ICTA [48].

Chiesa y Zajch (2020) realizaron un análisis teórico para la implementación de ICTA's en nueve ubicaciones representativas en América del norte, utilizando archivos meteorológicos representativos para condiciones climatológicas a futuro, además, evaluaron las variaciones en los valores de humedad relativa del aire, ya que pueden ser importantes para localidades con una elevada humedad relativa del aire, debido a que esta condición puede generar condiciones de bajo confort térmico. Para solventar esta problemática, Kamal Kumar Agrawal et al. (2019) apuntan a la implementación de un sistema de control de humedad del aire, con la finalidad de reducir la humedad, sobre todo para la época de lluvia o en climas con un elevado porcentaje de humedad relativa, así como el uso intermitente del sistema, según las condiciones de operación. Como resultado, demostraron que los indicadores climáticos son herramientas previas al diseño efectivas para estimar el potencial de enfriamiento de ICTA. Estos pueden ser utilizados por las partes interesadas que evalúan el beneficio de los ICTA para proporcionar enfriamiento sostenible en varios climas y condiciones climáticas futuras [49, 50].

M. Rodríguez Vázquez et al. (2020) estudiaron el potencial térmico y de ventilación de un ICTA para seis climas en México. Las ciudades para el estudio fueron Villahermosa (cálido-húmedo), Mérida (cálido-subhúmedo), Monterrey (seco), Ciudad Juárez (muy seco), Zacualtipán-Hidalgo (cálido-húmedo) y Ciudad de México (cálido-subhúmedo). Los resultados que obtuvieron mostraron que el ICTA tiene un mayor potencial de operación en climas con niveles bajos de humedad relativa del viento (Monterrey, Nuevo León y Cd. Juárez, Chihuahua), respecto a localidades con humedades relativas del viento más elevadas (Villahermosa, Tabasco y Mérida, Yucatán) [51].

Mostafaepour et al. (2021) probaron 9 configuraciones diferentes de un ICTA en 3 profundidades con 3 longitudes de tubería, por medio de una metodología de modelado matemático, basado en la conservación de la energía y en estado estacionario o permanente. Determinaron que cuanto mayor sea la longitud y profundidad de la tubería, mayor será la eficiencia del sistema ICTA, reduciendo la carga total anual de enfriamiento y de calefacción, sin embargo, los autores no incluyeron en su análisis modificaciones en el diámetro de la tubería [52].

1.13 Revisión bibliográfica de estudios numérico-experimentales de ICTA

Mihalakakoua et al. (1994) Presentaron un modelo numérico para la proyección del comportamiento térmico de un intercambiador de calor tierra-aire. Para modelar el tubo intercambiador de calor, desarrollaron un modelo bidimensional basado en balances de energía. El modelo propuesto tiene la capacidad de prever con exactitud tanto la temperatura del aire en movimiento como la distribución de la temperatura en el sistema, además de evaluar el

rendimiento térmico global de los ICTA. Estos hallazgos fueron confirmados mediante la comparación con datos experimentales [53].

Santamouris et al. (1995) desarrollaron un modelo matemático dinámico para calcular la eficiencia térmica de uno y varios tubos enterrados, el cual se integró en el software TRNSYS. Este modelo considera la transferencia de calor y masa en el suelo a ciertos gradientes de temperatura y humedad. Los factores que afectan la eficiencia térmica del sistema incluyen la longitud y el diámetro de los tubos, la velocidad del aire dentro de ellos y su profundidad bajo la superficie del suelo. Se demostró que, durante el invierno, la temperatura del aire dentro de la vivienda aumenta, mientras que durante el verano disminuye [54].

Cichota et al. (2004) evaluaron el perfil de temperaturas de la tierra unidimensionalmente en dirección vertical, esto se hizo a través de dos métodos, uno numérico por diferencias finitas y otro analítico propuesto por Carslaw y Jaeger (1980). Encontraron que los resultados obtenidos mediante el método analítico propuesto por Carslaw y Jaeger (1980) coincide de forma precisa con los datos experimentales, a pesar de que el modelo de Carslaw y Jaeger asumen que la conductividad térmica de la tierra es constante [55, 56].

Badescu (2007) desarrolló un modelo con un enfoque bidimensional y transitorio que emplea métodos numéricos para calcular la temperatura del suelo en la superficie y a diferentes profundidades. Este modelo se aplicó para simular el desempeño del sistema de calefacción en Renania-Palatinado, Alemania, evaluando su capacidad de calentamiento y enfriamiento en condiciones climáticas reales. Determinaron que la cantidad de energía proporcionada por el intercambio de calor del suelo está estrechamente relacionada con varios parámetros de diseño, como la profundidad de la tubería, su diámetro y el material utilizado. Además, se observó que la temperatura del suelo a profundidades de 1, 2 y 4 metros es mayor que cero durante todo el año, con promedios anuales de 20, 7 y 4 °C, respectivamente. Estos hallazgos indican que el aprovechamiento de la energía térmica del suelo para la calefacción y/o enfriamiento es altamente efectivo [57].

Ascione et al. (2011) evaluaron el rendimiento energético de un ICTA vinculado a un edificio con sistema de aire acondicionado, tanto en invierno como en verano. Se emplearon herramientas comerciales de simulación energética para edificios y se analizó el comportamiento térmico de los sistemas en diversas regiones climáticas de Italia. Se consideraron diferentes variables, como el tipo de suelo, el material de la tubería, la longitud y profundidad de entierro, la velocidad del flujo de aire, los caudales de ventilación y los modos de control. Además, se examinó la integración con otros sistemas pasivos y se realizó un análisis técnico-económico.

Concluyeron que el ICTA demostró ser más eficaz en climas fríos, tanto en invierno como en verano, obteniendo los mejores resultados en suelos húmedos, donde se logró un ahorro energético máximo de aproximadamente el 44% en términos de energía térmica y alrededor del 37% en energía primaria. Se determinó que el material de la tubería (generalmente PVC, metal u hormigón) tiene una influencia insignificante en el rendimiento energético. Además, se estableció que las longitudes inferiores a 10 metros son insatisfactorias, proponiendo una longitud óptima de

50 metros a una profundidad de 3 metros. Por último, se encontró que las tecnologías de sistemas pasivos son económicamente viables, con un período de recuperación de la inversión de 5 a 9 años [58].

Joaquim Vaz et al. (20) construyeron tres ICTA experimentales con configuraciones independientes, dos de ellos se instalaron a una profundidad de 1.60 m separados 0.60 m, mientras que el tercero se instaló a una profundidad de 0.50. Encontraron que el ICTA mejora las condiciones térmicas de un edificio denominado Casa Ventura, además, Los hallazgos indicaron que los meses más eficientes para el calentamiento y enfriamiento del aire fueron mayo y febrero, respectivamente. Además, se creó una base de datos exhaustiva que abarca las temperaturas transitorias del suelo, del aire exterior y del interior del edificio [59].

Díaz Hernández et al. (2017) construyeron un prototipo de un ICTA de 6 metros de extensión horizontal, 0.1 metro de diámetro de tubería y 2.5 metros de profundidad, con la finalidad de evaluar el sistema de forma pasiva para la obtención de confort térmico. Como resultados obtuvieron un efecto de enfriamiento de 5, 3 y 2°C, para 1, 3, y 5 m/s de flujo de aire respectivamente. Estos resultados indican que a medida que se incrementa la velocidad del aire, disminuye el potencial de operación [60].

Hui Li et al. (2019) plantearon la hipótesis de que los ICTA pueden ayudar como sistemas complementarios los sistemas convenciones de HVAC como sistemas de pretratamiento del aire, ya que, durante el verano, el enfriamiento ICTA puede ayudar a reducir el consumo de energía del sistema HVAC convencional, adicionalmente se adoptó un sistema de riego para verificar experimentalmente el efecto del contenido de humedad del suelo. Observaron que cuando la humedad del suelo cambió de 0.37 a 0.42, la temperatura del aire disminuyó 1.6°C en la salida de la tubería del ICTA. Los resultados mostraron también que el uso de ICTA en condiciones de humedad dio como resultado una gran capacidad de enfriamiento, lo que indica que se requiere una longitud de tubería corta o poca profundidad para lograr una capacidad de enfriamiento similar en condiciones de suelo húmedo [61].

Díaz Hernández et al. (2020) presentaron un estudio experimental, en el que obtuvieron mediciones de temperatura de un ICTA, durante 6 meses bajo las condiciones climáticas cálidas y húmedas de México. El ICTA tiene una configuración horizontal con tres tramos de tubería de PVC de 101.6 mm de diámetro, una tubería horizontal de 6 m de longitud y dos tramos verticales de 3 m de longitud para los tramos de entrada y salida. Se enterró a 2.5 m de profundidad para mejorar el rendimiento de la ICTA se aisló térmicamente el tramo de tubería de salida. Las mediciones experimentales reportaron que el ICTA se comportó como enfriador durante el día y como calentador durante la noche, excepto en la temporada de invierno que funcionó la mayor parte del tiempo con fines de calefacción. El ICTA tuvo una diferencia de temperatura para fines de enfriamiento de 5.5 °C. La energía máxima extraída fue de 4.438 kWh para el mes de agosto. Los resultados muestran que con el ICTA es posible enfriar un flujo de aire en condiciones de clima cálido-húmedo [62].

1.14 Sumario de la revisión bibliográfica.

En la actualidad el estudio de los ICTA se sigue centrando en la identificación de parámetros relevantes para mejorar su desempeño, aspecto que se centra en incrementar el intercambio térmico que sucede durante el recorrido del flujo de aire en el ICTA [63-65].

Uno de los principales aspectos que influyen en el desempeño de los ICTA, es el tipo de suelo y sus características físicas, como el contenido de humedad, la densidad, porosidad y como consecuencia la conductividad térmica entre otras variables como el calor específico, actualmente sigue siendo un problema estimar cuantitativamente dichos parámetros, debido a la poca información en la literatura [66].

Los ICTA tienen las características necesarias para considerarse como una ecotecnología sustentable, debido a que su principio de funcionamiento se basa en el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía, para propiciar un ambiente de confort térmico, ya sea para calentar o enfriar el espacio interior de una edificación, por medio de un intercambio térmico entre el aire del exterior y el contacto con el suelo de entre 2 a 5 metros de profundidad, esto gracias al fenómeno de inercia térmica del suelo, ya que la distribución de temperatura en el suelo es mucho más estable que la del aire de la tropósfera. La temperatura del suelo a profundidades que van de los 2 a 5 metros tiende a ser igual a la temperatura promedio anual registrada en la ubicación geográfica en estudio.

La mayoría de los estudios han analizado el desempeño térmico del ICTA por medio de la diferencia de temperatura del aire en la entrada y en la salida.

Los factores que más influyen en el desempeño de los ICTA son la longitud, diámetro, profundidad, la velocidad de la corriente de aire, el tipo de suelo y la cantidad de humedad del suelo.

La capacidad de almacenamiento de energía de la tierra aumenta con el incremento de humedad.

Los ICTA han demostrado tener un mayor potencial de operación en climas extremos.

La mayor parte de la comunidad científica suele realizar sus investigaciones relacionadas con el modelado de los ICTA aplicando balances de energía globales, debido a la simplicidad de los modelos matemáticos, uso de softwares basados en balances de energía y por el menor tiempo de cómputo necesario para obtener resultados, comparado con el tiempo requerido por el modelado basado en dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés). Sin embargo, el uso de herramientas más robustas como el modelado con CFD, generan información más detallada y precisa del comportamiento, condiciones y parámetros de operación del ICTA.

1.15 Justificación

El creciente uso en sistemas HVAC en edificaciones residenciales a nivel mundial se verá fuertemente incrementado en los años venideros debido a diversos factores socioambientales, tales como el incremento en la temperatura debido al cambio climático, y la adopción de sistemas HVAC en localidades que presentan crecimiento económico, sin embargo, en zonas de bajos recursos económicos el beneficio de confort térmico resulta inalcanzable, debido principalmente a su elevado costo de operación, lo que provoca una situación de desigualdad social y de pobreza energética para dicho sector de la población.

Debido a lo anterior, resulta necesario estudiar alternativas de sistemas HVAC, que cubran la necesidad de confort térmico en edificaciones residenciales, evitando incrementar el consumo eléctrico de la edificación y evitando también que sectores de la población con bajos recursos económicos sigan privándose del beneficio de confort térmico.

Los ICTA son una ecotecnología que dependiendo de las condiciones de operación, pueden ser considerados como una alternativa viable a los medios tradicionales de calefacción y/o enfriamiento de edificaciones, también se pueden utilizar como un sistema de pretratamiento del aire reduciendo la carga de trabajo que realizan los sistemas HVAC, disminuyendo así el consumo energético de la edificación sin perder el beneficio de confort térmico, sin embargo, en México los ICTA son una tecnología que requiere ser puesta a prueba, es decir, es necesario evaluar el potencial de operación de estos sistemas para la localidad en la que se desee instalar, debido a que el rendimiento de los ICTA cambia en función de las condiciones ambientales, tipo de suelo, cantidad de humedad del suelo, etc., de tal forma que, en este trabajo, se decidió utilizar el modelado matemático basado en CFD por medio del desarrollo de software (código computacional), para la obtención de resultados, ya que esta técnica de modelado permite conocer a detalle la distribución de temperatura en todo el sistema durante todo el recorrido del aire, aspecto que permite identificar posibles mejoras en el sistema.

El desarrollo de un código numérico tiene un bajo costo, debido a que, al desarrollar la propia herramienta computacional para realizar proyecciones de operación de un ICTA, no es necesario el pago de una licencia comercial por el uso de software basado en CFD, no requiere de permisos de construcción, no requiere instrumentación, ni todo el proceso necesario para poner en marcha un banco de pruebas experimental que garantice resultados precisos y correctos en las mediciones. Solo se requiere acceso a un equipo de cómputo y del consumo de energía eléctrica durante el tiempo de programación y ejecución del código. Lo que implica que, al no entrar en conflicto con la política pública del país, ser considerablemente más económico y versátil que un banco experimental, el desarrollo de software para el modelado numérico puede considerarse en sí como una herramienta sustentable para la investigación científica.

1.16 Hipótesis

El estudio y modelación de un intercambiador de calor tierra aire (ICTA) mediante el desarrollo de software con CFD, considerando las propiedades físicas de diferentes tipos de suelo de México, permitirá obtener resultados realistas de la operación de estos sistemas en el país, así como determinar la factibilidad tecno-económica-ambiental y evaluar la sustentabilidad energética por la aplicación de esta tecnología.

1.17 Objetivo general

Estudiar por medio del modelado numérico, la posible implementación de un intercambiador de calor tierra-aire (ICTA), evaluando su potencial como sistema sustentable para mejorar el confort térmico de edificaciones residenciales para diferentes climas y ubicaciones geográficas de México.

1.18 Objetivos específicos

- Plantear el modelo físico y matemático de los fenómenos físicos involucrados en un ICTA.
- Modelar problemas de verificación representativos de los fenómenos físicos que se dan en un ICTA.
- Desarrollar un código numérico basado en Dinámica de Fluidos Computacional para un ICTA.
- Realizar un estudio paramétrico del ICTA.
- Validar el código desarrollado con estudios experimentales.
- Proponer criterios de sustentabilidad aplicables para este tipo de tecnologías.
- Evaluar la reducción del consumo eléctrico de una edificación equipada con un ICTA respecto a la obtenida con un sistema HVAC convencional.
- Realizar un estudio de factibilidad ambiental (análisis costo-beneficio) por la implementación de un ICTA en edificaciones como reemplazo de tecnologías convencionales para el acondicionamiento térmico de espacios.

1.19 Alcance de la investigación

Roberto H. Sampieri (2018), define el alcance para una investigación cuantitativa como el marco acotado para los posibles resultados a obtener en una investigación, que resulta de la revisión bibliográfica y de las perspectivas del estudio a realizar, además, estos dependerán también de los objetivos planteados por el investigador, en este sentido, Sampieri define cuatro tipos de alcance dependiendo del tipo de investigación, que son: correlacional, descriptivo, exploratorio y explicativo, cabe señalar que en una investigación se puede dar el caso de que se cubran 2 o más tipos de alcance, sin embargo, no es regla que coexistan los 4, en esta investigación se tienen 3 de ellos los cuales según su clasificación se muestran en la tabla 1.5 [67].

El alcance correlacional permite asociar o relacionar conceptos u objetivos comunes entre disciplinas o áreas de conocimiento, el descriptivo define variables relacionadas con el fenómeno estudiado y el exploratorio investiga fenómenos o conceptos poco estudiados, identifica conceptos promisorios y prepara el terreno para nuevos estudios específicos [67].

Tabla 1.5. Alcances de la investigación

Tipo de alcance	Descripción
Correlacional	<p>Contribuir con los objetivos del desarrollo sostenible 11, 12, 13 y 17.</p> <p>11. Ciudades y comunidades sostenibles.</p> <p>12. Modalidades de consumo y producción sostenibles.</p> <p>13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.</p> <p>17. Fortalecer y revitalizar alianzas para el desarrollo sostenible (realizando colaboraciones con investigadores de diversas universidades del país, con la finalidad de fortalecer el estudio de los ICTA en México)</p>
Descriptivo	<p>Aportar a la comunidad de modelado en CFD, los resultados obtenidos por el modelado numérico del ICTA en diversos climas y ubicaciones geográficas de México.</p>
Exploratorio	<p>Identificar por medio del modelado numérico el potencial de operación de ICTA para diferentes localidades de México según los climas más predominantes.</p> <p>Evaluar el impacto y la factibilidad ambientales por la implementación de un ICTA en edificaciones.</p>

Capítulo 2: Marco teórico.

Los fenómenos físicos en la operación de los ICTA son: el flujo de fluidos y la transferencia de calor, para representar dichos fenómenos se utilizan las ecuaciones de continuidad, momentum y energía, ecuaciones que cumplen con su propio principio de conservación, asociado a una ley física, las cuales, adaptadas para la dinámica de fluidos son:

- **Ley de conservación de masa:** La masa de un fluido confinado en un sistema se conserva.
- **Segunda ley de Newton:** La razón de cambio de momentum (cantidad de movimiento) corresponde a la suma de fuerzas aplicadas sobre una partícula de fluido.
- **Primera ley de la termodinámica:** La razón de cambio de la energía interna de un sistema es igual a la suma de la razón de calor adicional y la razón de trabajo realizado sobre una partícula de fluido.

Debido a que cumplen con un principio de conservación, los modelos matemáticos que representan dichos fenómenos pueden ser modelados con la ecuación generalizada de convección-difusión.

2.1 Ecuación general simplificada conservativa de convección-difusión

Al considerarse las siguientes hipótesis:

- **Flujo incompresible:** A grandes rasgos establece que la densidad solo sea función de la temperatura o la concentración de alguna especie química, para fluidos líquidos esta consideración tiene un intervalo de aplicación mucho más amplio que para los gases, sin embargo, es aceptado para el aire con leves variaciones en la presión del sistema en estudio.
- **Aproximación de Boussinesq:** Considera que la densidad es constante para la ecuación de cantidad de momentum, y es válida siempre que la variación de la densidad con la presión sea despreciable, y que las diferencias de la densidad y temperaturas sean pequeñas. Gray et al. (1976), concluyeron que la aproximación de Boussinesq es válida para agua como fluido de trabajo hasta un número de Rayleigh $Ra = 10^{19}$ y de $Ra = 10^{17}$ cuando se utiliza aire [68].
- **Disipación viscosa despreciable:** La variación de la temperatura o energía interna producida por la resistencia al movimiento inercial del fluido debido a fuerzas viscosas del propio fluido, solo es apreciable en sistemas con elevadas velocidades de flujo, por ejemplo, se considera la disipación viscosa para flujos turbulentos y su efecto aerodinámico en las alas de un avión, de tal forma que para flujos laminares y de bajas velocidades, la disipación viscosa puede ser despreciada.
- **Fluido radiativamente no participante:** Se considera que el fluido de trabajo no emite, no absorbe, ni disipa radiación térmica, en otras palabras, se considera como un medio transparente a la radiación (que no interactúa con ella), en realidad solo el vacío se

comporta de esta manera, sin embargo, cuando las temperaturas son bajas a moderadas, pueden considerarse como radiativamente no participantes, ya que las aportaciones al sistema debido a efectos radiativos transportados por el fluido, son tan bajos que se consideran despreciables.

- **Mezcla homogénea:** Se considera al fluido de trabajo como una sustancia homogénea en su constitución, y no existe generación de especies químicas o de sub-productos durante el proceso en estudio.

Las ecuaciones relevantes de flujo de fluidos y transferencia de calor que involucran las variables dependientes como la presión, velocidad y temperatura, obedecen el principio de conservación generalizado, expresado por la ecuación general conservativa de convección-difusión.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z}\right) + s \quad (1)$$

Término transitorio
Términos convectivos
Términos difusivos
Término fuente

Dónde:

ρ : Densidad del fluido.

u, v, w : Componentes espaciales de velocidad.

Γ : Coeficiente de transporte difusivo.

ϕ : Variable de transporte a calcular (puede ser temperatura, componente de velocidad horizontal, vertical, o la presión, dependiendo del modelo matemático a resolver).

s : Término fuente.

Término transitorio: Representa el incremento de la variable de interés respecto al incremento del tiempo.

Términos convectivos: Representan el flujo neto de la variable en el volumen de control, a causa de su transporte de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad del flujo.

Términos difusivos: Son el flujo neto de la variable debido a las corrientes difusivas que actúan a nivel molecular.

Término fuente: Representa la generación o destrucción de la variable en estudio.

Los términos convectivos y difusivos, se consideran los mecanismos fundamentales responsables de la generación del flujo de los principios de conservación en un volumen de control.

2.2 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

En el campo de la mecánica de fluidos, contamos con un conjunto de leyes de conservación que explican el comportamiento general de los fluidos. No obstante, solo podemos resolver problemas idealizados, ya que en la mayoría de los casos las ecuaciones carecen de una solución analítica. La incapacidad para resolver analíticamente las ecuaciones que determinan el comportamiento de un fluido, ha limitado a los investigadores a la experimentación para determinar los campos de presión, velocidad y/o temperatura de un sistema en estudio. Generalmente la experimentación, tiene un elevado costo económico y de inversión de tiempo para la obtención de resultados, además, los resultados obtenidos son únicamente aplicables al sistema específico para el que fueron diseñados [69].

La principal ventaja del método experimental es que no se requieren de hipótesis simplificadoras para la interpretación física, ya que se exhibe la naturaleza verdadera del fenómeno en estudio. Como desventaja principal, está el coste económico, el tiempo necesario y la incapacidad para generalizar los resultados para ser aplicados si se modifican las condiciones de operación del sistema estudiado, ya que es necesario realizar experimentación para cada factor que sea modificado en el sistema.

Por otro lado, están los métodos teóricos de análisis basados en la modelación matemática por medio de métodos numéricos, para problemas donde generalmente no existe una solución analítica del fenómeno físico en estudio, esta técnica es eficiente, menos costosa en comparación con la experimentación y es posible la solución de problemas complejos, obteniendo resultados en periodos cortos de tiempo respecto al tiempo necesario para adaptar, calibrar y desarrollar un experimento de laboratorio.

Por lo tanto, los enfoques teóricos se han vuelto una alternativa para resolver problemas de flujo de fluidos, transferencia de calor y masa. Estos enfoques suelen dividirse en dos categorías principales. La primera comprende los métodos que tienen una solución analítica (métodos analíticos). La segunda categoría engloba los métodos numéricos, los cuales proporcionan una serie de valores aproximados para la solución del problema. En esta categoría se encuentra el método más ampliamente utilizado para la solución de las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía para fluidos, el Método de Volumen Finito (MVF). En la tabla 2.1 se muestran las ventajas y desventajas según el método [69].

Tabla 2.1. Comparativa según el método de análisis [69]

Técnica de análisis	Ventajas	Desventajas
Experimental	<ul style="list-style-type: none"> Fenómeno real. 	<ul style="list-style-type: none"> Equipo costoso requerido. Dificultad de mediciones. Alto costo operacional.
Teórica (Analítica)	<ul style="list-style-type: none"> Fenómenos generalizados. Resultados en forma de una ecuación. Poco costo computacional 	<ul style="list-style-type: none"> Restricción de geometría y procesos físicos simples. Generalmente restringido a fenómenos lineales.
Teórica (Numérica, CFD, MVF)	<ul style="list-style-type: none"> Geometrías y procesos físicos complejos. Fenómenos no-lineales. Evolución temporal del fenómeno. 	<ul style="list-style-type: none"> Errores de truncamiento (solución aproximada). La solución depende de las condiciones de frontera. Elevado costo computacional.

La dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es entonces, un método teórico numérico de análisis y estudio, para fenómenos físicos y/o procesos en donde esté involucrado el flujo de fluidos, a su vez es el resultado de la unión de diversas disciplinas de la ingeniería (figura 2.1), principalmente la mecánica de fluidos, las ciencias computacionales, los métodos numéricos y la transferencia de calor y masa. Se basa en el uso del procesamiento computacional como herramienta para resolver numéricamente las ecuaciones gobernantes de un determinado sistema, con la finalidad de conocer y/o predecir el comportamiento de sistemas reales de utilidad práctica.



Figura 2.1. Disciplinas involucradas en CFD.

Cuando se trabaja con el modelado basado en CFD, los resultados obtenidos corresponden a la distribución de las variables calculadas en todo el dominio estudiado, en otras palabras, no se busca calcular un parámetro específico, más bien, se busca conocer a fondo y a detalle el comportamiento más cercano a la realidad posible en un espacio definido como el dominio computacional, el cuál es un espacio discreto y cuantificado en nodos computacionales, que son las coordenadas espaciales donde se calculan las variables deseadas, tomando en cuenta la posición que ocupan y su interacción con sus respectivos nodos vecinos, de tal forma que, el sistema al estar enteramente interconectado directamente, siempre respeta los principios de conservación (masa, momentum y energía).

Por lo anterior y gracias al modelado CFD podemos obtener imágenes como la distribución de velocidades en el ducto de intercambio de calor del ICTA, o la distribución de temperatura del sistema completo, aspectos que no deberían pasar por alto por un investigador, ya que a medida que se tenga mayor y más detallada información, será posible establecer diferentes hipótesis de investigación y/o detectar de manera cualitativa y cuantitativa patrones de comportamiento y/o nuevas oportunidades de mejora en el diseño.

2.3 Método de volumen finito (MVF)

El método de volúmenes finitos es un método discreto aproximado para dar solución a ecuaciones diferenciales parciales, dicho método, requiere de un modelo físico, que es una representación geométrica del sistema en estudio. El modelo físico será subdividido en un número finito de volúmenes de control contiguos e interconectados, a este proceso se le conoce como discretización espacial del modelo físico o mallado, y representa el dominio computacional de cálculo. En el centroide de cada volumen de control se asigna un nodo computacional, que representa las coordenadas espaciales dónde se calcularán las variables de interés.

La principal ventaja del MVF es que es totalmente conservativo, es decir, que para todo el dominio computacional se cumple con los principios de conservación, al cumplirse para cada sub-volumen de control y estar enteramente interconectados entre sí.

El MVF requiere de dos niveles de aproximación, para transformar un sistema de ecuaciones diferenciales parciales a un sistema de ecuaciones algebraicas.

1. Realizar una integración definida según el tamaño de los volúmenes de control de las ecuaciones gobernantes del sistema, sobre todos los volúmenes de control generados durante el proceso de generación de malla.
2. Se aplica un esquema de interpolación para todos los términos que aún conservan derivadas parciales del paso anterior, esto transforma las ecuaciones integrales a un sistema de ecuaciones algebraicas.

Por último, para dar solución al sistema de ecuaciones algebraicas generado por el proceso de discretización, dependiendo de la complejidad de los fenómenos físicos a resolver, se aplica un

método iterativo de solución, lo que dará una solución particular para cada nodo computacional interno del dominio computacional en función de las condiciones de frontera del sistema.

2.4 Generación de malla para el MVF

Como ya se mencionó anteriormente, la malla, el mallado, o la discretización del modelo físico, es una colección finita de nodos o coordenadas espaciales, que representan un determinado volumen de control, donde no existen traslapes y la ubicación de los nodos se localiza en el centroide de cada volumen de control.

Los volúmenes de control adyacentes a las fronteras del dominio, es decir, los nodos que se ubican en el límite del modelo físico mallado y el entorno que lo rodea, pueden ser tratados de 2 formas (figura 2.2).

- a) **Contacto con la frontera:** La interfaz del volumen de control adyacente a la frontera coincide con la frontera del dominio computacional o modelo físico mallado, dicho nodo, no tendrá espesor en la dirección correspondiente a la frontera en cuestión.
- b) **No contacto con la frontera:** La interfaz del volumen de control inmediato a la frontera no coincide con la frontera del dominio, por lo tanto, el nodo de frontera tendrá espesor.

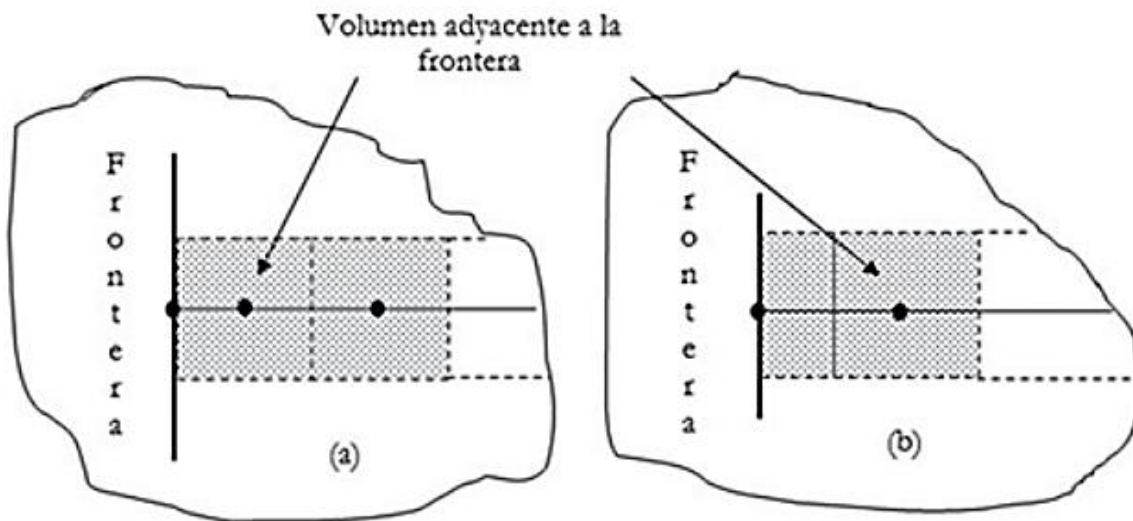


Figura 2.2. Arreglo de mallas a) contacto con frontera y b) no contacto con frontera, para una malla unidimensional [69].

La notación convencional para el desarrollo del método de volumen finito utiliza la letra "P" para identificar el nodo actual de cálculo, y las letras "W" y "E" (del inglés West y East) representan ambos vecinos para una malla unidimensional, de esta forma, la frontera del volumen de control que está entre el nodo vecino "W" y el punto "P" será denominado con la letra minúscula "w", del mismo modo con la frontera correspondiente al punto "P" y el vecino "E" se denomina "e". Las distancias entre nodos "W-P" y "P-W" a su vez se denominan " δx_{PW} ", " δx_{PE} " respectivamente,

para una malla unidimensional como se muestra en la figura 2.3, también se define el tamaño del elemento o volumen de control como “ Δx ”.

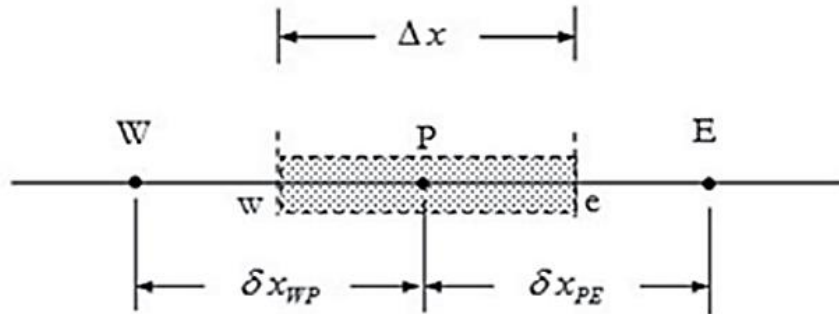


Figura 2.3. Representación de un volumen de control interno del dominio computacional para una malla unidimensional [68].

Para un arreglo de nodos de contacto en la frontera, en una malla uniforme, todos los volúmenes de control tienen el mismo tamaño o espesor de volumen de control “ Δx ”, el cual se calcula como [69]:

$$\Delta x = \frac{Hx}{(Nx - 2)} \quad (2)$$

Donde Hx representa la longitud total en la dirección “ x ” del modelo físico, Nx es el número de nodos asignados para el eje “ x ”, en la figura 2.4 se representa el volumen de control, para una malla bidimensional.

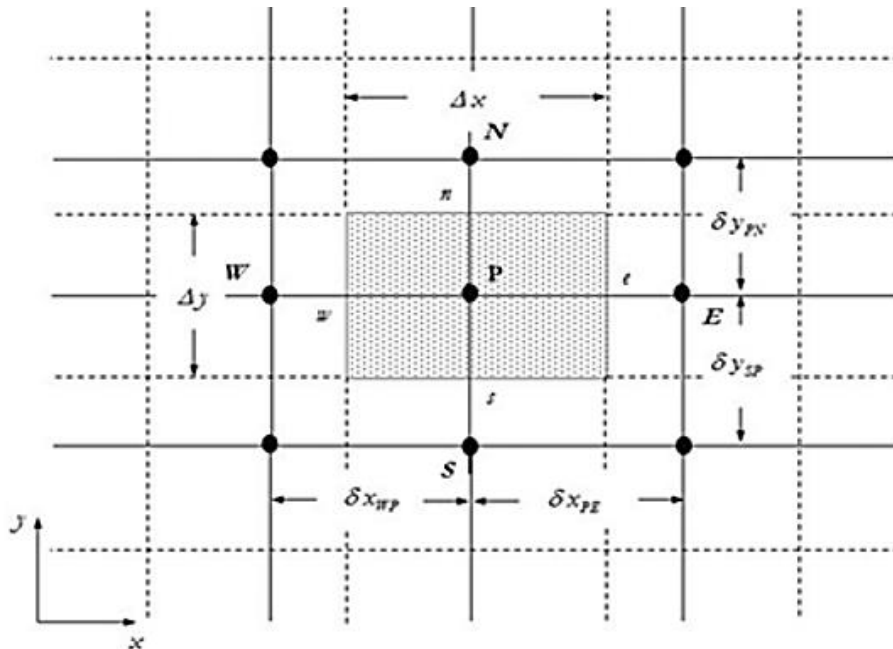


Figura 2.4. Representación de un volumen de control interno del dominio computacional para una malla bidimensional [69].

En una malla bidimensional aparecen 2 nuevos vecinos para el punto “P”, representados por las letras “N” y “S” (del inglés North y South) y la respectiva extensión vertical del volumen de control “ Δy ”, así como las distancias entre nodos “N-P” y “P-S” denominadas “ δy_{PN} ” y “ δy_{PS} ” respectivamente.

El tamaño o extensión vertical para cualquier volumen de control en una malla uniforme estructurada ortogonal según el número de nodos es [69]:

$$\Delta y = \frac{Hy}{(Ny - 2)} \quad (3)$$

Donde Hy representa la longitud total en la dirección “y” del modelo físico, Ny es el número de nodos asignados para el eje “y”.

Al igual que lo visto anteriormente, para una malla tridimensional uniforme estructurada ortogonal (figura 2.5), se agregan 2 nuevos vecinos “T” y “B” (del inglés Top y Bottom) y su respectiva extensión en el eje z “ Δz ”, el cual se calcula como se muestra en la ecuación (4).

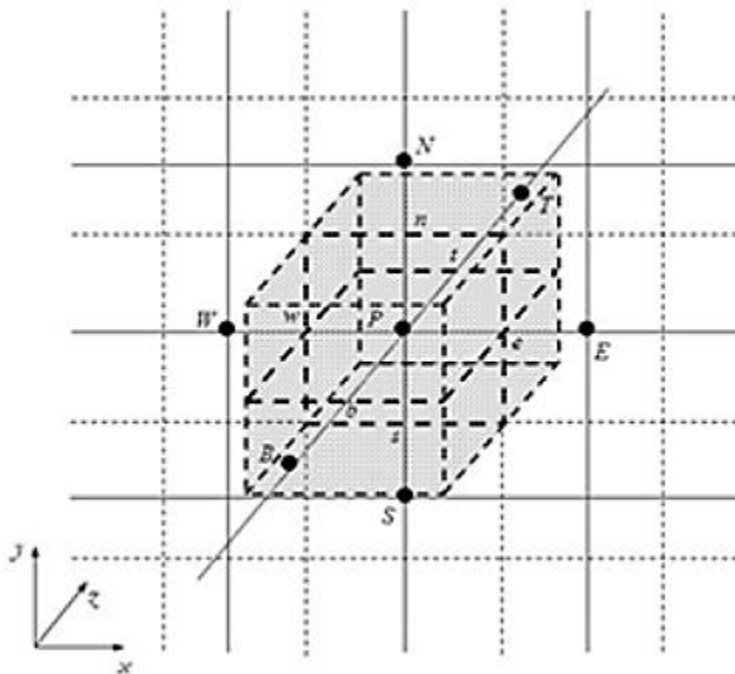


Figura 2.5. Representación de un volumen de control interno del dominio computacional para una malla tridimensional [69].

$$\Delta z = \frac{Hz}{(Nz - 2)} \quad (4)$$

Donde Hz representa la longitud total en la dirección “z” del modelo físico, Nz es el número de nodos asignados para el eje “z”.

2.5 Condiciones de frontera para el MVF

Como ya se describió anteriormente, las fronteras de los volúmenes de control representan el límite o final en una determinada dirección del volumen de control, y a su vez, representan el comienzo o inicio del volumen de control vecino correspondiente, de la misma forma, los límites del dominio computacional o mallado del modelo físico, representan las fronteras del sistema, como se aprecia en el ejemplo ilustrado en la figura 2.6, los nodos que se ubican en dichas zonas se conocen como “nodos frontera”, y son responsables de recibir la información necesaria para la solución integral de los nodos internos del dominio computacional, de tal forma que, al igual que para resolver un estado particular de una ecuación diferencial, es absolutamente necesario establecer las condiciones de frontera adecuadas para obtener una solución particular del sistema en estudio en relación con su entorno, por medio del modelado numérico.

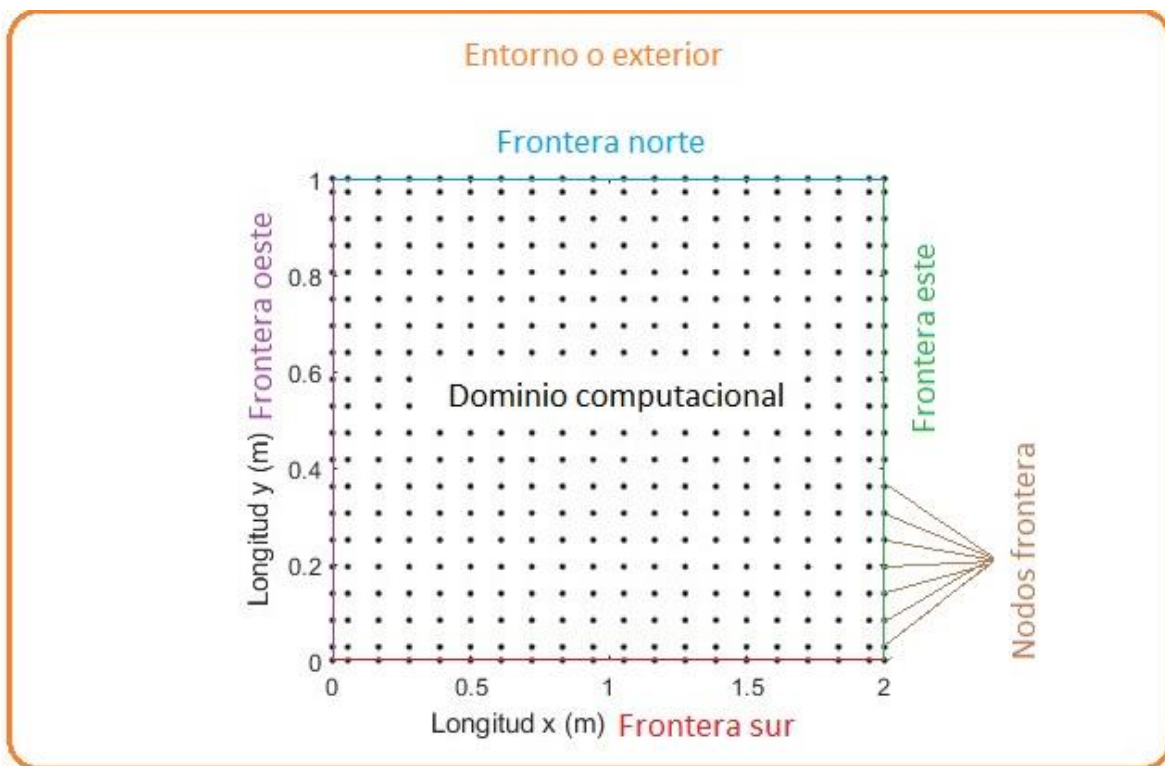


Figura 2.6. Ejemplo de un dominio computacional o mallado para un modelo físico bidimensional cuadrado, su entorno, fronteras y distribución nodal.

Las condiciones de frontera son información conocida, ya sea como constantes o funciones que representan los fenómenos físicos entre el espacio de solución (dominio computacional) y el entorno o exterior del sistema, esta información está ubicada en los nodos frontera del mallado y es la información responsable para cada solución particular del modelado.

Condición de frontera de primera clase o de Dirichlet

Es la condición de frontera más sencilla y comúnmente utilizada en CFD. Esta condición fija el valor de la variable de transporte ϕ en los nodos frontera.

$$\phi_p = \phi A \quad (5)$$

Condición de frontera de segunda clase o de Von Neumann

La condición de frontera de segunda clase consiste en imponer en las fronteras, el gradiente de la variable de transporte " ϕ " en dirección normal " n " a la frontera. En el caso particular de transferencia de calor, cuando el gradiente " A " es igual a cero, se conoce como condición adiabática, también en flujo de fluidos es utilizada como condición de simetría, adicionalmente, esta condición puede igualarse a un valor constante " A " o función del espacio tiempo " $f(r, t)$ ".

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = A \quad , \quad \frac{\partial \phi}{\partial n} = f(r, t) \quad (6)$$

Condición de frontera de tercera clase o de Robin

Esta condición de frontera es una combinación de las condiciones de frontera de primera y segunda clase, establece que la frontera en cuestión se encuentra gobernada por una ecuación diferencial de primer orden.

$$a * \frac{\partial \phi}{\partial n} + b * \phi = A \quad , \quad a * \frac{\partial \phi}{\partial n} + b * \phi = f(r, t) \quad (7)$$

Donde " a " y " b " son constantes y al igual que el caso anterior, pueden igualarse a una constante " A " o a una función del espacio tiempo " $f(r, t)$ ".

Generalmente este tipo de condición de frontera se utiliza en fenómenos de transferencia de calor por convección, cuando " ϕ " representa la temperatura " T ", " a " es la conductividad térmica " λ ", " b " el coeficiente convectivo " h ", " A " como el producto del coeficiente convectivo y una temperatura de superficie convectiva " hT_{ext} " la ecuación (6) se puede describir como:

$$\lambda * \frac{\partial T}{\partial n} = -h(T - T_{ext}) \quad (8)$$

Condición inicial

Cuando se resuelven problemas transitorios o dependientes del tiempo, se debe especificar los valores de la variable " ϕ " al tiempo ($t = 0$), para todos los nodos del dominio computacional, a esto se le conoce como condición inicial, y el tiempo cero ($t = 0$), se refiere al estado anterior en el que el sistema dejó su estado de equilibrio.

2.6 Software comercial para CFD

Debido a las múltiples aplicaciones para el modelado matemático basado en CFD, se dio pauta a la creación de diversos softwares o paquetes comerciales para dar solución a problemas de mecánica de fluidos, transferencia de calor y masa. En la tabla 2.2 se muestra la evolución y desarrollo de algunos de los softwares más relevantes a nivel mundial para el modelado CFD.

Tabla 2.2. Desarrollo de software comercial para CFD

Software	Procedencia	Año de lanzamiento
PHOENICS	CHAMP (B. Spalding)	1981
FLUENT	U. Sheffield-Consultura Creare	1983
FLOW-3D	LANL (laboratorio nacional de los Alamos)	1985
TASCflow	Canadá	1985
STAR-CD	Imperial College	1987
FLUENT-TGrid	Creare-NASA	1991
FINE	NUMECA (C. Hirsch)	1992
CFX-4	ANSYS	2003
FLUENT	ANSYS	2006

2.7 Limitaciones en el uso de software

De forma general, la secuencia y estructura para un usuario de algún software CFD, consta de 3 etapas fundamentales, las cuales a su vez se subdividen en 5 actividades:

1. Utilizar un software de diseño CAD para dibujar el modelo físico.
- Pre – procesamiento**
2. Uso de software para realizar el mallado del modelo físico.
 3. Completar los requerimientos que permita la interfaz gráfica del software CFD, para llevar a cabo la modelación, propiedades, materiales, activación de modelos matemáticos, condiciones de frontera disponibles.
- Procesamiento**
4. Dar la instrucción de resolver el modelo planteado.
- Post – procesamiento**
5. Obtención y visualización de resultados.

Esta estructura se encuentra limitada sobre todo en la etapa del pre–procesamiento y procesamiento, ya que solo se podrán modelar las condiciones de frontera, métodos de interpolación, modelos matemáticos y metodologías de solución disponibles dentro del propio software, los cuales probablemente resulten suficientes para aplicaciones industriales, pero no es posible modelar condiciones y parámetros característicos de alguna aplicación particular, ya que en una investigación generalmente interesa estudiar aspectos o fenómenos muy específicos, o la posibilidad de modificar el algoritmo de cálculo para la aplicación de subrutinas de optimización,

condiciones de frontera, metodologías de cálculo, y demás posibles modificaciones que aún no se encuentren disponibles en las herramientas comerciales para modelado en CFD.

Otro aspecto para destacar es el uso y tipo de licencia que la mayoría de software comercial requiere, en la tabla 2.3 se presenta el costo estimado de licencias para algunos de los softwares comerciales disponibles.

Tabla 2.3. Costos y limitaciones de licencias comerciales para algunos softwares CFD [70]

Paquete	Periodo	Importe	
ABAQUS 1. Programa de análisis Abaqus 2. Pre y post- procesamiento: 1 puesto de trabajo 3. Interfaz asociativa con CATIA V5 4. Gastos primera instalación 5. Co- simulación con Acusolve	1 año	(Importe para el año 2022)	
		19 000 dólares	
		(Importes para el año 2023)	
		Pro	2 000 dólares
		Premium	30 000 dólares
Enterprise	35 000 dólares		
ANSYS 1. 1 solo usuario (Mecánica y CFD) 2. ANSYS Workbench 3. ANSYS DesingModeler 4. ANSYS Mechanical/CFX/FLUENT	1 año	(Importe para el año 2023)	
Software CAD y mallado CATIA V5 1. CAT CATIA Team PLM + MCE	1 año	(Importe para el año 2023)	
		11 000 dólares	

2.8 Estructura para el desarrollador de código basado en CFD

La estructura que debe seguir un desarrollador de código (figura 2.7) tiene la gran y principal ventaja de la libertad de modificar por completo cada uno de los algoritmos necesarios para la solución final durante todo el proceso necesario para el modelado.

Pero también tiene la desventaja de empezar de cero, por lo tanto, el proceso de pre-procesamiento, algo trivial para el usuario de software, que es el uso de aplicaciones para dibujar y mallar, para el desarrollador se vuelve mucho más complejo, ya que toda la matemática necesaria para cada uno de los procesos debe ser:

1. Entendida a profundidad.
2. Desarrollada.
3. Puesta en práctica.
4. Programada en algún lenguaje computacional.

Por estas razones, al desarrollador de software le toma más tiempo el desarrollo del pre-procesamiento, precisamente porque debe generar no solo el modelo físico y matemático,

también debe desarrollar las herramientas computacionales necesarias para la solución de cada uno de los pasos a seguir durante el modelado.

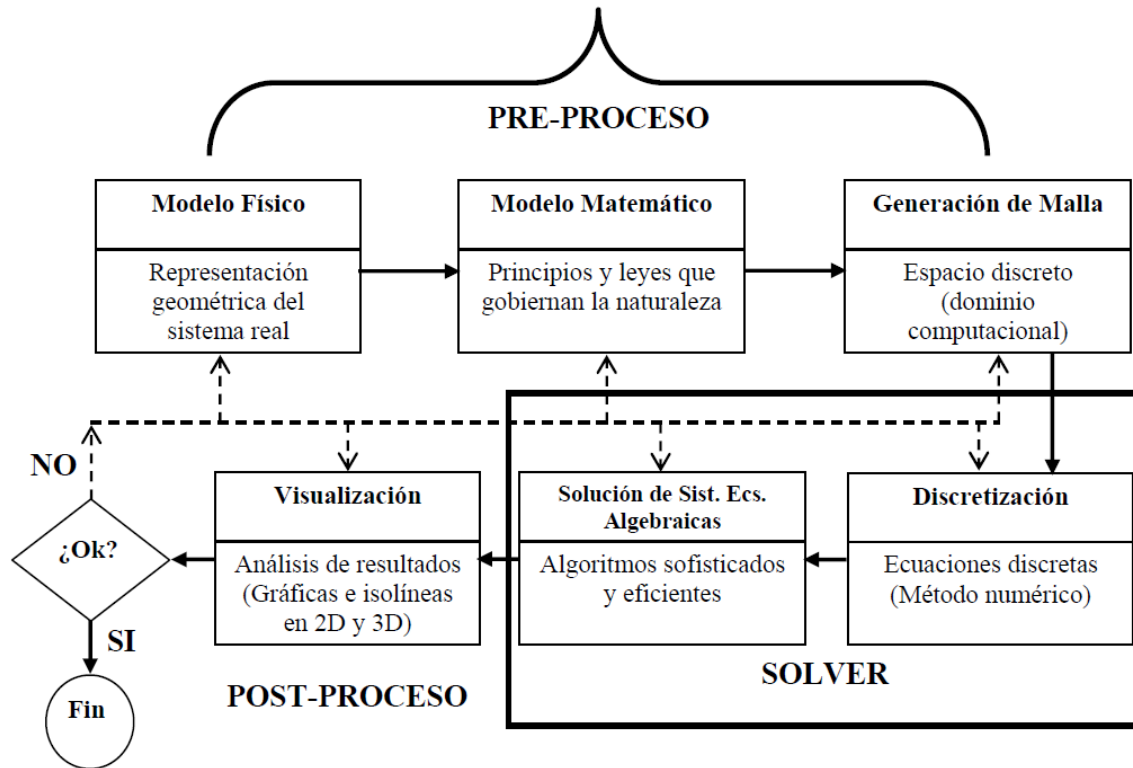


Figura 2.7. Estructura general de un desarrollador de código CFD [69].

2.9 Propagación de errores e incertidumbre en CFD

Así como en las mediciones experimentales, los objetivos son el resultado de la medición y la incertidumbre asociada, en CFD también existen los conceptos de error e incertidumbre en los resultados numéricos aproximados obtenidos por esta técnica numérica.

Error en CFD: Es la diferencia reconocible en un modelo CFD que no es causada por la carencia de conocimiento y se divide en los siguientes [69]:

Errores numéricos: Pueden ser de 3 tipos

1. **Error de redondeo:** Se produce por el uso incorrecto del tipo de dato según el nivel de precisión deseado en el resultado, se reduce con el uso de tipo de dato doble precisión (8 bytes, 64 bits) para las variables y operaciones con números reales en el código.
2. **Error de discretización:** Se debe al segundo nivel de aproximación en el método de volumen finito, donde se rempazan los términos de derivadas parciales con esquemas de interpolación, que dependen del tamaño de elemento de malla, se reduce con el análisis de independencia de malla.

3. **Error de criterio de convergencia:** Se da por el uso de criterios de convergencia inadecuados o poco estrictos, se reduce estableciendo criterios de convergencia más estrictos para las variables calculadas [69].

Errores de código fuente: También se conocen como errores de programación.

- **Error de compilación o enlace:** Sintaxis errónea, según el lenguaje de programación.
- **Error de lógica de programación:** Instrucciones y operaciones erróneas.
- **Error en tiempo de ejecución:** En los métodos iterativos es posible que se den fenómenos numéricos acumulativos que pueden derivar en errores numéricos, ejemplo: operaciones con diferente tipo de dato produce errores acumulativos para cada iteración cuando se desea una doble precisión en el resultado o un resultado con un tipo de dato determinado.

2.10 Incertidumbre en CFD

Es la diferencia potencial en un modelo CFD que es causada por la carencia de conocimiento. Las causas o fuentes de incertidumbre son 2:

1. **Incertidumbre debido a falta de información adecuada:** Se da por la carencia de información adecuada y, por tanto, una posible errónea aproximación de las variables y propiedades involucradas en el proceso modelado, es decir, condiciones de frontera inadecuadas.
2. **Incertidumbre debido al modelo matemático, sus consideraciones y limitaciones:** Son los límites técnicos del código desarrollado, debido al modelo matemático simplificado por el uso de consideraciones como: definir el flujo de aire como incompresible y en régimen laminar, que algunas propiedades permanezcan constantes y que el suelo se considere como un sólido isotrópico, aspectos que, de no ser considerados así, complicarían el modelo matemático y comprometerían el tiempo de cómputo.

2.11 Procesos de verificación y validación en CFD

Ambos son conceptos sumamente importantes en CFD, ya que están asociados con los errores e incertidumbre del propio método para estimar resultados.

El proceso de verificación se utiliza para comprobar si un determinado modelo matemático se está resolviendo de forma satisfactoria, la finalidad es evitar errores en la interpretación del modelo, errores de programación o de implementación de la metodología, para tener certeza de que los modelos matemáticos discretizados se estén resolviendo de manera satisfactoria.

Oberkampf y Trucano (2002) establecieron que el proceso de verificación debe incluir la comparación de resultados obtenidos respecto a resultados publicados en la literatura conocidos y aceptados por la comunidad científica como de referencia [71].

El proceso de validación es el proceso que nos permite determinar el grado de exactitud que tiene un modelo matemático para representar la realidad, ya que dicho proceso se encarga de cuantificar la incertidumbre numérica existente entre resultados obtenidos por la modelación de un determinado sistema, respecto a la comparación con mediciones experimentales obtenidas en un banco experimental para ese mismo sistema bajo las mismas condiciones de operación.

2.12 Modelo físico para el ICTA

En la figura 2.8 se muestra la representación geométrica para el ICTA, con sus respectivas interacciones y condiciones de frontera, a esta representación se le conoce como modelo físico [72], en el cual se pueden observar las diferentes secciones que se consideran para el modelado con CFD, en color café se representa al suelo, las flechas en color azul indican la entrada y salida del aire en el ducto enterrado, y en color morado, se observa el espesor de un aislante térmico alrededor del ducto de salida de aire, con la finalidad de conservar la temperatura obtenida por el flujo de aire durante su recorrido en interior del ICTA.

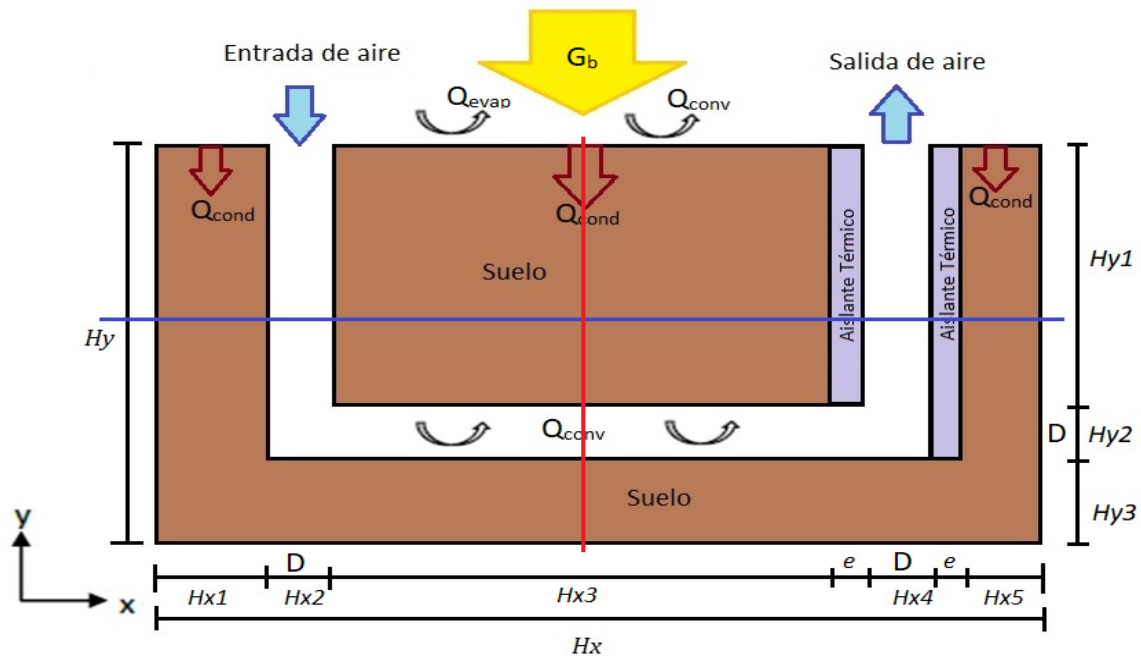


Figura 2.8. Modelo físico del ICTA.

En el modelo físico, se tomará en cuenta:

- | | |
|--|---|
| Q_{cond} : Intercambio de calor por conducción (W/m^2) | G_b : Intercambio de calor radiativo (W/m^2) |
| Q_{conv} : Intercambio de calor por convección (W/m^2) | Q_{evap} : Pérdida de calor evaporativa (W/m^2) |

2.13 Consideraciones para determinar el modelo matemático del ICTA

Antes de definir el modelo matemático para el ICTA, es necesario establecer las consideraciones utilizadas para la definición del dominio físico, las cuales son:

- Flujo incompresible en régimen laminar.
- El suelo se considera un medio sólido e isotrópico.
- Aproximación de Boussinesq: las propiedades termo-físicas permanecen constantes [73].
- Disipación viscosa despreciable.
- Fluido radiativamente no participante (*se puede considerar esta hipótesis como aproximación para fluidos a bajas temperaturas $T < 60$ °C*) [72].
- El problema se resuelve en estado permanente aplicando el método de pseudo transitorio.
- Para todo el dominio no fluido (suelo y material aislante), se aplica la técnica de bloqueo, que implica definir con un valor de 0 permanentemente todas las variables de flujo en todos los nodos del dominio sólido ($u = v = P = 0$) de tal forma que para el dominio sólido solo se evalúa la transferencia de calor por conducción.

2.14 Modelo matemático para el ICTA

Este tipo de sistema, según las consideraciones tomadas en cuenta obedece a tres principios físicos de conservación, el principio de conservación de masa, momentum y energía.

1. Principio de conservación de masa

Establece que la masa que entra a un sistema es igual a la masa que sale de él.

$$\left(\frac{\partial(\rho)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

ρ : Densidad u : Componente horizontal de velocidad v : Componente vertical de velocidad

2. Principio de conservación de momentum (segunda ley de Newton)

Es la razón de cambio de momentum, que corresponde a la suma de fuerzas sobre una partícula de fluido.

$$\left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{\partial P}{\partial y} \quad (11)$$

P : Presión μ : Viscosidad dinámica

3. Principio de conservación de la energía (primera ley de la termodinámica)

Establece los cambios de energía en el sistema.

$$\left(\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y}\right) \quad (12)$$

λ : Coeficiente de conductividad térmica C_p : Calor específico a presión constante

* El termino transitorio aparece en el modelo matemático debido al uso de la técnica de pseudo transitorio, a pesar de ser resuelto de forma permanente o estacionario.

2.15 Condiciones de frontera en el ICTA

En la figura 2.9 se detalla con distinto color las 4 fronteras del modelo físico para el ICTA.

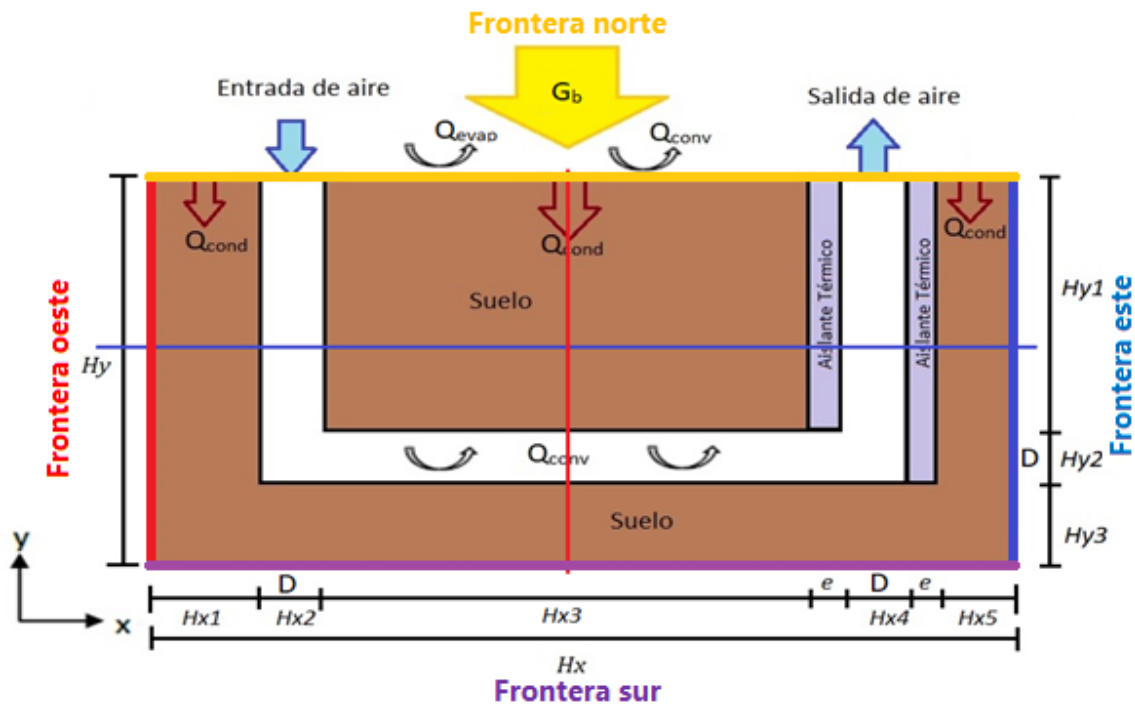


Figura 2.9. Ubicación de las fronteras en el modelo físico del ICTA.

Frontera oeste ($x = 0$)

Se considera una frontera de tipo adiabática, también denominada en algunos softwares como frontera de simetría, donde el nodo frontera adquiere el valor del nodo interno inmediato en dirección positiva de x .

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{para } (0 \leq y \leq Hy)$$

Frontera este ($x = Hx$)

De forma análoga a la frontera oeste, la frontera este se considera adiabática, el nodo frontera adquiere el valor del nodo interno inmediato en dirección negativa de x .

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{para } (0 \leq y \leq Hy)$$

Frontera sur ($y = 0$)

la frontera sur se considera también como adiabática, el valor correspondiente de temperatura resultante en la frontera sur dependerá de la evolución del sistema hasta su convergencia, adquiriendo el valor de los nodos internos inmediatos superiores.

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{para } (0 \leq x \leq Hx)$$

Frontera norte ($y = Hy$)

Para la transferencia de calor que ocurre en la frontera norte, se implementó el balance de energía propuesto por G. Mihalakakou et al en 1997, el cual establece lo siguiente [74]:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = [CE] + [-(LR) + (SR)] - [LE] \quad \text{para } (0 \leq x \leq Hx) \quad (13)$$

CE : Es la energía convectiva que intercambian en el aire y la superficie de la tierra y se calcula como:

$$CE = h_{Sup}(T_{amb}) \quad (14)$$

T_{amb} : Temperatura ambiente del aire

h_{Sup} : Coeficiente convectivo de transferencia de calor

De acuerdo con Badescu et al. (2007) el coeficiente de transferencia de calor por convección en la superficie del suelo " h_{Sup} " como función de la velocidad del viento, se obtiene de [57]:

$$h_{Sup} = 5.678 \left[0.775 + 0.35 \left(\frac{V_{viento}}{0.304} \right) \right] \quad \text{para } (V_{viento} < 4.88) \quad (15)$$

$$h_{Sup} = 5.678 \left[0.775 + 0.35 \left(\frac{V_{viento}}{0.304} \right)^{0.78} \right] \quad \text{para } (V_{viento} < 4.88) \quad (16)$$

SR : Radiación solar de longitud onda corta absorbida desde la superficie de la tierra

V_{wind} : Velocidad del viento

$$-(LR) + (SR) = -\varepsilon\Delta R + \alpha G_b \quad (17)$$

$$SR = \alpha G_b \quad (18)$$

α : Es la absorptividad de la tierra

G_b : Es la radiación solar incidente en la superficie

LR : Es la radiación de longitud de onda larga

$$LR = \varepsilon\Delta R \quad (19)$$

ε : Es la emitancia de la superficie de la tierra

ΔR : Término que depende de la humedad relativa de la superficie del suelo, de la temperatura efectiva atmosférica y de las propiedades radiativas del suelo, obtenido empíricamente desde 1961 por Landsberg et al. [75].

LE : Es el flujo de calor latente desde la superficie de la tierra debido a la evaporación

$$LE = 0.0168fh_{sup} [(a T_{sup} + b) - HR(a T_{amb} + b)] \quad (20)$$

HR : Es la humedad relativa del aire del medio ambiente y f es una fracción la cual depende principalmente de la cubierta de la tierra.

T_{sup} : Temperatura en la superficie de la tierra

Los factores a , b y f tienen un valor constante para una humedad media del suelo de [74]:

$$a = 103 \text{ (Pa/K)} \quad b = 609 \text{ (Pa)} \quad f = 0.7$$

Entrada de aire ($y = Hy$)

$$v = f(Re) , u = 0 \quad \text{para } (Hx1 \leq x \leq Hx2) \quad (21)$$

La velocidad de entrada se calcula en función del número de Reynolds (valor fijo para cada modelado).

Salida de aire ($y = Hy$)

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad \text{para } (Hx3 \leq x \leq Hx4) \quad (22)$$

Los nodos frontera en la zona de salida de aire adquieren el valor obtenido por el cálculo en los nodos internos inmediatos inferiores.

Capítulo 3: Metodología numérica.

3.1 Discretización del modelo matemático

Como ya se describió en el capítulo 2, los fenómenos físicos involucrados en la operación de un ICTA, expresados por el modelo matemático definido en las ecuaciones (9 - 12), se pueden generalizar en una sola ecuación, conocida como ecuación general conservativa de convección-difusión. Expresada en 2 dimensiones y en coordenadas cartesianas, al igual que el modelo matemático a resolver, para el caso general, sería:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + S \quad (23)$$

Recordando que la variable “ ϕ ” representa la variable a resolver, según la ley de conservación correspondiente, “ ϕ ” será igual a la temperatura “T”, cuando se resuelva la ley de conservación de la energía, “ ϕ ” será igual a las componentes de velocidad “u, v” y a la presión “P” cuando se resuelve la segunda ley de Newton o la conservación del momentum en el sistema. Se realiza la discretización para el caso general, con la finalidad de evitar reproducir la discretización para todas las variables que se desean conocer.

El primer nivel de aproximación para el proceso de discretización consiste en realizar una integral definida según el tamaño de los volúmenes de control y el dominio del tiempo:

$$\begin{aligned} & \int_t^{t+dt} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} \partial x \partial y \partial t \dots \\ & + \int_t^{t+dt} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} \partial x \partial y \partial t + \int_t^{t+dt} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} \partial x \partial y \partial t \dots \\ & = \int_t^{t+dt} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right) \partial x \partial y \partial t \dots \\ & + \int_t^{t+dt} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}\right) \partial x \partial y \partial t + \int_t^{t+dt} \int_s^n \int_w^e S \partial x \partial y \partial t \end{aligned} \quad (24)$$

Al realizar la integración de la ecuación (24) se obtiene:

$$\begin{aligned} & [(\rho\phi)_P - (\rho\phi)_P^0] \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} + [(\rho u\phi)_e - (\rho u\phi)_w] \Delta y + [(\rho v\phi)_n - (\rho v\phi)_s] \Delta x = \\ & \left[\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_w \right] \Delta y + \left[\left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_n - \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_s \right] \Delta x + S \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (25)$$

Cabe señalar que, para la integración respecto al tiempo, se utilizó un esquema implícito según la siguiente ecuación.

$$\int_t^{t+dt} (\phi) dt = [f\phi + (1-f)\phi^0] \Delta t \quad (26)$$

Donde f denota un factor de peso ponderado que varía entre 0 y 1, para un esquema explícito adquiere el valor de 0 y para implícito el valor de 1, de tal forma que el subíndice "P" en el primer término de la ecuación (25), hace referencia a la propiedad " ϕ " en el punto "P" del tiempo actual, mientras que el super índice "0", hace referencia a la variable " ϕ " en el intervalo de tiempo " Δt " anterior.

Reagrupando los términos de la ecuación (25) se obtiene:

$$\begin{aligned} & [(\rho\phi)_P - (\rho\phi)_P^0] \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} + \left\{ [(\rho u\phi)_e - \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_e] \Delta y - [(\rho u\phi)_w - \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_w] \Delta y \right\} + \\ & \left\{ [(\rho v\phi)_n - \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_n] \Delta x - [(\rho v\phi)_s - \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_s] \Delta x \right\} = S \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (27)$$

A partir de aquí, resulta conveniente definir los flujos totales (flujo convectivo-difusivo) para cada frontera "e, w, n, s" del volumen de control "P".

$$J_e = \left[(\rho u\phi)_e - \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_e \right] \Delta y \quad (28)$$

$$J_w = \left[(\rho u\phi)_w - \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_w \right] \Delta y \quad (29)$$

$$J_n = \left[(\rho v\phi)_n - \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_n \right] \Delta x \quad (30)$$

$$J_s = \left[(\rho v\phi)_s - \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_s \right] \Delta x \quad (31)$$

Donde " J_e, J_w, J_n, J_s " representan los flujos totales que entran y salen del volumen de control, como se observa en la figura 3.1.

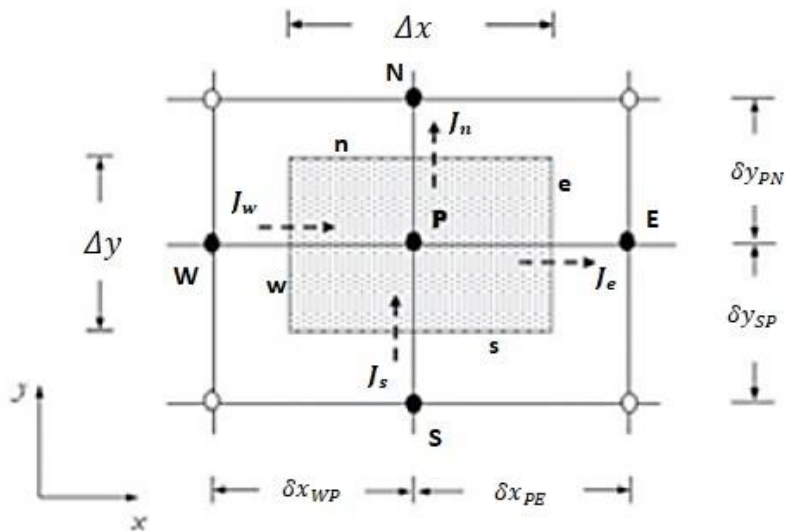


Figura 3.1. Flujos totales en el volumen de control de una malla bidimensional.

Al sustituir los flujos totales en la ecuación (27) se genera la siguiente expresión.

$$\left[\frac{(\rho\phi)_P - (\rho\phi)_P^0}{\Delta t} \right] \Delta x \Delta y + [J_e - J_w] + [J_n - J_s] = S \Delta x \Delta y \quad (32)$$

Si el término fuente “S” depende o es función de la variable “ ϕ ” se puede descomponer en la siguiente forma lineal, derivada de la ecuación de la recta:

$$S = S_C + S_P \phi_P$$

Donde S_C , S_P representan coeficientes a determinar dependiendo de la función de crecimiento o decaimiento del término fuente “S”.

$$\left[\frac{(\rho\phi)_P - (\rho\phi)_P^0}{\Delta t} \right] \Delta x \Delta y + [J_e - J_w] + [J_n - J_s] = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta y \quad (33)$$

Para el caso particular de la ecuación de continuidad, al realizar el desarrollo anterior, se obtiene la siguiente expresión.

$$\left[\frac{\rho_P - \rho_P^0}{\Delta t} \right] \Delta x \Delta y + [(\rho u)_e \Delta y - (\rho u)_w \Delta y] + [(\rho v)_n \Delta x - (\rho v)_s \Delta x] = 0 \quad (34)$$

Como en la ecuación de continuidad sólo interfieren los flujos convectivos, estos pueden definirse como el flujo convectivo “F” que circula a través de las caras del volumen de control correspondiente:

$$F_e = (\rho u)_e \Delta y \quad (35)$$

$$F_w = (\rho u)_w \Delta y \quad (36)$$

$$F_n = (\rho v)_n \Delta x \quad (37)$$

$$F_s = (\rho v)_s \Delta x \quad (38)$$

Sustituyendo las relaciones (35 - 38) en la ecuación (34):

$$\left[\frac{\rho_P - \rho_P^0}{\Delta t} \right] \Delta x \Delta y + [F_e - F_w] + [F_n - F_s] = 0 \quad (39)$$

Con la finalidad de asegurar una mejor convergencia al resolver el sistema de ecuaciones generado, durante el proceso de discretización se introduce la conservación de masa, de esta forma se asegura que la solución final cumplirá con el principio de continuidad. Esto se consigue multiplicando la ecuación (39) por la variable “ ϕ ” y restando la ecuación resultante a la ecuación (33).

$$(\phi_P - \phi_P^0) \frac{\rho_P^0}{\Delta t} \Delta x \Delta y + [(J_e - F_e \phi_P) - (J_w - F_w \phi_P)] + [(J_n - F_n \phi_P) - (J_s - F_s \phi_P)] = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta y - [(F_e - F_w) + (F_n - F_s)] \phi_P \quad (40)$$

Ahora resulta conveniente definir los términos difusivos “D”, también conocidos como conductancias para cada cara del volumen de control “P”:

$$D_e = \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} \Delta y \quad (41)$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} \Delta y \quad (42)$$

$$D_n = \frac{\Gamma_n}{\delta x_{PN}} \Delta x \quad (43)$$

$$D_s = \frac{\Gamma_s}{\delta x_{SP}} \Delta x \quad (44)$$

Para llegar a la notación conocida como de coeficientes agrupados, la cual se utiliza para resolver el estado actual del nodo “P”, en función de sus nodos vecinos “E, W, N, S” y el termino fuente “S”, se aplica la formulación generalizada propuesta por Patankar (1980) [76].

$$(J_e - F_e \phi_P) = a_E (\phi_P - \phi_E) \quad (45)$$

$$(J_w - F_w \phi_P) = a_W (\phi_P - \phi_W) \quad (46)$$

$$(J_n - F_n \phi_P) = a_N (\phi_P - \phi_N) \quad (47)$$

$$(J_s - F_s \phi_P) = a_S (\phi_P - \phi_S) \quad (48)$$

Al sustituir las ecuaciones (45 - 48) en la ecuación (40) y reagrupando términos, se obtiene la ecuación de convección - difusión discretizada para un dominio bidimensional, denominada ecuación de coeficientes agrupados:

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (49)$$

También se puede expresar como:

$$a_P \phi_P = \sum_{vecinos} a_{vecinos} \phi_{vecinos} + b \quad (50)$$

Donde:

$$a_E = D_e A(|Pe_e|) + \max[-F_e, 0] \quad (51)$$

$$a_W = D_w A(|Pe_w|) + \max[F_w, 0] \quad (52)$$

$$a_N = D_n A(|Pe_n|) + \max[-F_n, 0] \quad (53)$$

$$a_S = D_s A(|Pe_s|) + \max[F_s, 0] \quad (54)$$

$$a_P^0 = \rho_P^0 \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (55)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_p^0 - S_p \Delta x \Delta y + (F_e - F_w) + (F_n - F_s) \quad (56)$$

$$b = a_p^0 \phi_p^0 + S_c \Delta x \Delta y \quad (57)$$

El término $A(|Pe_e|)$ representa una función del número de Péclet “Pe” que dependerá del esquema numérico de interpolación a implementar.

La ecuación de coeficientes agrupados, al ser aplicada para cada nodo del dominio computacional o mallado, se convierte en un sistema matricial pentadiagonal dominante (58), con su respectivo vector incógnita y resultante, adicionalmente, al incluir el término “ a_p^0 ” en la discretización, para aplicar una metodología de solución pseudo-transitoria, garantiza que la diagonal principal, que involucra los coeficientes “ a_p ” siempre sean mayores que la suma de los términos vecinos, lo que provoca una mayor estabilidad en el proceso iterativo de solución.

$$\begin{bmatrix} a_p & a_E & 0 & a_N & 0 \\ a_W & a_p & a_E & 0 & a_N \\ 0 & a_W & a_p & a_E & 0 \\ a_S & 0 & a_W & a_p & a_E \\ 0 & a_S & 0 & a_W & a_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \vdots \\ \phi_{N_x-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ \vdots \\ b_{N_x-1} \end{bmatrix} \quad (58)$$

3.2 Esquemas numéricos de interpolación

En 1980 Patankar compactó de forma generalizada los principales esquemas numéricos de interpolación, con la finalidad de completar el segundo nivel de aproximación para la discretización de la ecuación general de convección – difusión en función del número de Péclet.

Numero de Péclet: Salvador de la Heras J. (2012) lo define como un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos y transferencia de calor, que se define como la razón entre el transporte de calor convectivo respecto al transporte de calor difusivo [77], por otro lado, también se puede definir como una medida de la razón de fuerzas convectivas y difusivas, en otras palabras, se puede interpretar como una medida de la intensidad de convección de un fluido como:

$$Pe = \frac{F}{D} = \frac{\rho v}{\Gamma / \Delta x} \quad (59)$$

Donde “ F ” representa el flujo convectivo y “ D ” las conductancias difusivas.

En la ecuación (59) se puede notar que cuando el número de Péclet tiende a un valor igual a cero ($Pe \rightarrow 0$), la influencia sobre el nodo “P” se considera completamente por difusión, mientras que cuando el valor de Péclet tiende a infinito ($Pe \rightarrow \infty$), la influencia se considera solo por convección.

Los esquemas numéricos de interpolación a utilizar para problemas relacionados con CFD, tienen que cumplir con 3 propiedades para garantizar que los resultados obtenidos sean físicamente reales [78].

1. **Sistema conservativo:** Para garantizar la conservación de la variable en todo el dominio en estudio, el flujo de la variable que sale por un volumen de control debe ser igual al flujo que entra al volumen de control adyacente, para garantizar esto, se debe utilizar la misma expresión para representar ambos flujos (de salida y, de entrada).
2. **Sistema acotado:** Para satisfacer esta característica, es necesario tener un sistema diagonalmente dominante, esto se consigue cuando el término a_p resulta siempre mayor que la suma de sus vecinos, y esto se logra, según la formulación presentada anteriormente, cuando los coeficientes vecinos en la discretización tienen el mismo signo.
3. **Transportabilidad:** Implica que el esquema numérico de interpolación a utilizar debe tomar en cuenta la correcta dirección del fluido.

Esquema centrado

Es una aproximación lineal, en donde se utilizan los valores de la variable en estudio " ϕ " en las fronteras para calcular la media aritmética, sin embargo, este esquema no cumple con la tercera propiedad de transportabilidad al no considerar correctamente la dirección del flujo.

$$\phi_e = \frac{\phi_E + \phi_P}{2} \Delta y \quad (60)$$

$$\phi_w = \frac{\phi_P + \phi_W}{2} \Delta y \quad (61)$$

$$\phi_n = \frac{\phi_P + \phi_N}{2} \Delta x \quad (62)$$

$$\phi_s = \frac{\phi_S + \phi_P}{2} \Delta x \quad (63)$$

El esquema centrado es muy funcional para la discretización de variables escalares, como la presión y temperatura, pero no es recomendable para variables vectoriales como las velocidades, debido a que no toma en cuenta su dirección en la frontera del volumen de control.

Esquema Upwind

Aproxima el valor de la variable en la frontera del volumen de control, con el valor correspondiente al nodo inmediato anterior, tomando en cuenta el sentido de la velocidad, por lo tanto, se tienen 2 posibles casos para cada una de las dimensiones espaciales a tratar.

Si la dirección del flujo es de derecha a izquierda

$$\phi_e = \phi_P \quad (64)$$

$$\phi_w = \phi_W \quad (65)$$

Si la dirección del flujo es de izquierda a derecha

$$\phi_e = \phi_E \quad (66)$$

$$\phi_w = \phi_p \quad (67)$$

Si la dirección del flujo es de arriba hacia abajo

$$\phi_n = \phi_p \quad (68)$$

$$\phi_s = \phi_s \quad (69)$$

Si la dirección del flujo es de abajo hacia arriba

$$\phi_n = \phi_N \quad (70)$$

$$\phi_s = \phi_P \quad (71)$$

Esquema Híbrido

Fue desarrollado en 1972 por Spalding, y es una combinación del esquema upwind y centrado, considera una formulación con base al número de Péclet local, introduce aproximaciones lineales por tramos para evitar el cálculo de funciones exponenciales. Como ejemplo, para el caso unidimensional se pueden dar 3 posibles casos.

$$\frac{a_E}{D_e} = -Pe_e \quad (\text{para } Pe_e < -2) \quad (72)$$

$$\frac{a_E}{D_e} = 1 - \frac{Pe_e}{2} \quad (\text{para } -2 \leq Pe_e \leq 2) \quad (73)$$

$$\frac{a_E}{D_e} = -Pe_e \quad (\text{para } Pe_e > 2) \quad (74)$$

Las ecuaciones anteriores se pueden compactar en una sola expresión, para las 4 condiciones de flujo bidimensional:

$$a_E = \max \left[-F_e, \left(D_e - \frac{F_e}{2} \right), 0 \right] \quad (75)$$

$$a_W = \max \left[F_w, \left(D_w + \frac{F_w}{2} \right), 0 \right] \quad (76)$$

$$a_N = \max \left[-F_n, \left(D_n - \frac{F_n}{2} \right), 0 \right] \quad (77)$$

$$a_S = \max \left[F_s, \left(D_s + \frac{F_s}{2} \right), 0 \right] \quad (78)$$

Esquema de ley de potencia

Esta formulación presenta como ventaja una mejor exactitud, comparada con los esquemas anteriores, debido a que, en lugar de utilizar una aproximación lineal por tramos, se utiliza una aproximación por ley de potencia, estableciendo cuatro intervalos para el número de Péclet, la forma final para estimar los coeficientes vecinos al nodo "P" es:

$$a_E = D_e \max \left[0, \left(1 - 0.1 \left| \frac{F_e}{D_e} \right| \right)^5 \right] + \max [-F_e, 0] \quad (79)$$

$$a_W = D_w \max \left[0, \left(1 - 0.1 \left| \frac{F_w}{D_w} \right| \right)^5 \right] + \max [F_w, 0] \quad (80)$$

$$a_N = D_n \max \left[0, \left(1 - 0.1 \left| \frac{F_n}{D_n} \right| \right)^5 \right] + \max [-F_n, 0] \quad (81)$$

$$a_S = D_s \max \left[0, \left(1 - 0.1 \left| \frac{F_s}{D_s} \right| \right)^5 \right] + \max [F_s, 0] \quad (82)$$

En la tabla 3.1 se muestran las equivalencias de la función “ $A(|Pe_e|)$ ” para los diferentes esquemas numéricos de interpolación descritos.

Tabla 3.1. Función $A(|Pe_e|)$

Esquema numérico de interpolación	$A(Pe_e)$
Centrado	$1 - 0.5 Pe_e $
Upwind	1
Híbrido	$\max[0, (1 - 0.5 Pe_e)]$
Ley de potencia	$\max[0, (1 - 0.1 Pe_e)^5]$

3.3 Algoritmos de acople presión velocidad

En los problemas de dinámica de fluidos computacional, que involucra el cálculo de las componentes de velocidad, se presentan las siguientes complejidades:

1. La ecuación de momentum tiene un término convectivo que resulta altamente no lineal.
2. Las ecuaciones de momentum y continuidad están fuertemente acopladas debido a las componentes de velocidad que aparecen en ambas.

Estas condiciones forman un sistema de ecuaciones diferenciales parciales acoplado, representado por las siguientes ecuaciones.

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} \quad (11)$$

- No existe una ecuación de transporte para la presión, sin embargo, los gradientes de presión son la fuerza impulsora del movimiento del fluido.

En 1972 Patankar y Spalding desarrollaron una formulación implícita en términos de velocidad y presión, gracias a esto se originó el método semi implícito para ecuaciones ligadas a presión (SIMPLE, por sus siglas en inglés), además, demostraron que la solución de este sistema de ecuaciones acoplado, al discretizarse en los mismos nodos computacionales las ecuaciones de momentum y continuidad, generalmente conducen a una distribución de presión oscilatoria que no corresponde a la solución real, para evitar este problema se empleó el concepto de malla desplazada [76].

Técnica de mallas desplazadas

La técnica de mallas desplazadas es el uso de mallas superpuestas, una malla principal o centrada, en donde se evalúan las variables escalares, como la presión y temperatura, y las mallas desplazadas, donde se almacenan las componentes vectoriales, en este caso la velocidad, éstas se generan y están desplazadas en dirección de la respectiva componente vectorial que se desea calcular, así, la malla desplazada para obtener el campo de velocidad de la componente de “u” estará desplazada en dirección “+x” y de forma análoga la malla para la componente “v” se desplaza en “+y” como se observa en la figura 3.2.

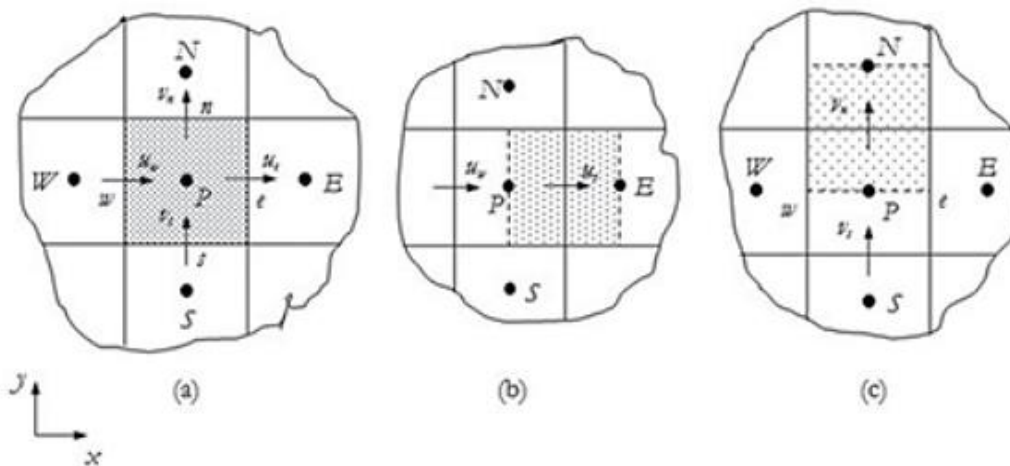


Figura 3.2. Volúmenes de control para la técnica de mallas desplazadas en un dominio bidimensional [69].

En este arreglo de mallas las fronteras o interfaces de los volúmenes de control coinciden con los puntos nodales de la malla principal, de esta forma, los balances para la presión no requieren ser interpolados, evitando una estimación errónea del campo de presión en el dominio.

Algoritmo SIMPLE

El algoritmo SIMPLE es una técnica de solución secuencial para resolver numéricamente las ecuaciones de conservación de la mecánica de fluidos, fenómenos de transporte y es aplicable tanto para fluidos compresibles como incompresibles.

La idea básica del algoritmo se basa en la suposición de un campo de presión en el dominio computacional, que a su vez, provoca una distribución de velocidades, sin embargo, al comenzar con un campo supuesto de presión, todas éstas distribuciones deben ser corregidas por el cumplimiento de la ecuación de continuidad y con ayuda de información adecuada como condiciones de frontera, de tal forma que, al repetirse el proceso descrito anteriormente de forma iterativa, si el sistema es consistente y estable en su procesamiento, se obtendrá a una solución aproximada respecto a un criterio denominado de convergencia, que generalmente cuantifica el nivel de aproximación de las variables a resolver, en este caso “ u, v, P, T ”.

El algoritmo SIMPLE, se puede resumir en una serie de pasos a seguir, más un paso adicional requerido para la solución del modelo matemático del ICTA, al requerir la solución de la primera ley de la termodinámica, para conocer los cambios de temperatura en el sistema.

Paso 1. Descomponer el término fuente de las ecuaciones de momentum, con la finalidad de tener una expresión explícita de la presión para cada componente de velocidad.

$$b = -(P_E - P_P)A_e + b^u \quad (83)$$

$$b = -(P_N - P_P)A_n + b^v \quad (84)$$

Los términos “ A_e ,” “ A_n ” hacen referencia a las dimensiones del volumen de control “ Δy ” y “ Δx ”, a su vez, los super índices “ u ” y “ v ” indican el uso de la malla desplazada en dirección positiva de “ x ” (+ x) e “ y ” (+ y) respectivamente. De esta forma, las ecuaciones de momentum discretizadas en su respectiva malla desplazada, se pueden reescribir como:

$$a_e^u u_e = \sum_{vecinos} a_{vecinos}^u u_{vecinos} - (P_E - P_P)A_e + b^u \quad (85)$$

$$a_n^v u_n = \sum_{vecinos} a_{vecinos}^v v_{vecinos} - (P_N - P_P)A_n + b^v \quad (86)$$

Debido a la formulación de las ecuaciones (85) y (86), es posible obtener el campo de velocidades al estimar una distribución del campo de presión “ P^* ” en el dominio computacional, es muy probable que dicha distribución satisfaga la conservación de masa, a menos que la distribución de presiones sea correcta, esta modificación a su vez cambia los campos de velocidad “ u^* ” y “ v^* ”.

$$a_e^u u_e^* = \sum_{vecinos} a_{vecinos}^u u_{vecinos}^* - (P_E^* - P_P^*)A_e + b^u \quad (87)$$

$$a_n^v v_n^* = \sum_{vecinos} a_{vecinos}^v v_{vecinos}^* - (P_N^* - P_P^*) A_n + b^v \quad (88)$$

Paso 2. El arreglo actual de mallas desplazadas hace necesario realizar una interpolación para conocer los flujos convectivos “ F ” y de conductancia “ D ”, de tal forma que para la solución de la velocidad “ u ” se tiene:

$$F_e^u = (\rho u)_E A_e = \frac{(\rho u)_{i,j} + (\rho u)_{i+1,j}}{2} A_e \quad (89)$$

$$F_w^u = (\rho u)_P A_w = \frac{(\rho u)_{i-1,j} + (\rho u)_{i,j}}{2} A_w \quad (90)$$

$$F_n^u = (\rho v)_{i,j} A_n = \frac{(\rho v)_{i,j} + (\rho v)_{i+1,j}}{2} A_n \quad (91)$$

$$F_s^u = (\rho v)_{i,j-1} A_s = \frac{(\rho v)_{i,j-1} + (\rho v)_{i,j}}{2} A_s \quad (92)$$

$$D_e^u = \left(\frac{\Gamma}{\delta x} \right)_E A_e = \frac{\Gamma_{i+1,j}^u}{(x_{i+1}^u - x_i^u)} A_e \quad (93)$$

$$D_w^u = \left(\frac{\Gamma}{\delta x} \right)_P A_w = \frac{\Gamma_{i,j}^u}{(x_i^u - x_{i-1}^u)} A_w \quad (94)$$

$$D_n^u = \left(\frac{\Gamma}{\delta y} \right)_{i,j} A_n = \frac{\Gamma_{i,j}^u + \Gamma_{i,j+1}^u + \Gamma_{i+1,j}^u + \Gamma_{i+1,j+1}^u}{4(y_{j+1}^u - y_j^u)} A_e \quad (95)$$

$$D_s^u = \left(\frac{\Gamma}{\delta y} \right)_{i,j-1} A_s = \frac{\Gamma_{i,j-1}^u + \Gamma_{i,j}^u + \Gamma_{i+1,j-1}^u + \Gamma_{i+1,j}^u}{4(y_j^u - y_{j-1}^u)} A_e \quad (96)$$

Los subíndices “ I, J ” hacen referencia a la notación indicial para valores fijos de un campo bidimensional, los subíndices “ i, j ” indican valores que cambian dentro de un ciclo de programación recorriendo una determinada dirección ortogonal en coordenadas cartesianas, las variables “ x ” e “ y ” son las coordenadas espaciales actuales en el cálculo en el dominio computacional.

De forma análoga para la solución de la velocidad “ v ”.

$$F_e^v = (\rho v)_{i,j} A_e = \frac{(\rho v)_{i,j} + (\rho v)_{i,j+1}}{2} A_e \quad (97)$$

$$F_w^v = (\rho v)_{i-1,j} A_w = \frac{(\rho v)_{i-1,j} + (\rho v)_{i-1,j+1}}{2} A_w \quad (98)$$

$$F_n^v = (\rho v)_N A_n = \frac{(\rho v)_{I,j} + (\rho v)_{I,j+1}}{2} A_n \quad (99)$$

$$F_s^v = (\rho v)_P A_s = \frac{(\rho v)_{I,j-1} + (\rho v)_{I,j}}{2} A_s \quad (100)$$

$$D_e^v = \left(\frac{\Gamma}{\delta x} \right)_{i,j} A_e = \frac{\Gamma_{I,J}^v + \Gamma_{I,J+1}^v + \Gamma_{I+1,J}^v + \Gamma_{I+1,J+1}^v}{4(x_{I+1}^v - x_I^v)} A_e \quad (101)$$

$$D_w^v = \left(\frac{\Gamma}{\delta x} \right)_{i-1,j} A_w = \frac{\Gamma_{I-1,J}^v + \Gamma_{I-1,J+1}^v + \Gamma_{I,J}^v + \Gamma_{I,J+1}^v}{4(x_I^v - x_{I-1}^v)} A_w \quad (102)$$

$$D_n^v = \left(\frac{\Gamma}{\delta y} \right)_N A_n = \frac{\Gamma_{I,J+1}^v}{(y_{j+1}^v - y_j^v)} A_n \quad (103)$$

$$D_s^v = \left(\frac{\Gamma}{\delta x} \right)_P A_s = \frac{\Gamma_{I,J}^v}{(y_j^v - y_{j-1}^v)} A_s \quad (104)$$

Paso 3. Se propone que la distribución de presión correcta “ P ” se obtenga de una corrección de presión “ P' ” según:

$$P = P^* + P' \quad (105)$$

Recordando que al modificar el campo de presión implica una modificación en los campos de velocidad, por medio de las velocidades de corrección “ u' ” y “ v' ”, de forma análoga la corrección de las velocidades se puede expresar como:

$$u_e = u^* + u' \quad (106)$$

$$v_n = v^* + v' \quad (107)$$

Para obtener una ecuación de momentum para la corrección de las velocidades, en función del campo de presión corregido, a las ecuaciones (85) y (86) que hacen referencia a la presión correcta, se le restan las ecuaciones (87) y (88), que representan las velocidades supuestas, al reducir términos semejantes de dicha operación el término fuente queda eliminado.

$$a_e^u u_e' = \sum_{vecinos} a_{vecinos}^u u_{vecinos}' - (P'_E - P'_P) A_e \quad (108)$$

$$a_n^v v_n' = \sum_{vecinos} a_{vecinos}^v v_{vecinos}' - (P'_N - P'_P) A_n \quad (109)$$

Con la finalidad de simplificar la relación entre las velocidades de corrección y la presión de corrección, en esta etapa del desarrollo del algoritmo SIMPLE Patankar (1980) propone la omisión de los términos $\sum_{vecinos} a_{vecinos}^u u_{vecinos}'$ y $\sum_{vecinos} a_{vecinos}^v v_{vecinos}'$, reduciendo las ecuaciones (108, 109) a.

$$u'_e = -d_e^u (P'_P - P'_E) \quad (110)$$

$$v'_n = -d_n^v (P'_P - P'_N) \quad (111)$$

Los coeficientes “ d_e^u ” y “ d_n^v ”, representan la relación entre las velocidades de corrección y la presión de corrección, se definen como:

$$d_e^u = \frac{A_e}{a_e^u} \quad (112)$$

$$d_n^v = \frac{A_n}{a_n^v} \quad (113)$$

Conociendo las velocidades de corrección se pueden calcular las velocidades sustituyendo las ecuaciones (110, 111) en (106, 107).

$$u_e = u_{i,j} = u_e^* + d_e^u (P'_P - P'_E) \quad (114)$$

$$v_n = v_{i,j} = v_n^* + d_n^v (P'_P - P'_N) \quad (115)$$

Paso 4. Determinar la información adecuada para la corrección de la presión “ P ”, la cual se obtiene con ayuda de la ecuación de continuidad, integrando para los volúmenes de control de la malla principal o centrada.

$$\int_s^n \int_w^e \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \partial x \partial y + \int_s^n \int_w^e \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \partial x \partial y = 0 \quad (116)$$

$$\int_w^e \partial(\rho u) \Delta y + \int_s^n \partial(\rho v) \Delta x = 0 \quad (117)$$

$$[(\rho u)_e - (\rho u)_w] \Delta x + [(\rho v)_n - (\rho v)_s] \Delta y = 0 \quad (118)$$

Sustituyendo “ u'_e ” y “ v'_n ” obtenidas en las ecuaciones (110, 111) con sus respectivos flujos apuestos.

$$\{\rho_e [u_e^* + d_e^u (P'_P - P'_E)]\} \Delta y - \{\rho_w [u_w^* + d_w^u (P'_W - P'_P)]\} \Delta y + \{\rho_n [v_n^* + d_n^v (P'_P - P'_N)]\} \Delta x - \{\rho_s [v_s^* + d_s^v (P'_P - P'_S)]\} \Delta x \quad (119)$$

Resolviendo productos y reduciendo los términos semejantes:

$$\rho_e d_e^u \Delta y (P'_P - P'_E) - \rho_w d_w^u \Delta y (P'_W - P'_P) + \rho_n d_n^v \Delta x (P'_P - P'_N) - \rho_s d_s^v \Delta x (P'_S - P'_P) = (\rho_w u_w^* - \rho_e u_e^*) \Delta y + (\rho_s v_s^* - \rho_n v_n^*) \Delta x \quad (120)$$

En este punto resulta conveniente renombrar los coeficientes de la ecuación (120) según la nomenclatura utilizada para la ecuación de coeficientes agrupados.

$$a_E = \rho_e d_e^u \Delta y \quad (121)$$

$$a_W = \rho_w d_w^u \Delta y \quad (122)$$

$$a_N = \rho_n d_n^v \Delta x \quad (123)$$

$$a_S = \rho_s d_s^v \Delta x \quad (124)$$

$$b' = (\rho_w u_w^* - \rho_e u_e^*) \Delta y + (\rho_s v_s^* - \rho_n v_n^*) \Delta x \quad (125)$$

Reescribiendo y reordenando términos se obtiene:

$$(a_E + a_W + a_N + a_S)P'_P = a_E P'_E + a_W P'_W + a_N P'_N + a_S P'_S + b' \quad (126)$$

De esta forma se define a_P como:

$$a_P = (a_E + a_W + a_N + a_S) \quad (127)$$

Así se obtiene la ecuación discretizada para la corrección de la presión en un dominio bidimensional.

$$a_P P'_P = a_E P'_E + a_W P'_W + a_N P'_N + a_S P'_S + b' \quad (128)$$

El término " b' " definido en la ecuación (125) representa la continuidad en términos de las velocidades obtenidas por la ecuación de momentum (87, 88), de tal forma que, se espera que el valor de " b' " tienda a cero a medida que el proceso iterativo de solución avanza en su desarrollo hasta alcanzar el criterio de convergencia, si esto sucede, significa que el sistema cumple con el principio de conservación de masa y/o la ecuación de continuidad.

La ecuación (128) se resuelve por métodos iterativos simultáneamente que las ecuaciones (87) y (88), se abordará este aspecto del modelado más adelante.

Paso 5. Ahora que se conoce el campo de corrección de presión " P' " es posible corregir el campo de presión y velocidades expresados en las ecuaciones (105, 114 y 115) respectivamente.

Como se mencionó anteriormente, antes de definir las ecuaciones (110, 111), la omisión de los términos $\sum_{vecinos} a_{vecinos}^u u'_{vecinos}$ y $\sum_{vecinos} a_{vecinos}^v v'_{vecinos}$, no afecta la solución final. Sin embargo, si afecta el tiempo de cómputo para alcanzar la convergencia, de hecho, es probable que el código o programa diverja, esto se soluciona mediante la técnica de relajación, de tal forma que, las variables a calcular se transforman en variables bajo relajación como:

$$P^\alpha = P^* + \alpha_P P' \quad (129)$$

$$u^\alpha = u^* + \alpha_u (u - u^*) \quad (130)$$

$$v^\alpha = v^* + \alpha_v (v - v^*) \quad (131)$$

Donde α representa un factor de relajación que puede tomar valores de mayores que cero hasta 1 ($0 < \alpha \leq 1$).

Paso 6. Este es el paso adicional para la solución del modelo matemático del ICTA, ya que solo después de realizar los pasos anteriores de forma ordenada, es posible resolver otras ecuaciones de transporte, en este caso, realizando la correspondiente discretización de la primera ley de la termodinámica, presentado de manera general, para cualquier variable de transporte en el apartado 3.1.

Paso 7. Establecer un criterio de convergencia adecuado según la complejidad del sistema, su estabilidad y tendencia a la convergencia, independientemente de lo anterior, en el modelado CFD, son necesarios procesos de verificación y validación que permiten medir el grado de aproximación del modelado en CFD al comparar los resultados obtenidos con resultados de referencia y resultados experimentales respectivamente.

Algoritmo SIMPLEC

Van Doormaal y Raithby, G. (1984), realizaron una modificación al algoritmo SIMPLE, la única diferencia entre ambos consiste en que en el algoritmo SIMPLE se omiten los términos $\sum_{vecinos} a_{vecinos}^u u'_{vecinos}$ y $\sum_{vecinos} a_{vecinos}^v v'_{vecinos}$, para las relaciones entre las velocidades y presión de corrección, mientras que para la modificación propuesta, denominada como algoritmo SIMPLEC (se agrega la letra “C” al final, en alusión a la palabra del inglés “correction”) no se omiten dichos términos, de tal forma que las relaciones entre las velocidades de corrección y la presión de corrección, en el algoritmo SIMPLEC se definen como [80]:

$$d_e^u = \frac{A_e}{a_e^u - \sum_{vecinos} a_{vecinos}^u} \quad (132)$$

$$d_n^v = \frac{A_n}{a_n^v - \sum_{vecinos} a_{vecinos}^v} \quad (133)$$

Esta modificación, permite evitar la relajación de la variable “P”.

Para tener una mejor comprensión de los 7 pasos o etapas a seguir para la solución del algoritmo SIMPLE o SIMPLEC, la figura 3.3 representa el diagrama de flujo para el algoritmo SIMPLE.

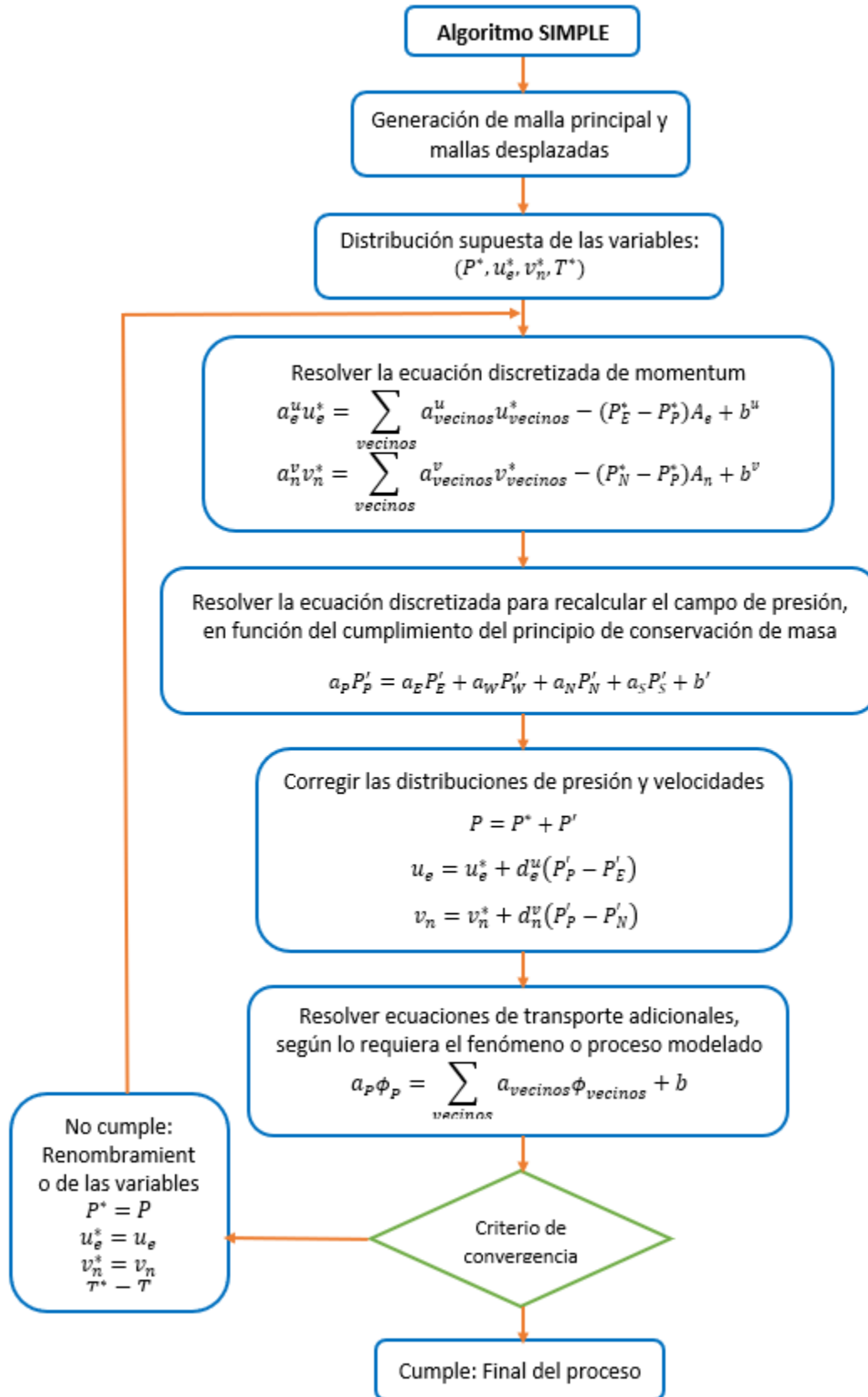


Figura 3.3. Diagrama de flujo para el algoritmo SIMPLE.

3.4 Solución del sistema de ecuaciones algebraicas.

Como ya se abordó anteriormente, el resultado de la discretización del MVF resulta en un grupo de ecuaciones algebraicas, que se resuelven con la finalidad de conocer la distribución de la variable en estudio " ϕ " en todo el dominio computacional o mallado, en función de la cantidad o número de nodos.

La complejidad y el tamaño del conjunto de ecuaciones algebraicas depende de la dimensión del problema, la cantidad de nodos de la malla y de la estrategia o técnica de discretización utilizada, sin embargo, los recursos computacionales para el cálculo son una fuerte restricción a tomar en cuenta, ya que, a mayor cantidad de nodos, implica menores tamaños en los volúmenes de control definidos por el punto " P ", a su vez, las distancias entre nodos vecinos se acortan, lo que generalmente provoca una mayor aproximación en la estimación de la distribución de una determinada variable en el dominio estudiado, debido a que a medida en que se reduce la distancia entre nodos vecinos, el sistema tiende al continuo, apegándose a la naturaleza real de los modelos matemáticos conformados por sistemas de ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan la dinámica de fluidos y demás fenómenos de transporte, antes de convertirse en modelos aproximados debido al proceso de discretización.

3.5 Algoritmo de Thomas.

El algoritmo de Thomas TDMA (del inglés Tri-diagonal Matrix Algorithm), se desarrolló especialmente para la resolución óptima de matrices tridiagonales, que es cuando los coeficientes de una matriz son todos cero excepto en la diagonal principal y sus dos diagonales vecinas, de la misma forma que cuando se realiza la discretización por el MVF unidimensionalmente, sin embargo, dicho algoritmo se puede adaptar para la resolución de matrices pentadiagonales y heptadiagonales, como las obtenidas por una discretización del MVF en sistemas bidimensionales y tridimensionales respectivamente.

Para iniciar el algoritmo TDMA se considera el proceso de solución hacia delante.

$$\phi_P(i) = P(i)\phi_E(i + 1) + Q(i) \quad (134)$$

Donde " $P(i)$ " y " $Q(i)$ " son relaciones de recurrencia, que serán definidas más adelante.

Si se evalúa la relación anterior para el punto $i - 1$, la ecuación se puede escribir como:

$$\phi_W(i - 1) = P(i - 1)\phi_P(i) + Q(i - 1) \quad (135)$$

Sustituyendo la ecuación (135) en (49) que es la ecuación de coeficientes agrupados se obtiene:

$$a_P(i)\phi_P(i) = a_W(i)[P(i - 1)\phi_P(i) + Q(i - 1)] + a_E(i)\phi_E(i + 1) + b(i) \quad (136)$$

Reacomodando términos:

$$\phi_P(i) = \frac{a_E(i)}{a_P(i) - a_W(i)P(i-1)} \phi_E(i+1) + \frac{b(i) + a_W(i)Q(i-1)}{a_P(i) - a_W(i)P(i-1)} \quad (137)$$

Comparando las ecuaciones (137) con la ecuación (134), se obtienen las relaciones de recurrencia “ $P(i)$ ” y “ $Q(i)$ ” como:

$$P(i) = \frac{a_E(i)}{a_P(i) - a_W(i)P(i-1)} \quad (138)$$

$$Q(i) = \frac{b(i) + a_W(i)Q(i-1)}{a_P(i) - a_W(i)P(i-1)} \quad (139)$$

Para iniciar el proceso de cálculo se deben determinar las relaciones de recurrencia “ $P(i)$ ” y “ $Q(i)$ ” para todos los nodos del dominio computacional, de esta forma, para el caso de $i = 1$.

$$P(1) = \frac{a_E(1)}{a_P(1)} \quad (140)$$

$$Q(1) = \frac{b(1)}{a_P(1)} \quad (141)$$

Para determinar los valores de $P(i)$ y $Q(i)$ en los nodos restantes, se aplican las ecuaciones (138 y 139), cuando $i = Nx$, se sabe que $a_E(Nx) = 0$, por lo tanto, $P(Nx) = 0$, de esta forma y por medio de la ecuación (134), se obtiene:

$$\phi_P(Nx) = Q(Nx) \quad (142)$$

Una vez alcanzado este punto, es posible iniciar una sustitución hacia atrás para $i = Nx, Nx - 1, Nx - 2, Nx - 3, \dots, Nx - (Nx - 1)$ utilizando la ecuación (133), lo cual, al terminar en la posición $Nx - (Nx - 1) = 1$, es decir en el primer nodo para la dirección “ i ” se completa el proceso de cálculo del algoritmo de Thomas.

3.6 Modificaciones del algoritmo de Thomas para matrices pentadiagonales.

Para resolver un sistema de ecuaciones algebraicas que forman una matriz pentadiagonal se puede partir de las primeras modificaciones realizadas al TDMA conocidas como método de línea por línea en dirección $-x$ ($LBL - x$), o el método de línea por línea en dirección $-y$ ($LBL - y$).

El método de línea por línea en dirección $-x$ ($LBL - x$), parte de descomponer la ecuación (49) en coeficientes agrupados de la siguiente forma:

$$-a_W \phi_W + a_P \phi_P - a_E \phi_E = b^* \quad (143)$$

$$b^* = a_S \phi_S + a_N \phi_N + b \quad (144)$$

El término " b^* ", se supone conocido al tomar los valores para las variables " ϕ_S ," " ϕ_N " de la iteración anterior, de esta forma, la ecuación (143) se convierte en una matriz tridiagonal, así, el sistema puede resolverse a lo largo de la dirección negativa de " $-x$ " como si se tratase de un problema unidimensional, al aplicarse la ecuación (143) j veces desde $j = 1$ hasta $j = Ny$ (Ny es el número de nodos en dirección vertical), al terminar de recorrer todas las líneas de j , se considera como una iteración del método $LBL - x$, al aplicar un criterio de convergencia, si éste se cumple, el proceso de cálculo de " ϕ " terminará, si no, se actualiza el valor de " ϕ " y se repite la operación hasta cumplir con el criterio de convergencia establecido, se conoce como dirección de barrido a la secuencia en que las líneas de la matriz se van resolviendo, en este caso la dirección es en " $-x$ ". El proceso para el método de línea por línea en dirección $-y$ ($LBL - y$), es análogo al método $LBL - x$, solo que la ecuación de coeficientes agrupados se modifica como:

$$-a_N\phi_N + a_P\phi_P - a_S\phi_S = b^* \quad (145)$$

$$b^* = a_W\phi_W + a_E\phi_E + b \quad (146)$$

Esta vez, el término " b^* ", se da como conocido al utilizar los valores obtenidos en la iteración anterior para las variables " ϕ_W " y " ϕ_E ", ahora la dirección de barrido es " $-y$ ", y la matriz se resuelve columna por columna.

Las estrategias anteriores pueden ser combinadas para mejorar el proceso iterativo y acelerar la convergencia del sistema, con ayuda de una modificación conocida como método de línea por línea en direcciones alternantes ($LBL - ADI$), esto se consigue cuando los resultados obtenidos para las variables " ϕ_S ," " ϕ_N " al aplicar el método $LBL - x$, se utilizan como las variables anteriormente supuestas para el método $LBL - y$.

Si se introduce la filosofía de punto a punto de Gauss-Seidel, los métodos anteriores pueden incrementar su eficiencia reduciendo el número de iteraciones que deben realizar para alcanzar la convergencia del sistema y se denominan:

Método de línea con Gauss-Seidel en dirección $-x$ ($LGS - x$).

Método de línea con Gauss-Seidel en dirección $-y$ ($LGS - y$).

Método de línea con Gauss-Seidel en direcciones alternantes ($LGS - ADI$)

El método $LGS - x$ tiene la misma estructura y metodología que el método $LBL - x$, la diferencia radica que al tomar los valores para las variables " ϕ_S ", se utilizan los valores ya determinados durante esa misma iteración, de tal forma que para iniciar el método en la línea $j = 1$, se suponen los valores de " ϕ_N^* ", así, para las siguientes líneas de barrido del método ($j = 2, 3, , \dots, Ny$), se utiliza el valor recién calculado de " ϕ_S " y para " ϕ_N^* " se toma el valor de la iteración anterior, de tal forma que la ecuación a resolver es:

$$-a_W\phi_W + a_P\phi_P - a_E\phi_E = b^{**} \quad (147)$$

$$b^{**} = a_S\phi_S + a_N\phi_N^* + b^* \quad (148)$$

Donde " ϕ_N^* " y " ϕ_N " representan los valores obtenidos en la iteración anterior, al igual que el método $LBL - x$, el sistema generado representa una matriz tridiagonal que puede resolverse por medio del algoritmo de Thomas.

De forma análoga para el método $LGS - y$.

$$-a_S\phi_S + a_P\phi_P - a_W\phi_W = b^{**} \quad (149)$$

$$b^{**} = a_W\phi_W + a_E\phi_E^* + b^* \quad (150)$$

Por último, el método de línea de Gauss-Seidel en direcciones alternantes ($LGS - ADI$), resulta de la combinación de los métodos $LGS - x$ y $LGS - y$, iniciando con cualquiera de ellos y utilizando los valores encontrados por la primera iteración del método inicial para la variable " ϕ " en lugar de un valor supuesto para la siguiente iteración con el método contrario.

3.7 Criterio de convergencia

Cuando se utilizan métodos iterativos para la solución de ecuaciones algebraicas, si la solución tiende a la convergencia, significa que se está aproximando de manera asintótica a la solución del sistema de ecuaciones diferenciales parciales original, también es necesario tener en cuenta que al ser una solución aproximada, llegará un punto donde independientemente del número de iteraciones adicionales, ya no es posible obtener una mejora en los resultados, es decir, la aproximación tiene un límite independiente de la cantidad de iteraciones realizadas, esto es debido a los errores involucrados en los truncamientos de las aproximaciones utilizadas durante el segundo nivel de aproximación, por la discretización del MFV, o de otras metodologías discretas de cálculo. Por esta razón, es necesario establecer un criterio de convergencia a partir del cual se considera como una solución suficientemente convergente. En este trabajo se utilizó como criterio de convergencia el error cuadrático medio (RMSE), el criterio de convergencia se establece como ($< 1 \cdot 10^{-10}$) para las variables de flujo " u ", " v ", " P " y ($< 1 \cdot 10^{-5}$) para la primera ley de la termodinámica " T ", la obtención de un valor de residual local para cada volumen de control se obtiene de:

$$RMSE_{local} = \left| (a_P\phi_P)^k - \left(\sum_{vecinos} a_{vecinos}\phi_{vecinos} + b \right) \right| \quad (151)$$

Donde el super índice " k " es número de iteración actual. De tal forma que el residual global para todo el dominio computacional se define como:

$$RMSE_{global} = \sum_{todo\ los\ VC} RMSE_{local} \quad (152)$$

Capítulo 4: Verificación, análisis de independencia de malla y validación del código

Este capítulo tiene la finalidad de avanzar en la modelación del ICTA, es necesario verificar la correcta solución e implementación de los modelos matemáticos que describen el comportamiento de los fenómenos físicos involucrados en estos sistemas, además de comprobar su correcta implementación en un código numérico, de esta forma se verifica que no existan errores en la comprensión e interpretación de los modelos matemáticos, en su discretización o en su implementación en un lenguaje de programación.

El proceso de verificación se realiza con la ayuda de problemas resueltos en la literatura, los cuales son considerados como problemas de verificación, cuya solución es aceptada y considerada por la comunidad científica como de referencia.

4.1 Flujo laminar en una cavidad cuadrada con pared deslizante

El problema de flujo laminar en una cavidad cuadrada con pared deslizante es ampliamente utilizado y referenciado a nivel internacional para verificar la correcta implementación de los algoritmos de acople presión-velocidad.

El problema consiste en considerar flujo incompresible laminar en una cavidad cuadrada, con la pared superior moviéndose a una velocidad uniforme (figura 4.1).

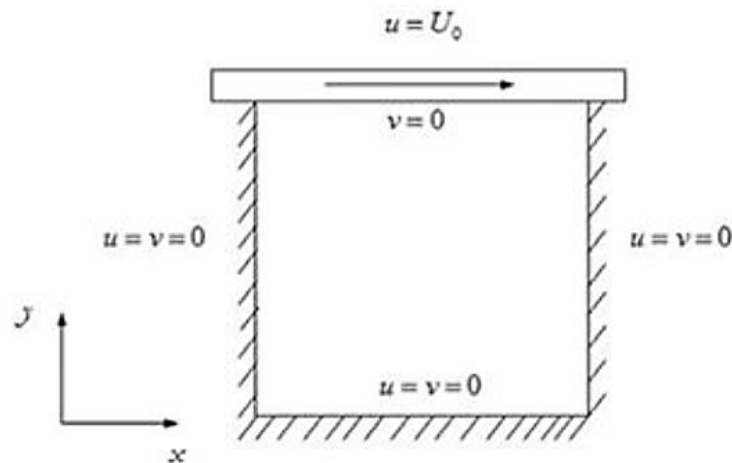


Figura 4.1. Modelo físico y sus respectivas condiciones de frontera (fronteras de primera clase), para el problema de una cavidad cuadrada con pared deslizante.

El problema se resolvió mediante el algoritmo SIMPLEC y el modelo matemático que se resuelve está representado por las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento en 2D (x, y) , con el cual se obtiene el campo de velocidades del aire contenido en el interior de la cavidad en función del número de Reynolds, el cual es un número adimensional utilizado para caracterizar el movimiento de un fluido. Su valor indica si el flujo se comporta de manera laminar o turbulenta.

El número de Reynolds se calcula como el producto de la densidad, velocidad y la sección transversal por la que fluye un fluido, dividido por la viscosidad dinámica, la cual se opone al movimiento del fluido. De tal forma que para un número de Reynolds igual a 100, implica que la inercia de movimiento del fluido es 100 veces mayor que la resistencia al movimiento debido a la viscosidad.

$$Re = \frac{\rho u_0 H}{\nu} \quad (153)$$

El modelo matemático para discretizar es representado por las ecuaciones (9, 10, 11) planteadas desde el capítulo 2 como parte del modelo matemático para el ICTA.

$$\left(\frac{\partial(\rho)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{\partial P}{\partial y} \quad (11)$$

Se utilizó la técnica numérica denominada como pseudo - transitorio, la cual consiste en resolver el problema definiendo un cierto número de iteraciones para cada variable a calcular según un falso paso temporal, esto ayuda a:

1. Estabilizar el código
2. Disminuye el tiempo computacional requerido para obtener la solución

Los resultados están normalizados de la forma:

$$xNorm = \frac{x}{Hx} \quad (152)$$

$$uNorm = \frac{v}{u_0} \quad (154)$$

$$yNorm = \frac{y}{Hy} \quad (153)$$

$$xNorm = \frac{v}{u_0} \quad (155)$$

En la figura 4.2 se observa la distribución de la componente de velocidad horizontal en el dominio para 3 números de Reynolds, el color amarillo representa el valor máximo alcanzado en la cavidad, mientras el color azul oscuro el mínimo, se observa que la velocidad máxima se presenta en la capa de fluido que se encuentra más cerca de la pared deslizante.

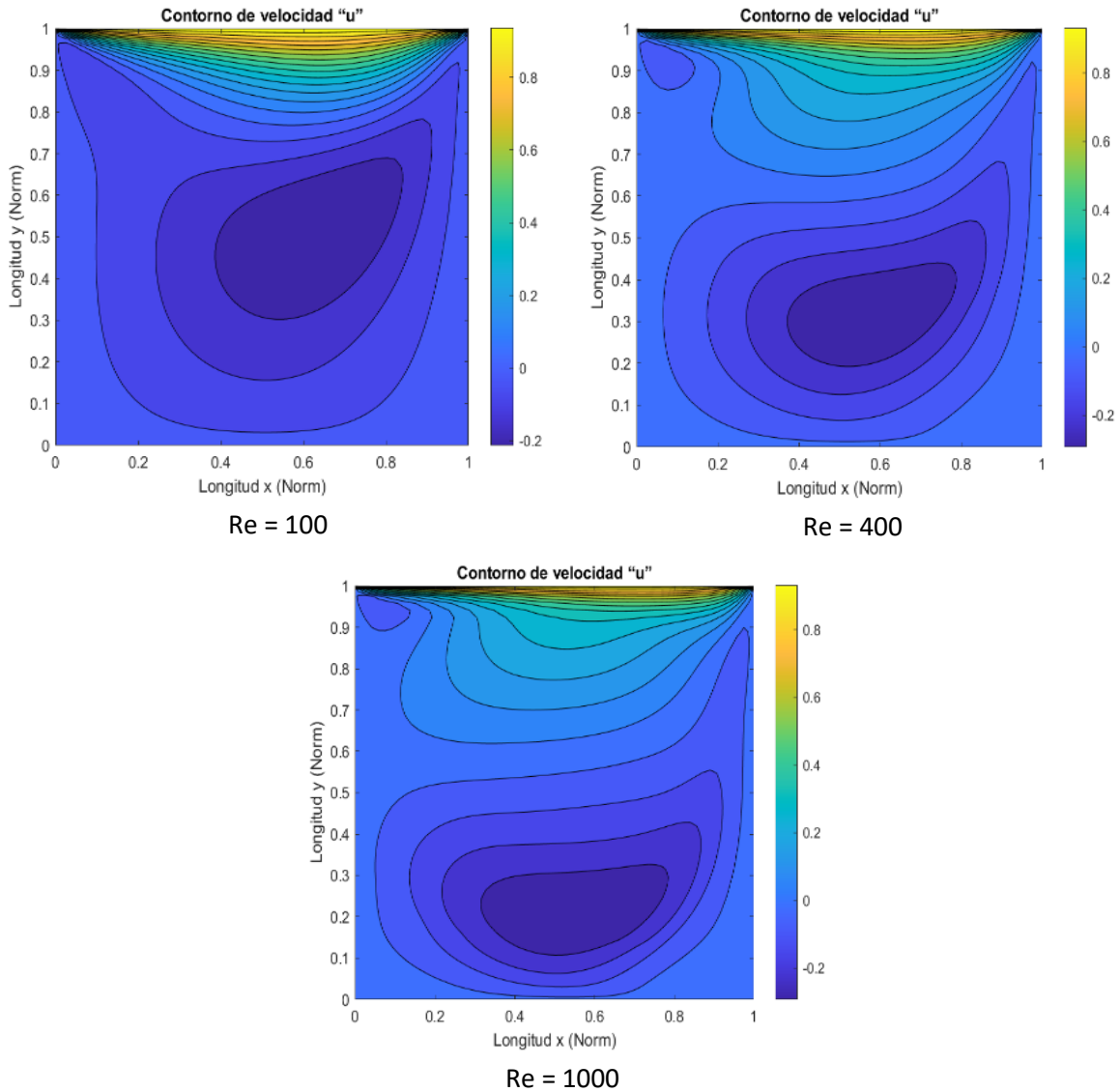


Figura 4.2. Contornos de velocidad horizontal "u" para 3 números de Reynolds respectivamente (100, 400 y 1000).

Para la verificación del problema se compararon los resultados con los obtenidos por Ghia et al. (1982), resultados que representan una solución de referencia para el problema de flujo laminar en una cavidad cuadrada con pared deslizante (figura 4.3) [80].

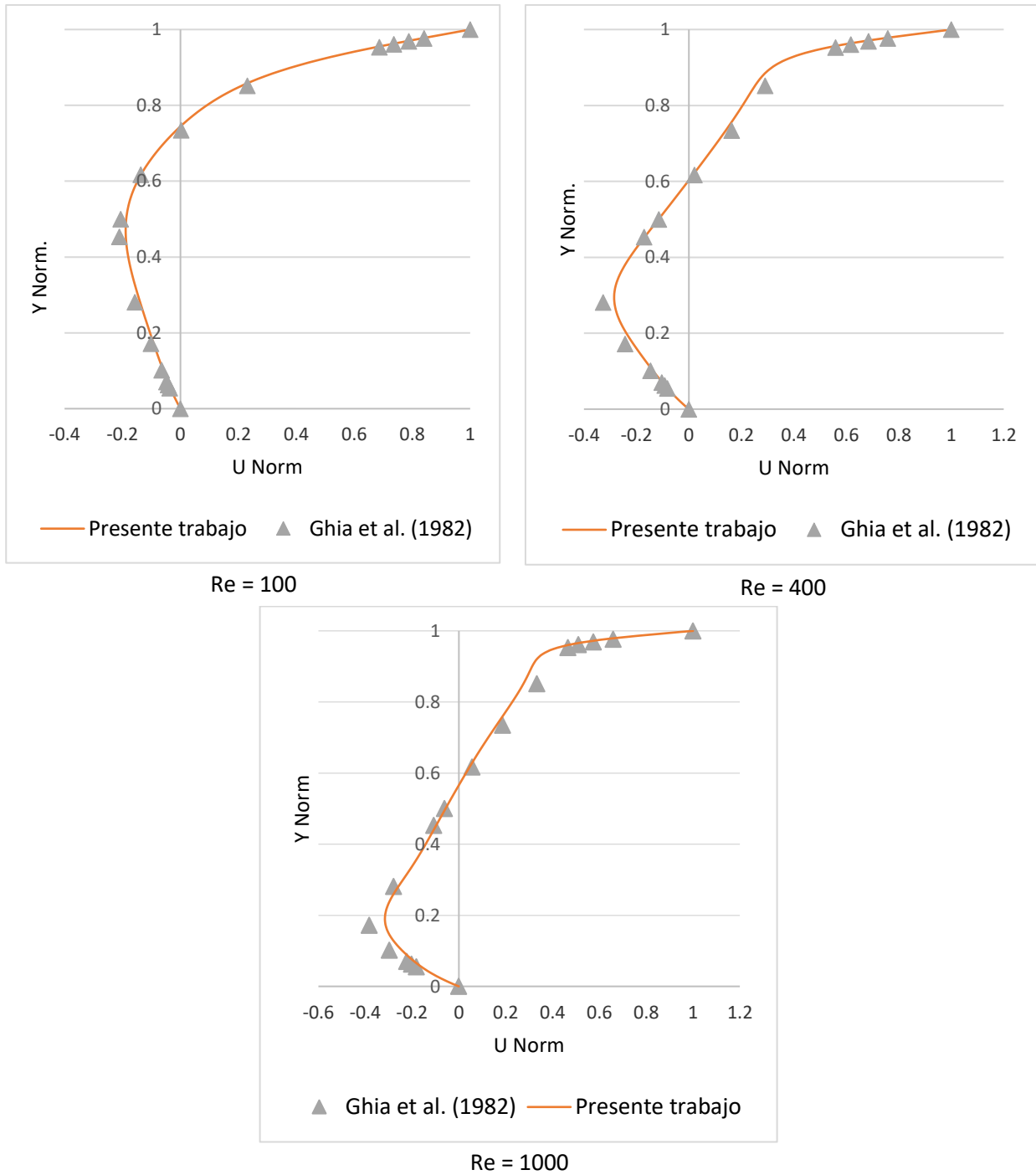


Figura 4.3. Comparación cualitativa de los valores de velocidad obtenidos en la vertical completa ubicada en el centro horizontal del dominio, respecto a los obtenidos por Ghia et al.

En la tabla 4.1 se presenta de forma cuantitativa lo observado en la figura 4.3 con la respectiva desviación relativa obtenida en este trabajo respecto a los valores reportados como referencia.

Tabla 4.1. Comparación cuantitativa para la componente de velocidad “u” del problema de flujo laminar en una cavidad cuadrada con pared deslizante

Componente de velocidad u Re = 100				Componente de velocidad u Re = 400			Componente de velocidad u Re = 1000		
Posición en (y)	Ghia et al. (1982)	Presente Trabajo	Desviación relativa %	Ghia et al. (1982)	Presente Trabajo	Desviación relativa %	Ghia et al. (1982)	Presente Trabajo	Desviación relativa %
0.9766	0.8412	0.8450	0.4520	0.7583	0.7576	0.1003	0.6592	0.6469	1.8627
0.9688	0.7887	0.7944	0.7253	0.6843	0.6874	0.4476	0.5749	0.5702	0.8090
0.9609	0.7372	0.7438	0.8965	0.6175	0.6172	0.0421	0.5111	0.4935	3.4492
0.9531	0.6871	0.6960	1.2871	0.5589	0.5072	9.2425	0.4660	0.4493	3.5810
0.8516	0.2315	0.2432	5.0723	0.2903	0.2625	9.5745	0.3330	0.2847	14.4935
0.7344	0.0033	0.0029	9.7678	0.1625	0.1529	5.9068	0.1871	0.1729	7.5906
0.6172	-0.1364	-0.1372	0.6027	0.0213	0.0242	13.7160	0.0570	0.0580	1.8206
0.5000	-0.2058	-0.1871	9.0697	-0.1147	-0.1157	0.8307	-0.0608	-0.0570	6.2124
0.4531	-0.2109	-0.1987	5.7822	-0.1711	-0.1650	3.6053	-0.1064	-0.1059	0.5300
0.2813	-0.1566	-0.1499	4.2446	-0.3272	-0.2830	13.5120	-0.2780	-0.2612	6.0310
0.1719	-0.1015	-0.0982	3.2370	-0.2429	-0.2209	9.0638	-0.3828	-0.3151	17.7009
0.1016	-0.0643	-0.0632	1.6457	-0.1461	-0.1453	0.4949	-0.2973	-0.2538	14.6143
0.0703	-0.0477	-0.0468	1.8621	-0.1033	-0.1123	8.6499	-0.2222	-0.2077	6.5105
0.0625	-0.0419	-0.0386	7.6879	-0.0926	-0.0947	2.2816	-0.2019	-0.1943	3.7795
0.0547	-0.0371	-0.0356	3.9623	-0.0818	-0.0762	6.8336	-0.1810	-0.1809	0.0961
	Desviación Global		3.52	Desviación Global		4.96	Desviación Global		5.24
	Desviación mínima		0.45	Desviación mínima		0.04	Desviación mínima		0.1
	Desviación máxima		9.77	Desviación máxima		13.72	Desviación máxima		17.7

De forma análoga, la distribución de la componente vertical de velocidad “v” obtenidos se muestran en la figura 4.4, la comparación cualitativa en la figura 4.5, los cuales representan valores obtenidos de velocidad ubicados en la línea horizontal completa ubicada en el centro vertical del dominio. Y en la tabla 4.2 la comparación cuantitativa respecto a los valores de referencia.

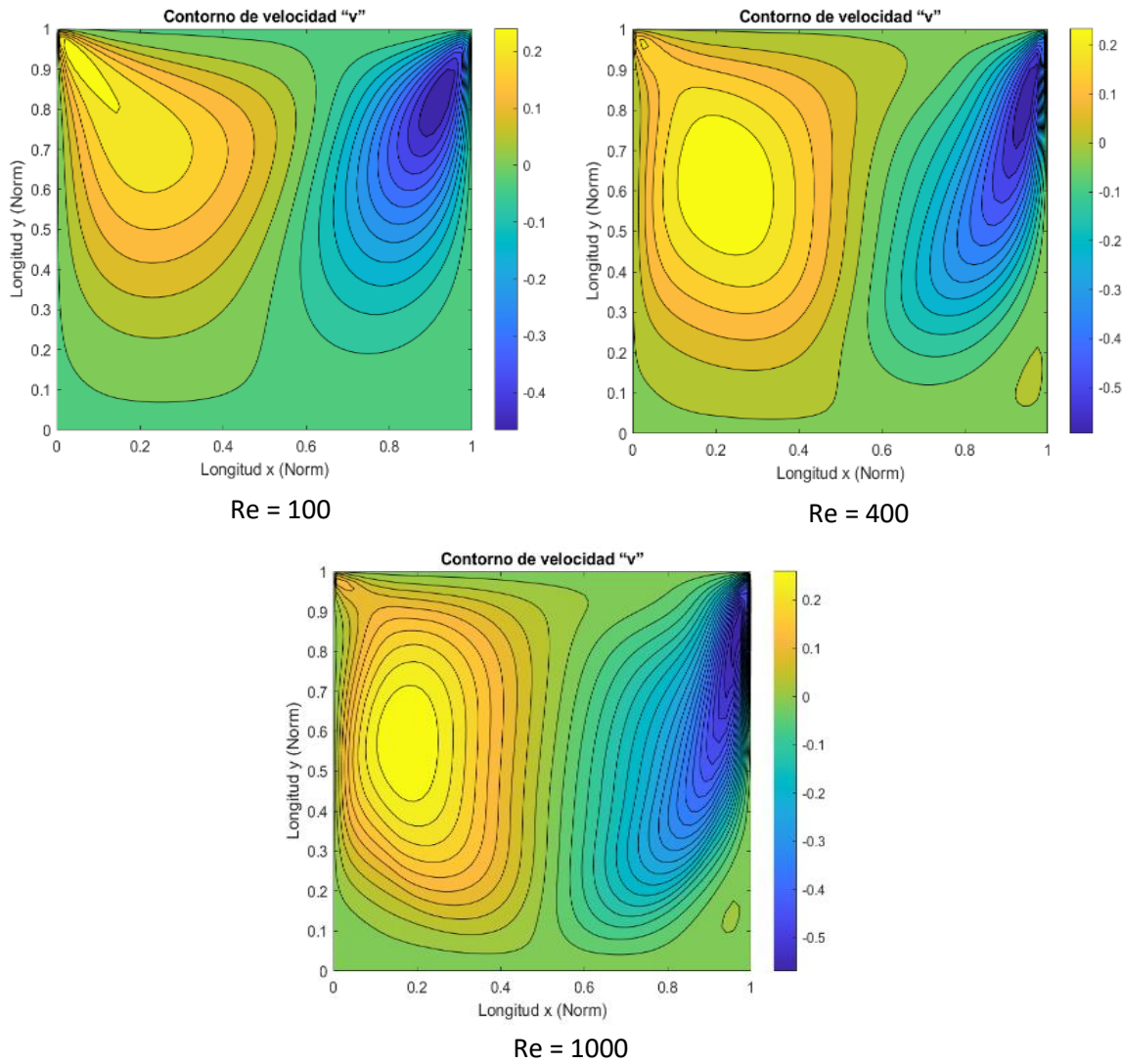
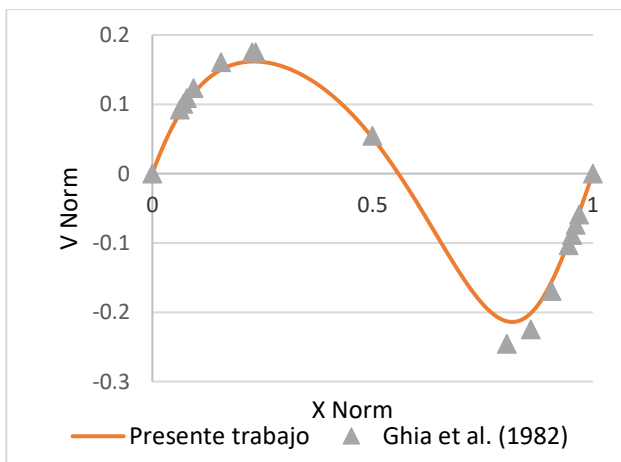
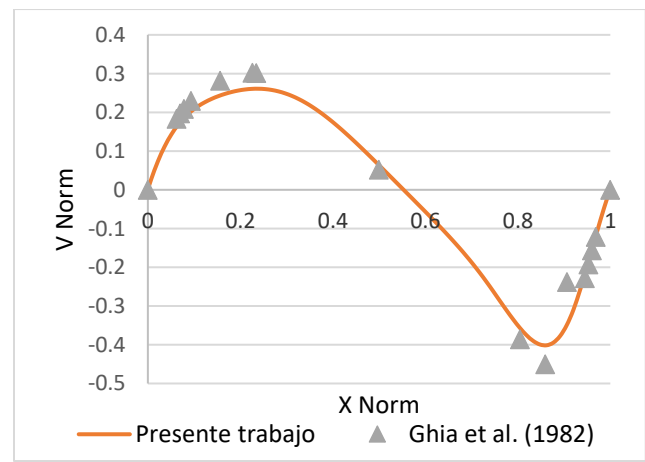


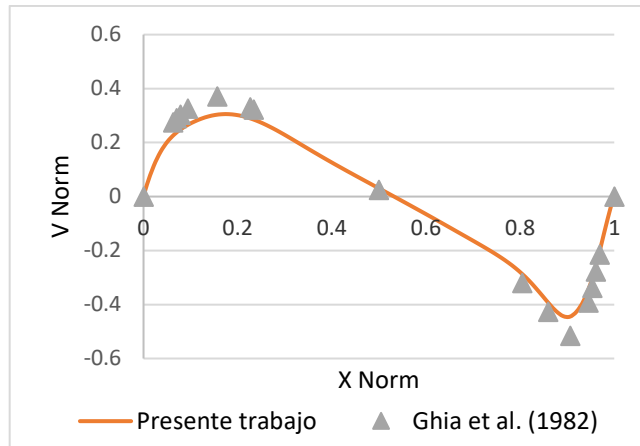
Figura 4.4. Contornos de velocidad vertical "v" para 3 números de Reynolds respectivamente (100, 400 y 1000).



Re = 100



Re = 400



Re = 1000

Figura 4.5. Comparación de los valores de velocidad obtenidos en la línea horizontal completa ubicada en el centro vertical del dominio, respecto a los obtenidos por Ghia et al. en 1982

Tabla 4.2. Comparación cuantitativa para la componente de velocidad “v” del problema Driven Cavity

Componente de velocidad v Re = 100				Componente de velocidad v Re = 400			Componente de velocidad v Re = 1000		
Posición en (x)	Ghia et al. (1982)	Presente Trabajo	Desviación relativa %	Ghia et al. (1982)	Presente Trabajo	Desviación relativa %	Ghia et al. (1982)	Presente Trabajo	Desviación relativa %
0.9688	-0.0590	-0.0581	1.5339	-0.1214	-0.1268	4.4084	-0.2138	-0.2184	2.1358
0.9609	-0.0739	-0.0778	5.2881	-0.1566	-0.1491	4.7982	-0.2766	-0.2713	1.9208
0.9531	-0.0886	-0.0904	2.0812	-0.1925	-0.2008	4.3068	-0.3371	-0.3243	3.8078
0.9453	-0.1031	-0.1025	0.6084	-0.2284	-0.2293	0.3995	-0.3918	-0.3862	1.4338
0.9063	-0.1691	-0.1566	7.4024	-0.2382	-0.2579	8.2525	-0.5155	-0.4449	13.6880
0.8594	-0.2244	-0.1992	11.2206	-0.4499	-0.4013	10.8028	-0.4266	-0.3984	6.6045
0.8047	-0.2453	-0.2129	13.1926	-0.3859	-0.3563	7.6786	-0.3196	-0.2866	10.3365
0.5000	0.0545	0.0513	5.7849	0.0518	0.0633	22.1279	0.0252	0.0305	20.7467
0.2344	0.1752	0.1616	7.7728	0.3017	0.2608	13.5371	0.3223	0.2908	9.7701
0.2266	0.1750	0.1615	7.7362	0.3020	0.2665	11.7357	0.3307	0.2979	9.9235
0.1563	0.1607	0.1532	4.6790	0.2812	0.2476	11.9572	0.3709	0.3052	17.7136
0.0938	0.1231	0.1265	2.7326	0.2296	0.2157	6.0506	0.3262	0.2784	14.6656
0.0781	0.1089	0.1039	4.5040	0.2092	0.2030	2.9210	0.3035	0.2656	12.4777
0.0703	0.1009	0.0969	3.8982	0.1971	0.1873	4.9733	0.2901	0.2608	10.0999
0.0625	0.0923	0.0899	2.5695	0.1836	0.1675	8.7434	0.2748	0.2499	9.0486
	Desviación Global		5.06	Desviación Global		7.22	Desviación Global		8.49
	Desviación mínima		0.61	Desviación mínima		0.4	Desviación mínima		1.43
	Desviación máxima		13.19	Desviación máxima		22.13	Desviación máxima		20.75

4.2 Flujo laminar por convección natural en una cavidad cuadrada calentada diferencialmente.

El siguiente problema de verificación, además de obtener el campo de velocidades resultante, se pide también la incorporación del transporte de energía en forma de calor, es decir, se calculará la distribución de temperatura en el dominio en estado permanente por convección natural en una cavidad cuadrada.

Se considera flujo laminar e incompresible en una cavidad cuadrada con sus paredes verticales sometidas a un gradiente de temperaturas (ΔT) de 10 K. El modelo físico se muestra en la figura 4.6. Las condiciones de frontera para las velocidades son de no deslizamiento en todas las paredes, y para la temperatura son: $T_F = 288$ K, $T_C = 298$ K para las fronteras laterales y $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ para las fronteras aisladas (frontera de segunda clase, adiabática).

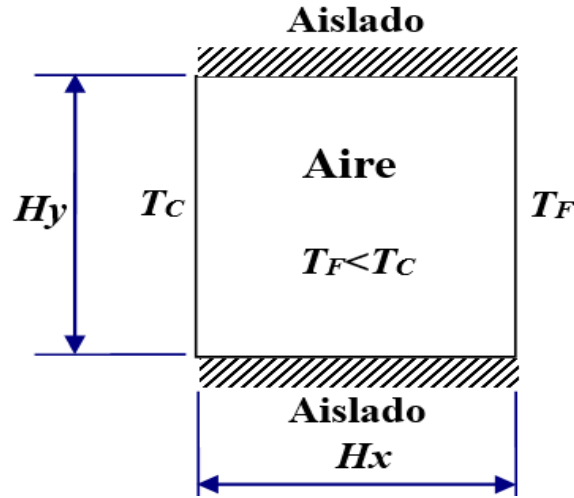


Figura 4.6. Modelo físico para el problema de la cavidad calentada diferencialmente.

El modelo matemático para discretizar es representado por las ecuaciones (9, 10, 11b y 12) planteadas desde el capítulo 2 como el modelo matemático completo para el ICTA.

$$\left(\frac{\partial(\rho)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g \beta (\Delta T) \quad (11b)$$

$$\left(\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial y}\right) \quad (12)$$

Las dimensiones de la cavidad “ H_x ” e “ H_y ” se determinan en función del número de Rayleigh.

$$Ra = GrPr \quad (156)$$

$$Gr = \frac{g\beta(\Delta T)H^3}{\nu^2} \quad (157)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (158)$$

Sustituyendo

$$Ra = \frac{(Pr)g\beta(\Delta T)H^3}{\nu^2} \quad (159)$$

$$\text{Despejando } H \text{ (} H = H_x = H_y \text{)} \quad H = \sqrt[3]{\frac{Ra(\nu^2)}{(Pr)g\beta(\Delta T)}} \quad (160)$$

Cuando el número de Rayleigh está por debajo de un cierto valor crítico, la transferencia de calor se produce principalmente por conducción, cuando está por encima de éste, la transferencia de calor se produce principalmente por el fenómeno de convección, y es precisamente este fenómeno el que se pretende observar al resolver el problema para diferentes números de Rayleigh.

Generalmente, la convección comienza para valores del número de Rayleigh mayores de mil, $Ra > 1000$, mientras que para $Ra < 1000$ la transferencia de calor se da completamente por efectos conductivos (también conocidos como efectos difusivos).

Para la comparación cuantitativa del problema, se evaluó el Número de Nusselt (Nu) local a lo largo de la pared vertical que se encuentra a mayor temperatura (Pared caliente).

El Número de Nusselt: Es un número adimensional que evalúa la relación entre la transferencia de calor por convección y la transferencia de calor por conducción, de tal forma que, para números de Rayleigh < 1000 , se considera una transferencia de calor se da solo por el fenómeno de conducción, entonces en número de Nusselt adquiere el valor de la unidad $Nu = 1$, sin embargo, para números de Rayleigh > 1000 la transferencia de calor es una combinación de ambos fenómenos.

De tal forma que cuando el Número de Nusselt sea mayor que la unidad ($Nu > 1$) este será el factor que representa la mejora de la transferencia de calor de un fluido por efectos convectivos en relación con la conducción (difusión).

$$Nu = \frac{q_{Convectivo}}{q_{Conductivo}} = \frac{-k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{Pared}}{-k \left(\frac{TC - TF}{Hx} \right)} = \frac{Hx}{(TC - TF)} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{Pared} \quad (161)$$

Se utilizaron los siguientes parámetros para adimensionalizar los resultados:

$$H_0 = Hx \quad (162)$$

$$u_0 = \sqrt{g\beta(\Delta T)H_0} \quad (163)$$

$$P_0 = \rho u_0^2 \quad (164)$$

Las variables Normalizadas quedan:

$$X = \frac{x}{H_0} \quad (165) \quad V = \frac{v}{u_0} \quad (168)$$

$$Y = \frac{y}{H_0} \quad (166) \quad P = \frac{P}{P_0} \quad (169)$$

$$U = \frac{u}{u_0} \quad (167) \quad T = \frac{T - T_C}{T_C - T_F} \quad (170)$$

Se toman como valores de referencia los obtenidos por De Vahl Davis et al. (1983) [81].

Los resultados obtenidos para los Números de Rayleigh = 1000, se muestran en la figura 4.7, en la parte superior están los contornos de las componentes de velocidad “u” (esquina superior izquierda) y “v” (esquina superior derecha) respectivamente, seguido de las líneas de corriente (esquina inferior izquierda) y por último la distribución de temperaturas normalizadas (esquina inferior derecha), esta distribución de resultados se mantendrá para los demás números de Rayleigh evaluados.

Como ya se había mencionado anteriormente, para el Rayleigh = 1000 el comportamiento del sistema es casi como si el problema solo tomara en cuenta la conducción, ya que en una solución donde solo exista la conducción, obtendríamos líneas isotermas verticales paralelas en todo el dominio, sin embargo, se empiezan a apreciar los efectos convectivos, aspecto que se amplifica según aumentamos el número de Rayleigh, como observamos en las figuras 4.8 - 4.10 respectivamente.

En las tablas 4.3 - 4.6, se realiza la comparación de los valores de Nusselt obtenidos por De Vahl Davis et al., Respecto a los obtenidos en el presente estudio, así como la desviación relativa porcentual para el Nusselt medio, mínimo y máximo obtenido, para los números de Rayleigh de 10^3 , 10^4 , 10^5 y 10^6 respectivamente.

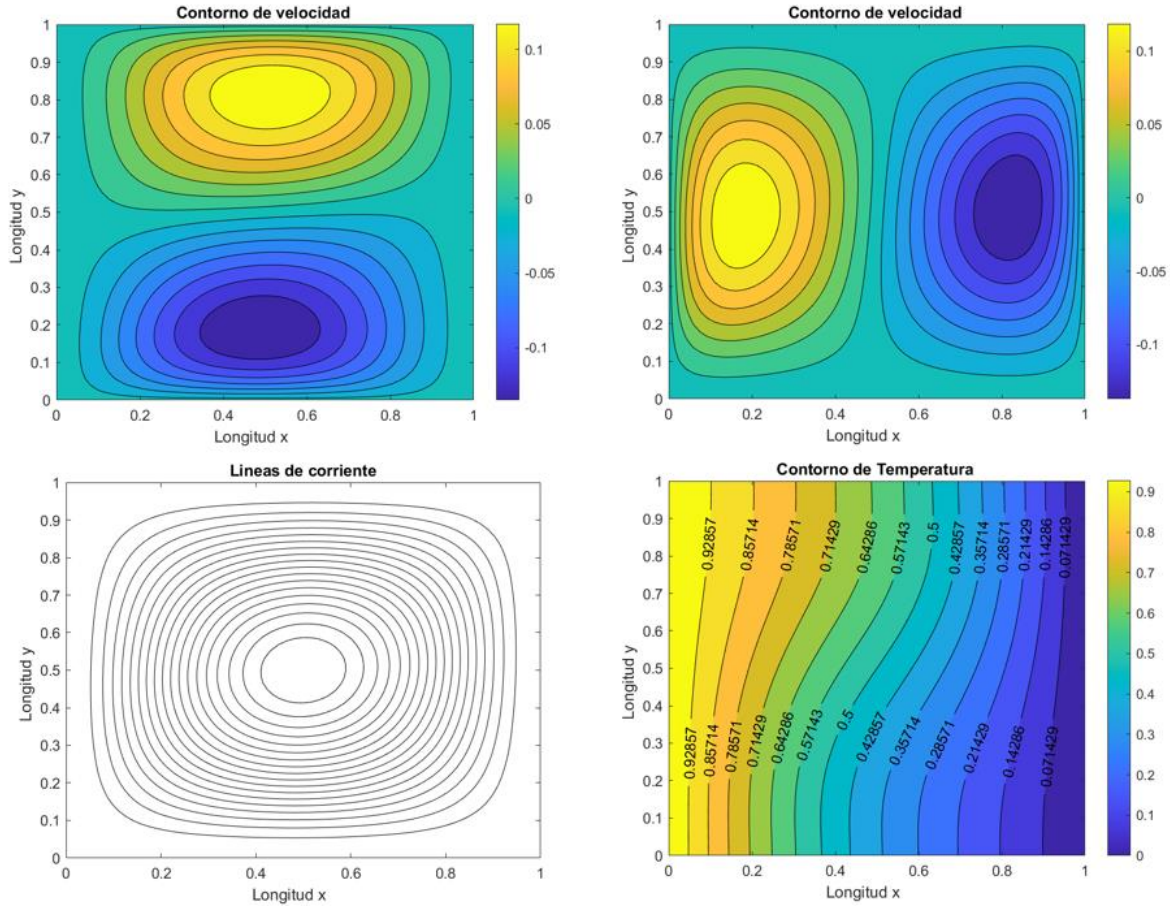


Figura 4.7. Contorno de velocidad horizontal “ u ”, contorno de velocidad vertical “ v ”, líneas de corriente y contorno de temperatura obtenido para un $Ra = 10^3$.

Tabla 4.3. Comparación cuantitativa para el número de Nusselt obtenido en el presente trabajo respecto a lo reportado por De Vahl Davis (1983) para un $Ra = 10^3$

$Ra=1 \times 10^3$			
	De Vahl Davis (1983)	Pte. Trabajo	Desviación (%)
Nu (medio)	1.1170	1.12573	0.78178
Nu (max)	1.5050	1.50888	0.25794
Nu (min)	0.6920	0.69890	0.99722

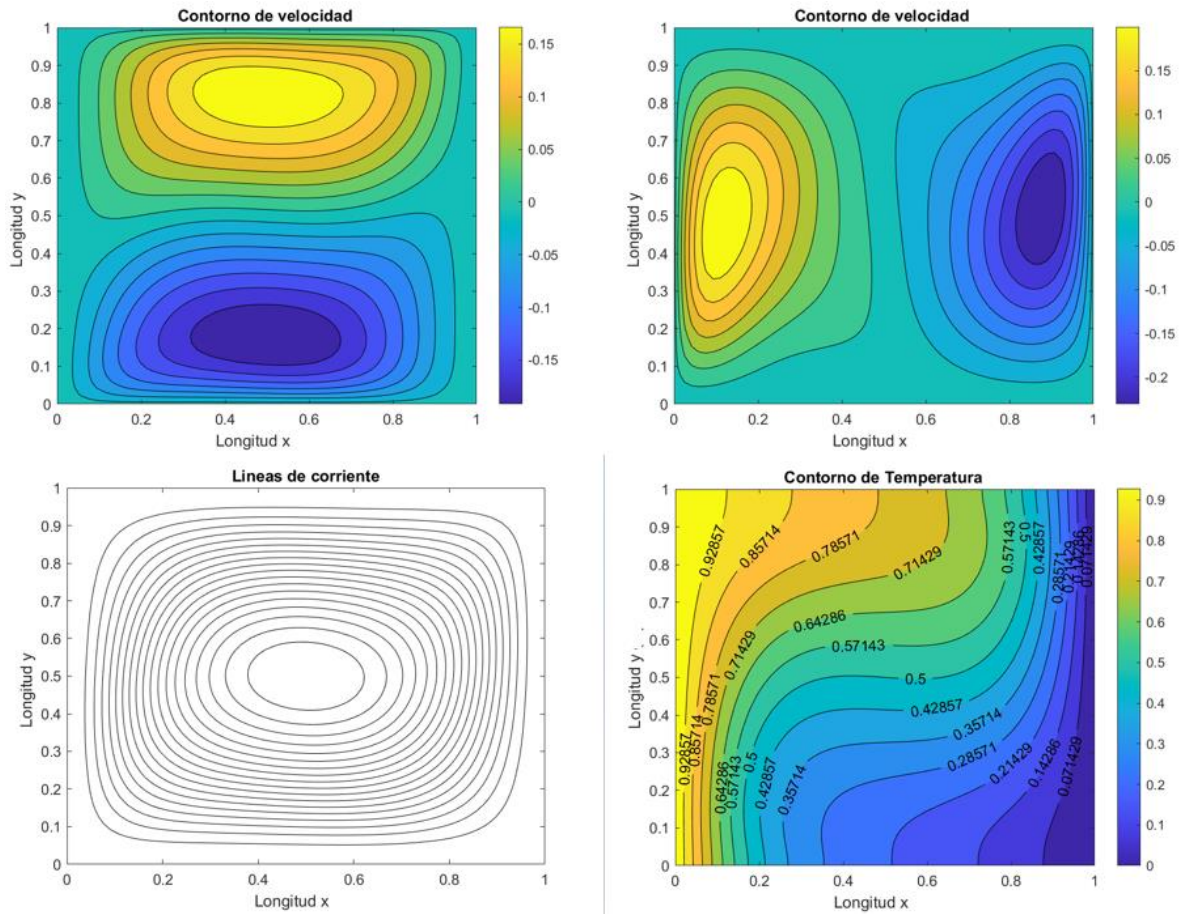


Figura 4.8. Contorno de velocidad horizontal “ u ”, contorno de velocidad vertical “ v ”, líneas de corriente y contorno de temperatura obtenido para un $Ra = 10^4$.

Tabla 4.4. Comparación cuantitativa para el número de Nusselt obtenido en el presente trabajo respecto a lo reportado por De Vahl Davis (1983) para un $Ra = 10^4$

Ra=1x10⁴			
	De Vahl Davis (1983)	Pte. Trabajo	Desviación (%)
Nu (medio)	2.2380	2.2611	1.0322
Nu (max)	3.5280	3.5522	0.6853
Nu (min)	0.5860	0.6004	2.4495

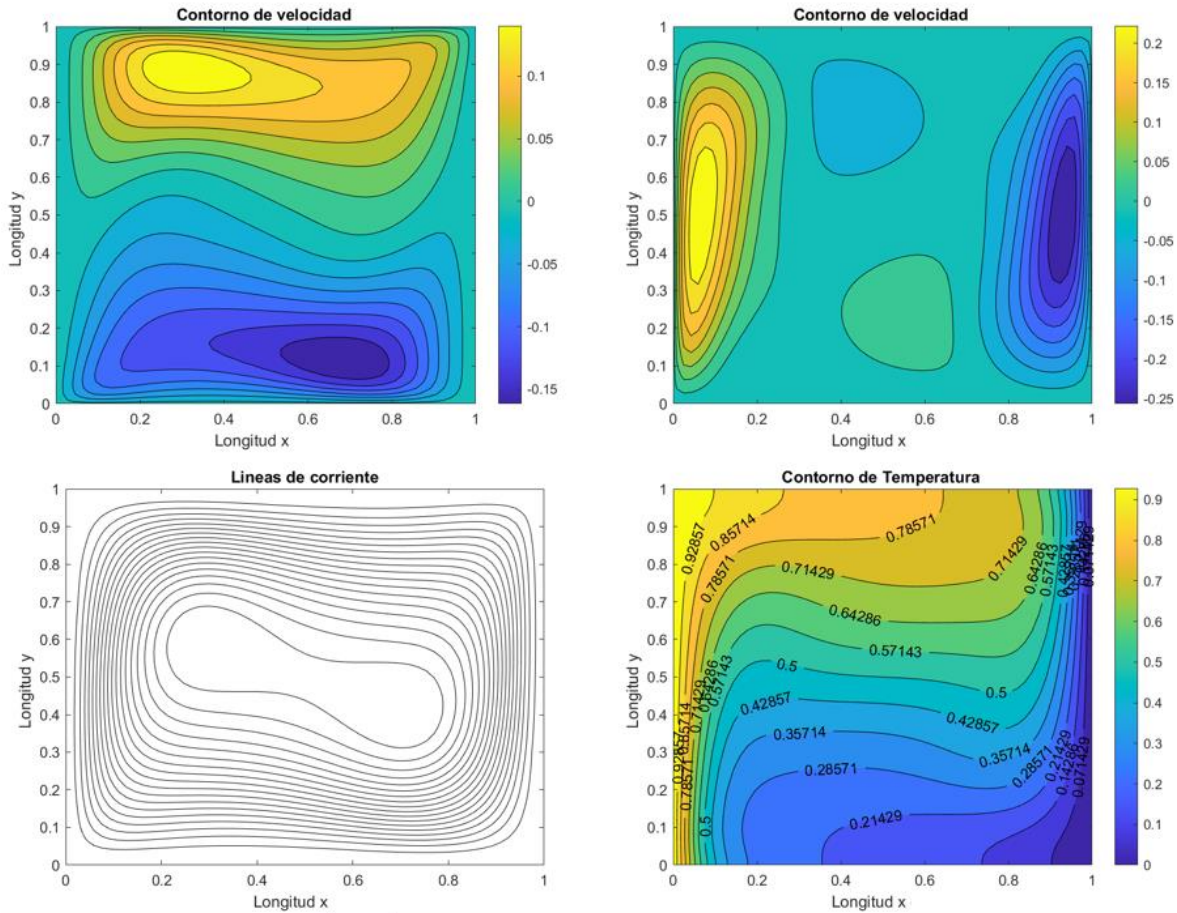


Figura 4.9. Contorno de velocidad horizontal “ u ”, contorno de velocidad vertical “ v ”, líneas de corriente y contorno de temperatura obtenido para un $Ra = 10^5$.

Tabla 4.5. Comparación cuantitativa para el número de Nusselt obtenido en el presente trabajo respecto a lo reportado por De Vahl Davis (1983) para un $Ra = 10^5$

$Ra=1 \times 10^5$			
	De Vahl Davis (1983)	Pte. Trabajo	Desviación (%)
Nu (medio)	4.5090	4.55447	1.00845
Nu (max)	7.7170	7.76525	0.62536
Nu (min)	0.7290	0.75892	4.10491

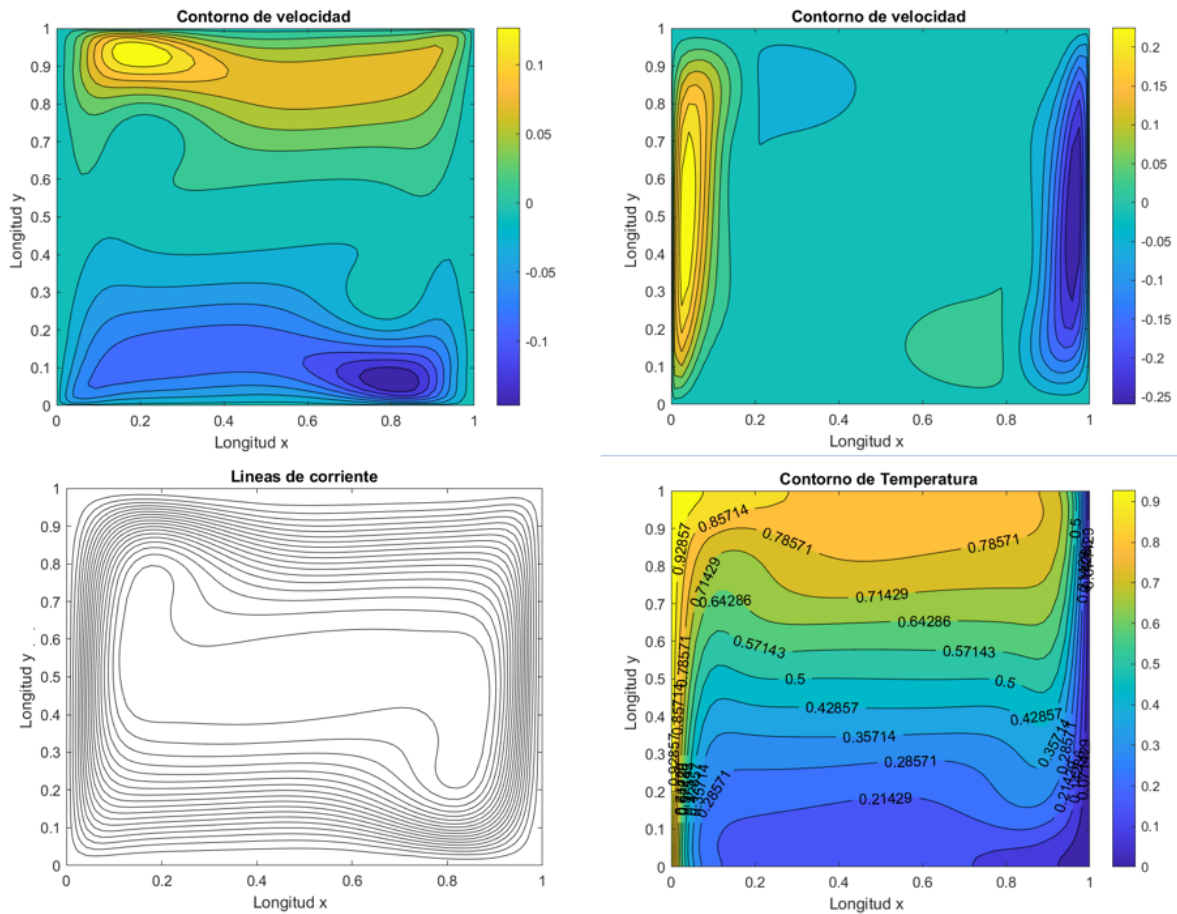


Figura 4.10. Contorno de velocidad horizontal “ u ”, contorno de velocidad vertical “ v ”, líneas de corriente y contorno de temperatura obtenido para un $Ra = 10^6$.

Tabla 4.6. Comparación cuantitativa para el número de Nusselt obtenido en el presente trabajo respecto a lo reportado por De Vahl Davis (1983) para un $Ra = 10^6$

Ra=1x10⁶			
	De Vahl Davis (1983)	Pte. Trabajo	Desviación (%)
Nu (medio)	8.8170	8.89842	0.92349
Nu (max)	17.9250	17.75767	0.93345
Nu (min)	0.9890	1.05562	6.73671

4.3 Flujo laminar en un canal rectangular con convección forzada

En este problema de verificación consiste en resolver el comportamiento de un fluido que fluye de manera forzada en régimen laminar en un canal rectangular, como el flujo teórico que se daría entre dos placas infinitamente largas en dirección “ z ”, para el máximo flujo pasible laminar (número de Reynolds = 2300), la figura 4.11, representa el modelo físico del problema, las dos placas paralelas tienen una distancia de separación “ H_y ” de y y una longitud horizontal “ H_x ” de 60 veces el diámetro hidráulico ($Dh = 2Hy$), para asegurar un flujo completamente desarrollado.

Adicionalmente, las placas se consideran isotermas ($T_w = 320\text{ K}$) y las velocidades en las paredes es igual a 0, los perfiles de temperatura y velocidad en la entrada del canal, asumiendo una temperatura de entrada de $T_{in} = 300\text{ K}$ y la velocidad de entrada se obtiene en función al número de Reynolds ($u_0 f(Re)$), para obtener las propiedades termofísicas del aire se usa la temperatura de referencia $T_0 = (T_w + T_{in})/2$. En la salida del sistema se presentan condiciones de frontera de segunda clase para todas las variables obtenidas.

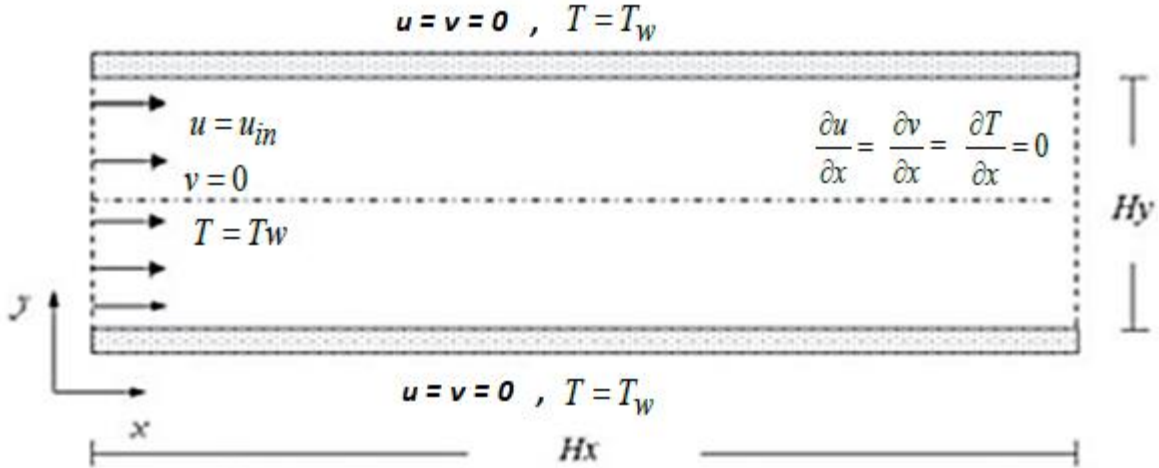


Figura 4.11. Modelo físico para un flujo laminar en un canal rectangular con convección forzada.

El modelo matemático para discretizar es representado por las ecuaciones (9, 10, 11 y 12) y es el mismo que se utilizó para el problema de verificación de Flujo laminar en una cavidad cuadrada con pared deslizante, solo que esta vez se adiciona la primera ley de la termodinámica (similar al que se modelará para el ICTA), solo que en una geometría rectangular y con condiciones de frontera distintas.

$$\left(\frac{\partial(\rho)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial u}{\partial y}\right) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \frac{\partial P}{\partial y} \quad (11)$$

$$\left(\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}\right)^* + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial y}\right) \quad (12)$$

A diferencia de los anteriores problemas de verificación, que se resolvieron para varios casos o situaciones de estudio, en este problema solo se reportan los resultados obtenidos por una solución analítica de este problema obtenido por Oosthuizen (1999), para el número de Reynolds de 2300, el modelo analítico obedece a la ecuación (159):

$$T(y) = 36 \frac{\mu u_{in}^2}{\lambda H_y^4} \left(\frac{1}{2} H_y^2 y^2 - \frac{2}{3} H_y y^3 + \frac{1}{3} y^4 \right) - \frac{6 \mu u_{in}^2}{\lambda H_y} (y + T_w) \quad (171)$$

Los resultados obtenidos por el modelado se comparan con los obtenidos por el modelo analítico en la tabla 4.7.

Tabla 4.7. Comparación cuantitativa entre los resultados obtenidos por el modelado numérico respecto a la solución analítica propuesta por Oosthuizen (1999)

Posición (y)	Resultado obtenido por la solución analítica, Oosthuizen (1999) [82] (K)	Pte. Trabajo (K)	Desviación (%)
0	320	320	0
0.01053	320	319.89	0.0344
0.03158	320	319.62	0.1187
0.05263	320	319.23	0.2406
0.07368	320	318.67	0.4156
0.09474	320	317.89	0.6594
0.11579	320	316.82	0.9938
0.13684	320	315.48	1.4125
0.15789	320	313.99	1.8781
0.17895	320	312.75	2.2656
0.2	320	312.25	2.4219
0.22105	320	312.75	2.2656
0.24211	320	313.99	1.8781
0.26316	320	315.48	1.4125
0.28421	320	316.82	0.9938
0.30526	320	317.89	0.6594
0.32632	320	318.67	0.4156
0.34737	320	319.23	0.2406
0.36842	320	319.62	0.1187
0.38947	320	319.89	0.0344
0.4	320	320	0
	Desviación % promedio		0.88
	Desviación % mínima		0
	Desviación % máxima		2.42

4.5 Análisis de independencia de malla para el ICTA

El análisis de independencia de malla consiste en determinar el número de volúmenes de control o nodos computacionales necesarios en el mallado del modelo físico, para que la solución del sistema deje de tener una fuerte dependencia de la cantidad de nodos utilizados, esto se hace al comparar los resultados obtenidos por el modelado para el mismo sistema con diferente número de nodos computacionales. Como ya se mencionó anteriormente, a mayor cantidad de nodos utilizados, los resultados se aproximan en mayor medida a la solución real de los fenómenos físicos involucrados en el sistema, debido a que la distancia entre nodos se va acortando, aproximándose cada vez más a la naturaleza continua de los modelos matemáticos antes de su discretización.

En la tabla 4.8 se muestran los parámetros y características del modelado del ICTA para el análisis de independencia de malla, para un caso hipotético de aplicación, en un suelo de textura limosa completamente seco y con las condiciones climatológicas correspondientes para el día 31 de diciembre del 2020 a las 11 horas en Cuernavaca, Morelos.

Tabla 4.8. Parámetros para el análisis de independencia de malla del ICTA

Tipo de dominio	Parámetros necesarios para el modelado	Valor
Suelo	Coeficiente de conductividad térmica (λ_{soil})	0.19 (W/m K)
	Calor específico ($C_{p_{soil}}$)	1165 (J/kg K)
	Densidad (ρ_{soil})	1500 (kg/m ³)
	Radiación solar incidente en la superficie (G_b)	680 (W/m ²)
	Emisividad (si no se conoce se tomará el valor de $\epsilon = 1$)	1
	Absortividad (si no se conoce se tomará un valor entre $(0.8 < \alpha \leq 1)$)	0.8
	Humedad relativa del suelo (Hum)	0 %
	Temperatura del suelo superficial promedio anual (T_{Anual})	26 (°C)
Aire	Régimen de flujo	Laminar ($0 < Re < 2300$)
	Número de Reynolds (Re)	1500
	Velocidad de entrada $V_{in} = f(Re)$	3.59×10^{-3} (m/s)
	Coeficiente de conductividad térmica (λ_{air})	0.0256 (W/m K)
	Calor específico a presión constante ($C_{p_{air}}$)	1004 (J/kg K)
	Densidad (ρ_{air})	1.2047 (kg/m ³)
	Viscosidad dinámica (μ)	1.817×10^{-5} (kg/ms)
	Velocidad de viento promedio mensual (V_{wind}), para el cálculo de "h _{conv} "	2.3 (m/s)
	Temperatura ambiente promedio mensual (T_{Amb})	5.8 (°C)
	Humedad relativa del aire (HR)	0.21
Aislante	Coeficiente de conductividad térmica (λ_{ins})	0.033 (W/m K)
	Calor específico a presión constante ($C_{p_{ins}}$)	1800 (J/kg K)
	Densidad (ρ_{ins})	28 (kg/m ³)

El mallado del modelo físico es de tipo estructurado ortogonal, donde todos los nodos internos tienen la misma cantidad de vecinos (4 nodos vecinos), el ordenamiento de estos es secuencial y el ángulo respecto a la posición superior inmediata y la posición lateral inmediata es siempre de 90°, las diferentes subdivisiones del dominio y dimensiones del ICTA se encuentran en la figura 2.8 del capítulo 2 “Modelo físico del ICTA” y tabla 4.9 respectivamente.

Tabla 4.9. Dimensiones utilizadas para el análisis e independencia de malla del ICTA

Dimensiones del ICTA	Valor
Altura total (Hy)	3.15 m.
Longitud total (Hx)	6.3 m.
Diámetro = Hy2 = Hx2 = Hx4 = D	0.15 m.
Hy1	2 m.
Hx3	5 m.
Hy3	1 m.
Hx1 = Hx5	0.5 m.
Espesor del aislante (e)	0.05 m.

Análisis de independencia de malla para el diámetro de la tubería del ICTA

El análisis se divide en 2 etapas, la primera consiste en determinar el número de nodos necesarios para la sección transversal por la que fluye el aire (diámetro de la tubería), la segunda etapa consiste en determinar el número de nodos para el espacio ocupado por la altura o profundidad de entierro y la longitud del recorrido horizontal de la tubería del ICTA, el número de nodos para los espacios ocupados por el suelo que envuelve de forma externa la tubería enterrada (Hy3, Hx1, Hx5) permanecerán fijos para un mallado más fino que los propuestos a ser evaluados. En la tabla 4.10 se muestra la distribución de nodos según su respectiva zona del dominio.

Tabla 4.10. Número de nodos distribuidos por sección del ICTA (Diámetro)

Dimensiones del ICTA	Número de nodos por zona
Diámetro = Hy2 = Hx2 = Hx4	57, 71, 87, 101, 117
Hy1	101 (Fijo temporalmente)
Hx3	101 (Fijo temporalmente)
Hy3	41 (Fijo)
Hx1 = Hx5	16 (Fijo)

En la figura 2.8 del capítulo 2 “Modelo físico del ICTA” se pueden observar 2 líneas perpendiculares que se cruzan en el centro del modelo físico, las cuales representan una serie de posiciones nodales que serán utilizadas como referencia, para analizar la distribución de temperatura resultante para cada solución planteada y observar las diferencias existentes entre una solución y otra con un número diferente de nodos, los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.12, para la línea horizontal y vertical respectivamente, se nota la ubicación de la tubería

por las perturbaciones en forma de picos ubicadas donde ambas líneas (vertical y horizontal) pasan por la sección transversal de la tubería de intercambio de calor.

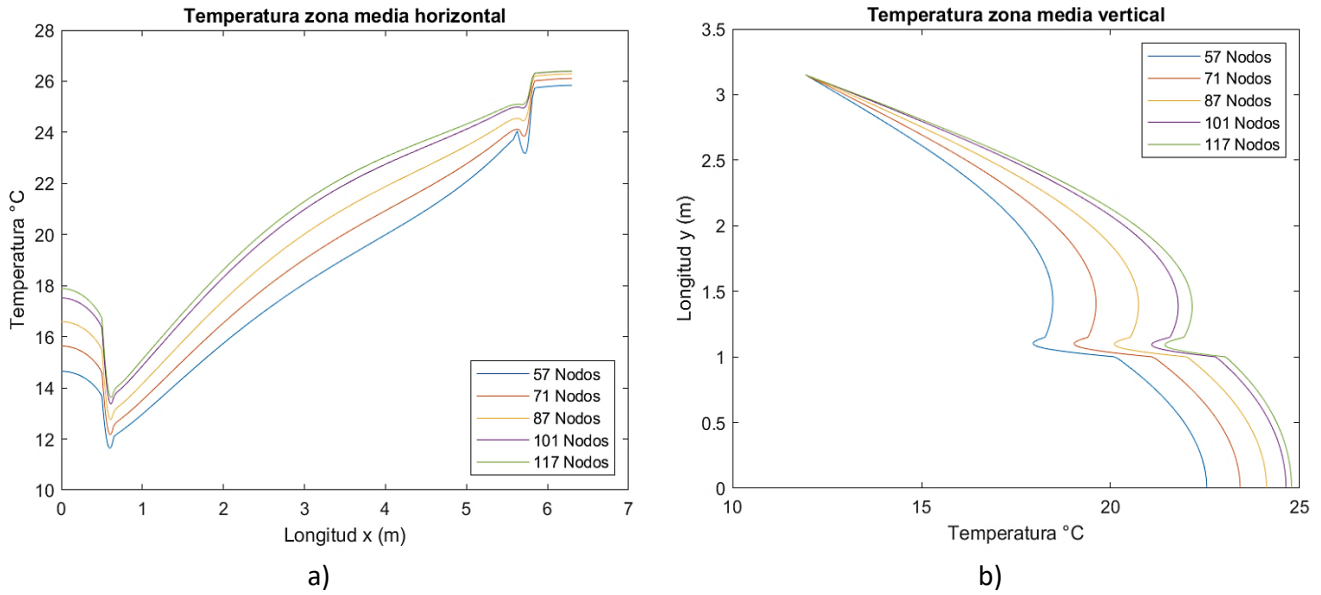


Figura 4.12. Distribución de temperatura según el número de nodos que ocupan el diámetro de la tubería a) para la horizontal ubicada a 1.575 m. de profundidad y b) para la vertical ubicada a 3.15 m. del recorrido horizontal del ICTA.

La distribución de temperatura en la salida del ICTA, así como las temperaturas en la zona de interfaz entre el aire y el material aislante en la horizontal ubicada a 1.575 m. de profundidad se presentan en la figura 4.13.

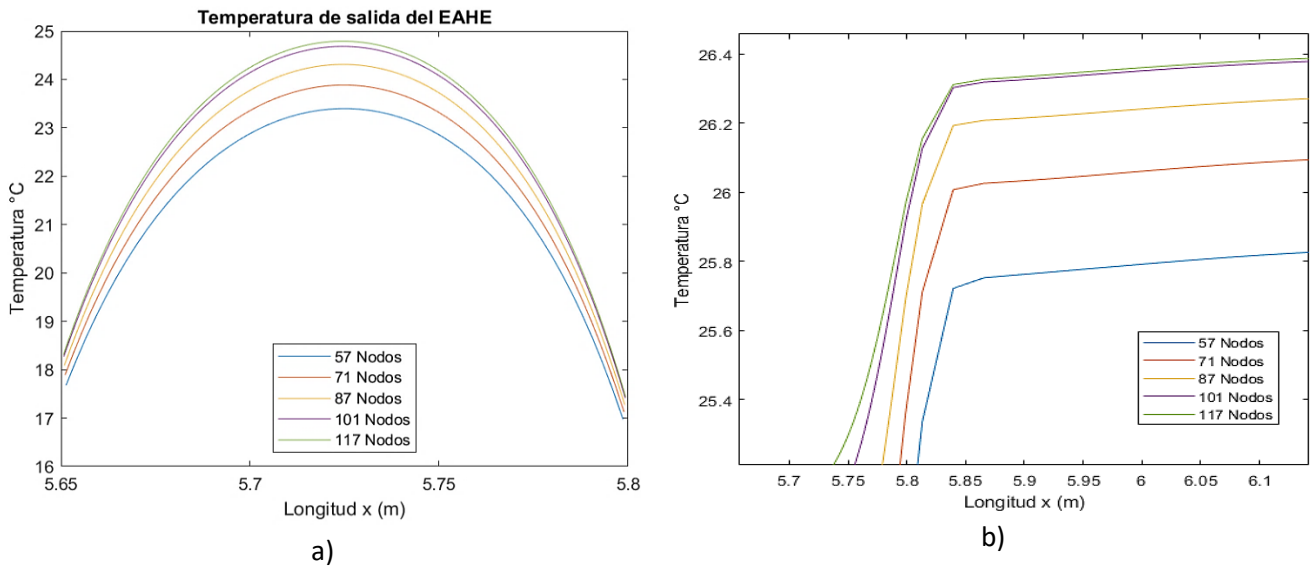


Figura 4.13. Distribución de temperatura según el número de nodos que ocupan el diámetro de la tubería a) en la salida del ICTA y b) en la interfaz aire-material aislante.

De manera cuantitativa, en la tabla 4.11 se muestra la resultante de temperatura promedio en la salida del ICTA y el respectivo tiempo de cómputo necesario para obtener la solución.

Tabla 4.11. Temperatura promedio en la salida del ICTA según el número de nodos para el diámetro y tiempo de cómputo (Procesador de 4 núcleos, 8 hilos de procesamiento a 3.7 Ghz)

Número de Nodos diámetro	Temperatura de salida promedio (°C)	Tiempo de cómputo (hr)
57	21.53	1.47
71	21.94	1.34
87	22.31	1.27
101	22.63	1.48
117	22.73	2.08

Debido a lo observado en las figuras 4.12, 4.13 y la tabla 4.14 se determinó que el número de nodos para el diámetro de la tubería será de 101 nodos, ya que es la solución que presenta menor diferencia respecto al resultado inmediato superior (con 117 nodos), además, el tiempo de cómputo adicional necesario para la solución con 117 nodos resulta considerablemente más elevado.

Análisis de independencia de malla longitudinal del ICTA

Una vez definido el número de nodos para el diámetro de la tubería, es necesario analizar el número de nodos adecuado para la longitud vertical y la longitud horizontal que recorre la tubería de intercambio de calor. Con la finalidad de reducir el tiempo de cómputo total para este análisis, el número de nodos distribuidos para el recorrido vertical y horizontal de la tubería, así como el suelo ocupado por este espacio, será evaluado al mismo tiempo, tomando en cuenta que la variación más pronunciada estará en el recorrido vertical, donde la temperatura del suelo cambia con la profundidad, mientras que para el recorrido horizontal la temperatura presenta menor variación y como la longitud del recorrido es 2.33 veces mayor que el recorrido vertical, se evaluará la solución para el mismo número de nodos para el espacio horizontal y el vertical, de tal forma que, la relación de aspecto del volumen de control para el suelo ubicado en la zona horizontal del recorrido será siempre de: $\Delta x = 2.33\Delta y$. En la tabla 4.12 se muestra la distribución de nodos para cada modelado.

Tabla 4.12. Número de nodos distribuidos por sección del ICTA (longitud horizontal y vertical)

Dimensiones del ICTA	Número de nodos por zona
Diámetro = Hy2 = Hx2 = Hx4	101 (Fijo)
Hy1	57, 71, 87, 101, 117
Hx3	57, 71, 87, 101, 117
Hy3	41 (Fijo)
Hx1 = Hx5	16 (Fijo)

De forma análoga, para el análisis del número de nodos diametral, los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.14, para la línea horizontal y vertical respectivamente.

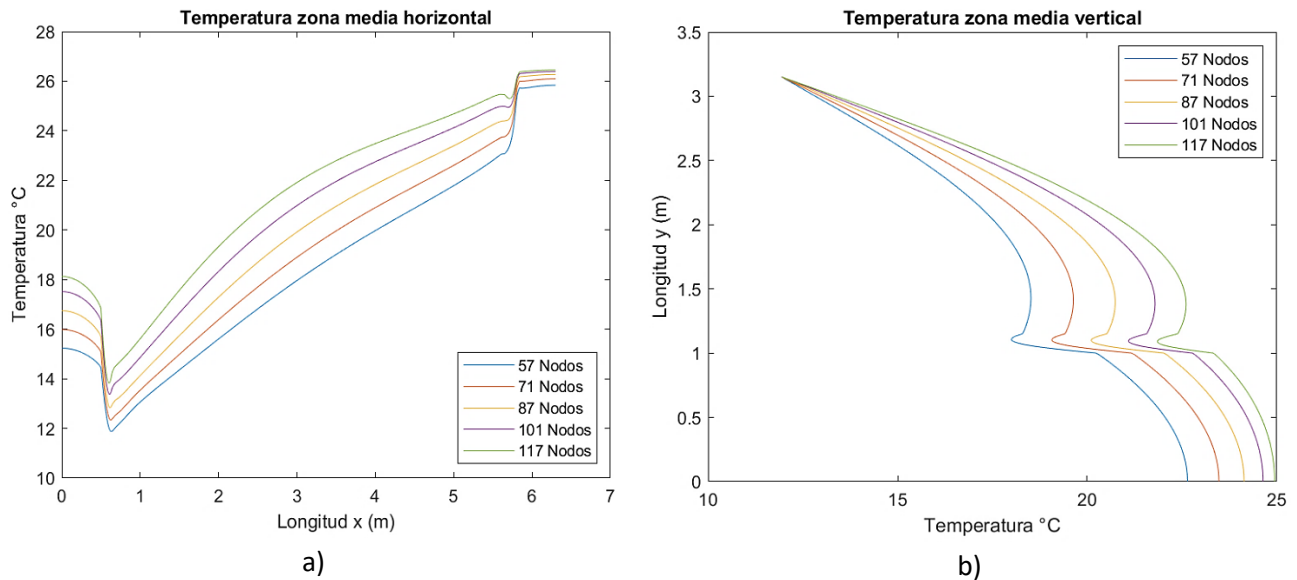


Figura 4.14. Distribución de temperatura según el número de nodos a) para la horizontal ubicada a 1.575 m. de profundidad y b) para la vertical ubicada a 3.15 m. del recorrido horizontal del ICTA.

En la figura 4.15 se muestra la variación de temperatura en la zona más profunda del ICTA y la temperatura de salida según el número de nodos respectivamente.

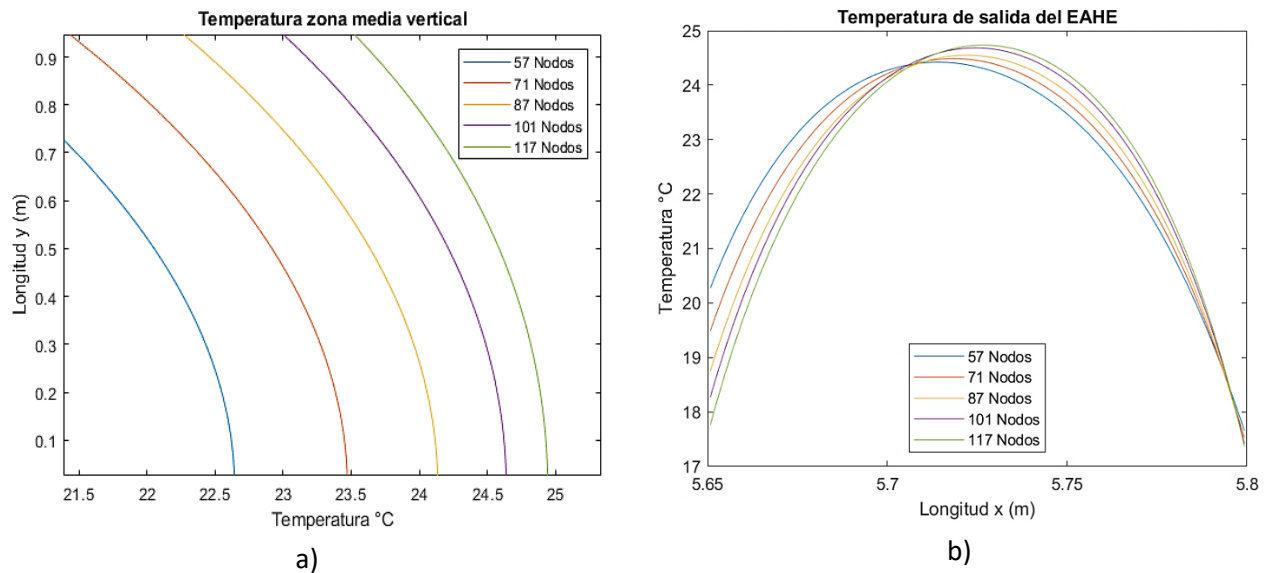


Figura 4.15. Distribución de temperatura según el número de nodos a) para la zona más profunda ubicada a 3.15 m del recorrido horizontal y b) distribución de temperatura en la salida del ICTA.

La tabla 4.13 muestra la variación entre la temperatura de salida y el respectivo tiempo de cómputo para el modelado según el número de nodos utilizados para este análisis.

Tabla 4.13. Temperatura promedio en la salida del ICTA según el número de nodos longitudinal del ICTA y tiempo de cómputo (Procesador de 4 núcleos, 8 hilos de procesamiento a 3.7 Ghz)

Número de nodos (NH*NL)	Temperatura de salida promedio (°C)	Tiempo de cómputo (h)
57 x 57	22.69	1.20
71 x 71	22.65	1.37
87 x 87	22.60	1.42
101 x 101	22.63	1.49
117 x 117	22.59	1.67

Debido a lo observado se tomó la decisión de utilizar la distribución de 101 x 101 nodos para la malla ocupada por el espacio evaluado, ya que la variabilidad en el promedio de temperatura de salida resulta despreciable con un valor promedio de 0.04 °C, sin embargo, en la distribución de temperatura en el suelo observado en las figura 4.14 y 4.15 a) sucede algo similar a lo ocurrido en el análisis del número de nodos para el diámetro, la distribución de 101 x 101 (línea morada) tiene la mayor proximidad respecto al modelado más fino próximo (117 x 117), si se toma en cuenta el mayor tiempo de cómputo y la poca variación en la temperatura de salida, la solución con 101 x 101 nodos resulta suficientemente adecuada para el modelado. En la figura 4.16 y la tabla 4.14, se presenta el mallado y la distribución de nodos para un ICTA de dimensiones 2 x 5 m, con una distribución de 81 405 nodos computacionales.

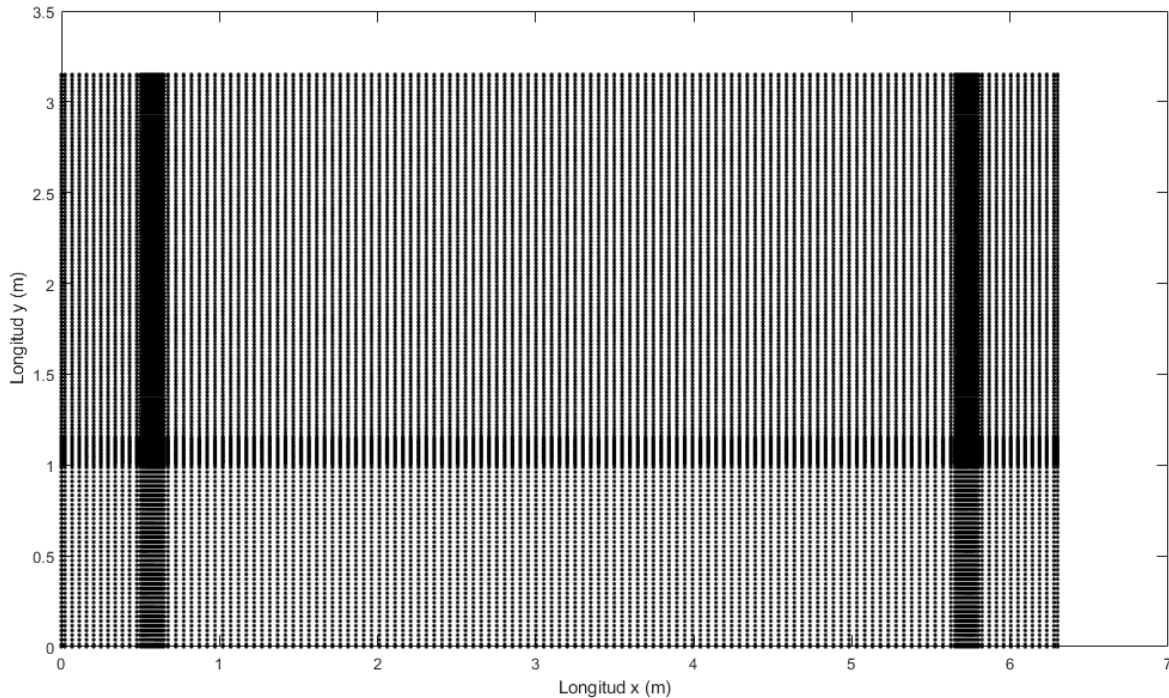


Figura 4.16. Distribución de nodos ocupando el espacio del modelo físico, malla computacional.

Tabla 4.14. Número de nodos distribuidos por sección del ICTA

Dimensiones del ICTA	Número de nodos por zona
Diámetro = Hy2 = Hx2 = Hx4	101
Hy1	101
Hx3	101
Hy3	41
Hx1 = Hx5	16
Total, NY	243
Total, NX	335
Número de nodos totales (NX*NY)	81 405

4.6 Comparación de modelos para la distribución de inicial de temperatura del suelo para el ICTA

Una vez definidas las distancias internodales para el dominio computacional del ICTA, con el análisis de independencia de malla, es posible probar diferentes condiciones de operación, condiciones de frontera y particularmente, la distribución inicial de temperatura del suelo, existen en la literatura desde mediciones experimentales hasta modelos analíticos para la distribución de temperatura del suelo según su profundidad, la idea es encontrar un modelo que sea generalizable para todos los días del año.

En este apartado se va a comparar el resultado obtenido para el ICTA con la distribución inicial de temperatura del suelo con 2 modelos, un modelo obtenido a partir de mediciones experimentales para verano (Mario Cúnsulo et al. 2019) [83], respecto a un modelo propuesto por Morland (1978), Labs (1979), Kusuda y Saitoh (1980), modificado por Givoni Baruch (1994) y utilizado por Mohamed Derradji y Messaoud Aiche en 2014 para la distribución de temperatura del suelo según su profundidad [84 ,85].

El primer modelo para la distribución inicial de la temperatura del suelo del ICTA, se obtuvo gracias a las mediciones experimentales de los promedios horarios de temperatura del suelo a distintas profundidades, reportadas por Mario Cúnsulo et. al. (2019), mediciones obtenidas durante el verano del área metropolitana de San Juan, en el complejo universitario de Islas Malvinas Argentina como se muestra en la figura 4.17.

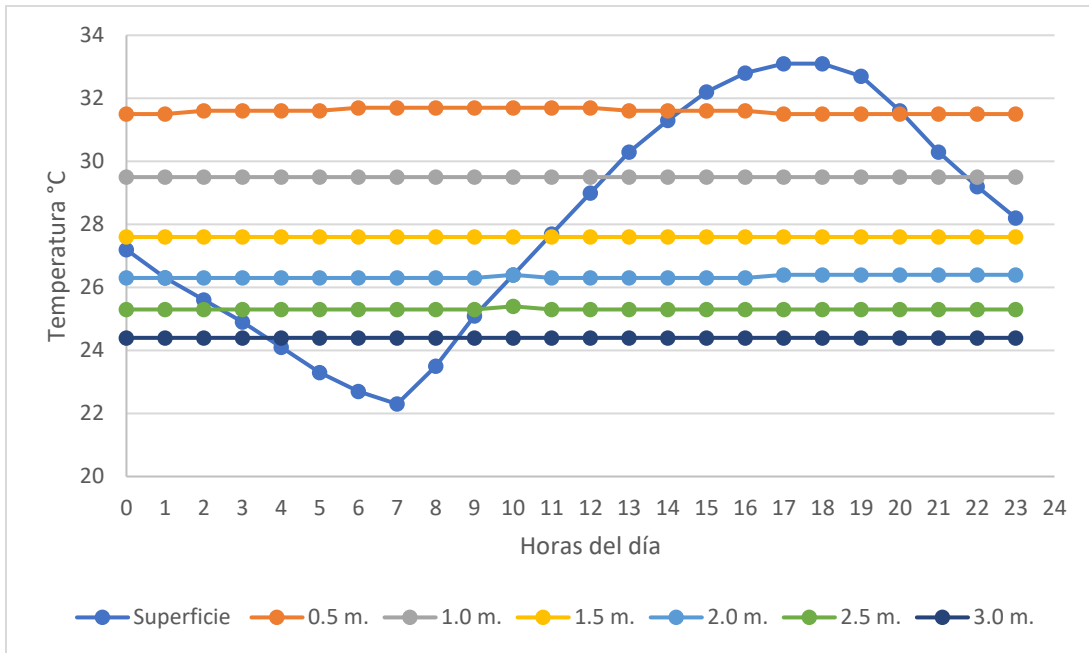


Figura 4.17. Temperatura del suelo a distintas profundidades [83].

La distribución inicial de temperatura del suelo quedó definida por las ecuaciones (172 -174) obtenido a partir de mediciones experimentales de temperatura del suelo según su profundidad reportadas por Mario Cúnsulo et. al. 2019.

$$T = T_{SUP} \quad \text{para profundidad de } (0m < y < 0.15m) \quad (172)$$

$$T = C1(y) + C2 \quad \text{para profundidad de } (0.15m < y < 0.65m) \quad (173)$$

$$T = 0.6857(y^2) + 1.1371(y) + 24.457 \quad \text{para profundidad de } (0.65m < y < 3.15m) \quad (174)$$

Donde:

T_{SUP} : Temperatura en la superficie del suelo, para el modelado se toma la temperatura promedio anual.

$C1$ y $C2$: Son coeficientes que se obtienen en función de T_{SUP} y de la temperatura fija a 0.65 m. de profundidad (para $T_{SUP} = 26^\circ\text{C}$, $C1 = -11.2$, $C2 = 59.6$)

Como se aprecia en la figura 4.17, las temperaturas a partir de una profundidad de 0.5 m. permanecen prácticamente constantes durante todo el día, solo la temperatura superficial presenta una considerable variación según la hora, es por esta razón que el modelo planteado se divide en 3 zonas según su profundidad, comenzando con una temperatura constante durante los primeros 15 cm con la finalidad de desprestigiar irregularidades en el terreno, para la profundidad comprendida entre 15 cm. y 65 cm. se realiza una aproximación lineal en función de la temperatura superficial y la temperatura reportada como constante por Mario Cúnsulo et al. (2019) a los 50 cm de profundidad, por último, para la variación de temperatura de los 65 cm. a los 3.15 m. de profundidad, se obtuvo el modelo polinomial (173), de tal forma que la distribución

inicial de temperatura según la profundidad en el dominio computacional, para este primer modelo basado en mediciones experimentales se reporta en la figura 4.18.

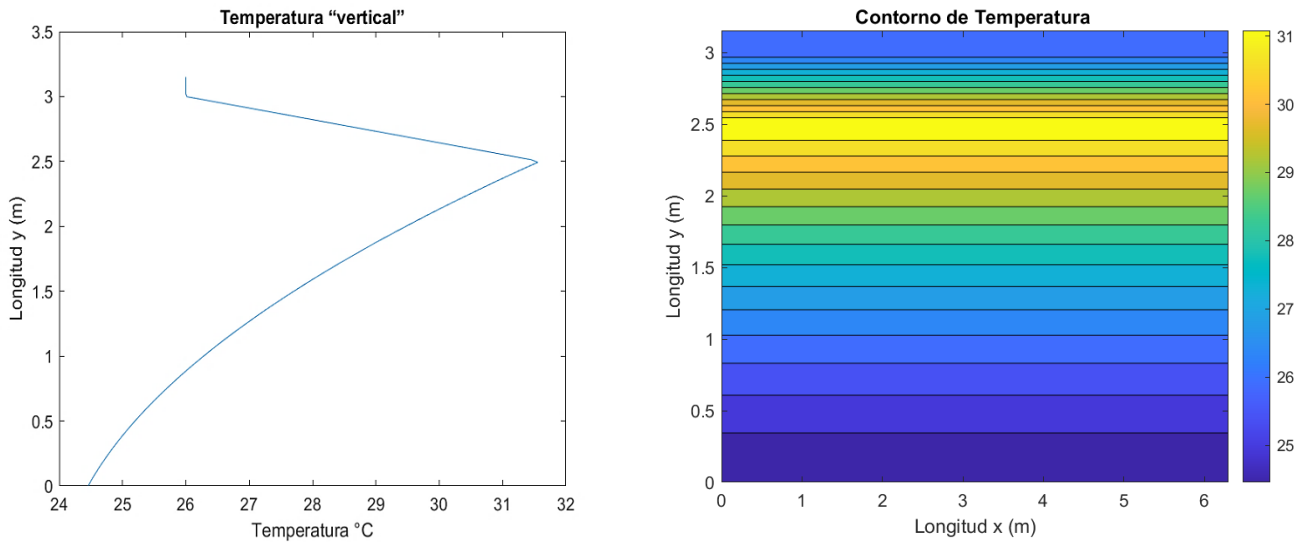


Figura 4.18. Distribución inicial de temperatura del suelo por el modelo obtenido de mediciones experimentales [83].

El segundo modelo, parte del original propuesto en la década de 1980 por Kusuda & Saito es [86]:

$$T_{z,t} = T_m - A_s \exp\left(-z \left(\frac{\pi}{365\alpha_s}\right)^{\frac{1}{2}}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{365}\left(t - t_0 - \frac{z}{2}\left(\frac{365}{\pi\alpha_s}\right)^{\frac{1}{2}}\right)\right) \quad (175)$$

Donde:

$T_{z,t}$: Temperatura del suelo a profundidad "z" y el día "t".

T_m : Temperatura promedio anual del suelo superficial.

A_s : Amplitud anual de temperatura superficial del suelo.

t: Periodo del año en días.

t_0 : Temperatura superficial mínima.

α_s : Difusividad térmica del suelo.

El modelo (175) fue utilizado en 2015 por Trilok S. Bisionya para evaluar la transferencia de calor y las dimensiones para el diseño de un ICTA [87].

El modelo propuesto por Kusuda & Saito fue modificado por Givoni Baruch en 1994 por la dificultad de encontrar el dato de Amplitud anual de temperatura superficial del suelo, y la Constante de difusividad térmica, como:

$$T_{z,N} = T + \exp(-F z) \text{sen}((0.986 N) - 125 - (L z)) \quad (176)$$

Donde:

$T_{z,N}$: Temperatura del suelo a profundidad “z” y el día “N” ($0 < N < 365$).

T : Temperatura promedio anual del suelo superficial.

F : Factor de amortiguamiento, depende del clima y tipo de suelo (ver tabla 4.15).

L : Retraso temporal por metro de profundidad (días), depende del clima y tipo de suelo (ver tabla 4.16)

0.986: Cantidad numérica que expresa los Días del año en grados ($360/365$)

N : Número de día (para el primero de enero $N=1$)

125: Representa el día con la mayor temperatura del suelo superficial del año (25 de abril)

Tabla 4.15. Factor de amortiguamiento (F) para diferentes climas y tipos de suelo [85]

Clima	Arcilla	Limo	Arena
Desértico	0.45	0.50	0.55
Árido	0.40	0.45	0.50
Intermedio	0.35	0.40	0.45
Húmedo	0.25	0.35	0.40
Mojado	0.20	0.30	0.35

Tabla 4.16. Retraso temporal (L) para diferentes climas y tipos de suelo [85]

Clima	Arcilla	Limo	Arena
Desértico	24	25	26
Árido	22.5	23.5	24.5
Intermedio	21	22	23
Húmedo	19.5	20.5	21.5
Mojado	18	19	20

En el año 2014 Mohamed Derradji y Messaoud Aiche utilizaron el modelo modificado por Givoni Baruch (176) para determinar la temperatura del suelo según su profundidad para el entierro de ductos de enfriamiento utilizados para el acoplamiento de chimeneas solares, con la finalidad de enfriamiento de edificaciones [85].

Al evaluar el modelo (176) para un suelo limoso con clima intermedio (según las tablas 4.15 y 4.16) en el dominio del ICTA se obtiene la distribución de temperatura del suelo presentada en la figura 4.19, en el lado derecho de la figura, se observa la variación de temperatura en el eje horizontal en función de la profundidad en el eje vertical, y del lado izquierdo de la figura 4.19, se añade la distribución de temperatura en forma de contorno de temperatura para todo el dominio computacional, los colores representan temperatura y dependen de la escala de color ubicada a la derecha.

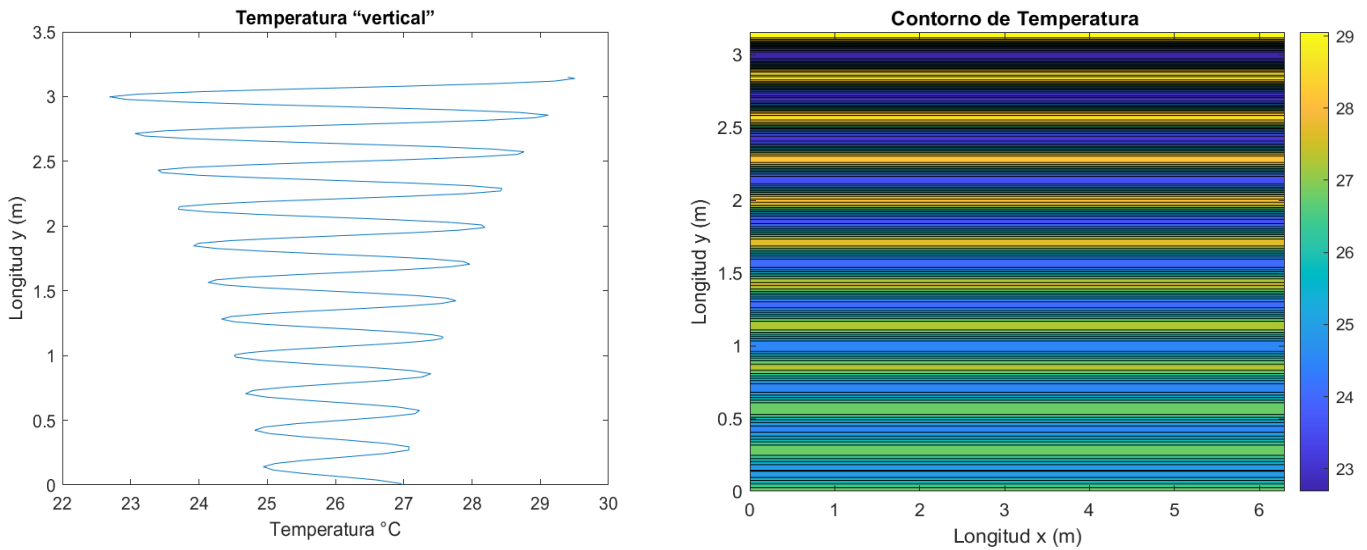


Figura 4.19. Distribución de temperatura inicial del suelo según el modelo analítico propuesto por Givoni Baruch en 1994 [84].

Se realizó el modelado del ICTA por duplicado para comparar los resultados obtenidos por ambos modelos, con las mismas condiciones de operación utilizadas para el análisis de independencia de malla presentadas en la tabla 4.8. En la figura 4.20 se muestra el resultado obtenido con la distribución inicial de temperatura del modelo basado en mediciones experimentales (172 - 174) respecto a la obtenida con el modelo propuesto por Givoni Baruch en 1994 (164), al igual que en el modelo físico presentado en la figura 2.8 del capítulo 2, la entrada (Izquierda) y salida (derecha) del aire se encuentran en la zona superior, en este caso a los 3.15 m.

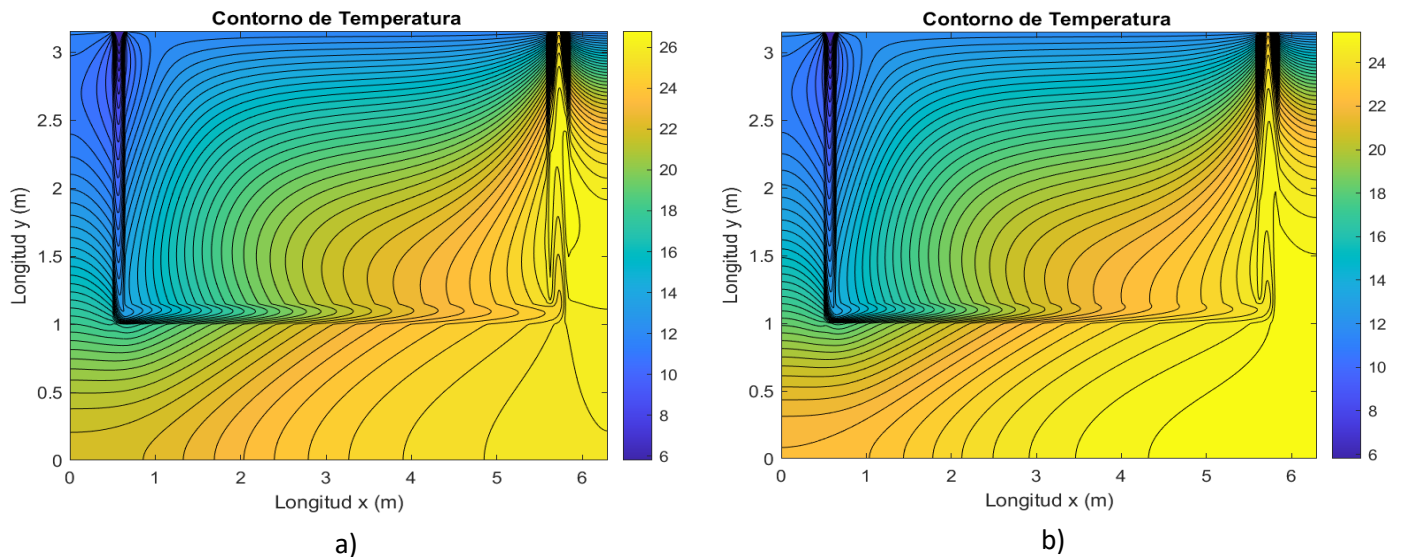


Figura 4.20. Distribución de temperatura resultante del ICTA con; a) la distribución inicial de temperatura del modelo basado en mediciones experimentales (172 - 174) y b) la distribución inicial de temperatura del modelo propuesto por Givoni Baruch en 1994 (176).

En la tabla 4.17 se presenta el valor obtenido por la temperatura promedio de salida para ambos casos.

Tabla 4.17. Temperatura promedio de salida según la distribución inicial de temperatura del suelo

Modelo utilizado para la distribución inicial de temperatura	Temperatura promedio de salida del ICTA (°C)	Diferencia (°C)
Modelo basado en mediciones experimentales	22.63	1.35
Modelo propuesto por Givoni Baruch en 1994	21.28	

De manera cualitativa no parece existir diferencia en el resultado final observado en la figura 4.20, pero se da una diferencia cuantitativa en la temperatura de salida entre ambos casos de 1.35°C, lo que implica que, se tiene una diferencia significativa según la distribución inicial de temperatura utilizada para el modelado, por lo que se concluye que es importante determinar una distribución inicial de temperatura según las condiciones en las que se desee evaluar el sistema.

Para los resultados obtenidos por esta investigación, se decidió utilizar el modelo (176), debido a que originalmente está planteado para el caso general, y según los autores, es posible utilizarlo para cualquier día del año, mientras que el modelo (172 - 174) se generó solo a partir de mediciones experimentales para un clima de verano en una determinada localidad de Argentina.

Se utiliza un modelo inicial de temperatura, debido a que en el primer paso para resolver el algoritmo SIMPLE o SIMPLEC, se requiere de una estimación inicial para todas las variables, aspecto que, según los resultados obtenidos al comparar 2 modelos para este propósito, no es trivial para la solución, además, si se inicia con una distribución de temperatura que se aproxima o corresponde con la realidad, se incrementa la estabilidad y tendencia a la convergencia.

4.7 Validación del código desarrollado para el ICTA

Independientemente del proceso de verificación para los fenómenos físicos involucrados en un ICTA, realizado con la finalidad de comprobar que los modelos matemáticos se están resolviendo de manera satisfactoria, y del proceso de independencia de malla, para que el código desarrollado sea considerado como válido en su conjunto, es necesario comparar los resultados obtenidos por el código, respecto a condiciones experimentales de operación de un ICTA real, a este proceso se le conoce como validación.

Para realizar la validación se solicitaron datos experimentales de 3 condiciones distintas de operación, dos ubicados en la zona sur de México y el último proveniente del país de Argelia.

Los primeros ICTA experimentales están ubicados en Villas universitarias Chetumal Quintana Roo Mex. [88], donde se instalaron e instrumentaron 2 ICTA, uno enterrado a 2 metros de profundidad y el otro a 1 metro (figura 4.21).



Profundidad	1 y 2 m
Longitud	6 m
Diámetro	6 in PVC
Espesor del aislante térmico	0.0508 m.
Tipo de suelo	Travertino limoso

Figura 4.21. Detalle de construcción de los ICTA en Villas universitarias Chetumal Quintana Roo y dimensiones de construcción [88].

En la tabla 4.18 se muestran las condiciones climatológicas de operación proporcionadas por el autor, utilizadas también para la modelación numérica del día 30 de julio del 2016.

Tabla 4.18. Condiciones de operación del ICTA, Chetumal Quintana Roo (30/julio/2016) [88]

Hora del día	Irradiancia solar (W/m ²)	Humedad relativa aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura ambiental (°C)
1	0	84.17	4.02	28.72
2	0	83.83	3.65	28.63
3	0	82.83	3.27	28.73
4	0	82.5	3.52	28.68
5	0	84	3.27	28.6
6	0	83.5	3.6	28.58
7	4.67	83.83	3.35	28.43
8	105.83	83.33	3.27	28.73
9	319.17	81.5	3.27	29.12
10	544.67	80	2.53	29.63
11	790.5	75.83	1.83	30.48
12	910.33	72.67	2.53	31.03
13	952.33	69.33	2.3	31.52
14	972	65.17	2.83	31.85
15	913.67	65.83	2.75	31.97
16	797	65.83	2.68	32.07
17	626.5	64.33	2.7	32.08
18	427.17	67.33	3.27	31.72
19	195.17	73.67	4.1	30.52
20	13.83	78	2.97	29.77
21	0	91.25	2.2	28.74
22	0	93.59	2.72	29.3
23	0	93.56	3.1	28.94
24	0	93.5	2.69	28.24

Los resultados de la modelación y el error relativo porcentual obtenido respecto a la temperatura de salida del ICTA experimental enterrados a 2 y 1 metro de profundidad respectivamente se muestran en la tabla 4.19 y 4.20.

Tabla 4.19. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (2 metros de profundidad)

2 metros de profundidad (30/julio/2016)					
Hora del día	Temp. de salida exp (°C)	Temp. de salida Re = 500* (°C)	Error relativo (%) Re = 500*	Temp. de salida Re = 100* (°C)	Error relativo (%) Re = 100*
1	28.95	27.3	5.7	26.05	10.02
2	28.95	27.2	6.04	25.95	10.36
3	28.99	27.2	6.17	25.86	10.8
4	28.95	27.16	6.18	25.84	10.74
5	28.92	27.16	6.09	25.9	10.44
6	28.91	27.14	6.12	25.89	10.45
7	28.86	27.05	6.27	25.85	10.43
8	29.04	27.6	4.96	26.61	8.37
9	29.47	28.54	3.16	27.93	5.23
10	30.03	29.53	1.67	30.06	-0.1
11	30.91	32.68	-5.73	33.39	-8.02
12	30.94	32.22	-4.14	32.76	-5.88
13	31.76	32.87	-3.49	33.48	-5.42
14	31.5	32.35	-2.7	32.3	-2.54
15	31.41	32.32	-2.9	32.14	-2.32
16	31.37	31.97	-1.91	31.46	-0.29
17	31.03	31.18	-0.48	30.08	3.06
18	30.74	30.06	2.21	28.42	7.55
19	30.27	28.65	5.35	26.96	10.93
20	29.79	27.74	6.88	26	12.72
21	25.39	27.51	-8.35	26.44	-4.14
22	25.53	28.09	-10.03	26.99	-5.72
23	26.48	27.85	-5.17	26.88	-1.51
24	27.93	27.3	2.26	26.49	5.16
		Error Prom.	4.75	Error Prom.	6.76
		Error mínimo	1.67	Error mínimo	-0.1
		Error máximo	-10.03	Error máximo	12.72

**Nota: El número de Reynolds de 500 hace referencia a la velocidad máxima que es posible modelar según los criterios de convergencia actuales, los autores no realizaron mediciones del flujo volumétrico o velocidad de operación. El Re de 100 se utilizó con fines comparativos. El Re de 315 se utilizó en el ICTA de 1 metro de profundidad, debido a que dicha longitud no permite que el flujo se desarrolle y el código da problemas de convergencia para flujos mayores.*

Tabla 4.20. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (1 metro de profundidad)

1 metro de profundidad (30/julio/2016)					
Hora del día	Temp. De salida exp (°C)	Temp. De salida Re = 315* (°C)	Error relativo (%) Re = 315*	Temp. De salida Re = 100* (°C)	Error relativo (%) Re = 100*
1	28.66	26.62	7.12	25.73	10.22
2	28.68	26.48	7.67	25.6	10.74
3	28.72	26.43	7.97	25.48	11.28
4	28.68	26.39	7.98	25.45	11.26
5	28.65	26.43	7.75	25.54	10.86
6	28.64	26.44	7.68	25.52	10.89
7	28.58	26.32	7.91	25.47	10.88
8	28.78	27.15	5.66	26.44	8.13
9	29.36	28.65	2.42	28.26	3.75
10	29.88	31.03	-3.85	31.2	-4.42
11	30.74	34.74	-13.01	35.82	-16.53
12	31.25	34.26	-9.63	34.93	-11.78
13	31.51	35.16	-11.58	35.92	-14
14	31.55	34.05	-7.92	34.29	-8.68
15	31.73	33.92	-6.9	34.06	-7.34
16	31.67	33.25	-4.99	33.12	-4.58
17	31.18	31.82	-2.05	31.21	-0.1
18	30.74	29.99	2.44	28.92	5.92
19	30.25	28.08	7.17	26.91	11.04
20	29.7	26.86	9.56	25.74	13.33
21	26.86	26.98	-0.45	26.21	2.42
22	27.28	27.73	-1.65	26.96	1.17
23	27.44	27.5	-0.22	26.81	2.3
24	27.07	26.87	0.74	26.29	2.88
		Error Prom.	6.01	Error Prom.	8.1
		Error mínimo	-0.22	Error mínimo	-0.1
		Error máximo	-13.01	Error máximo	-16.53

El error relativo porcentual se calcula como:

$$Error\ relativo\ \% = \frac{(Temperatura\ experimental - Temperatura\ modelada) * 100}{Temperatura\ experimental} \quad (177)$$

El error promedio:

$$Error\ relativo\ \% \text{ promedio} = \frac{\sum_1^{24} |Error\ relativo\ \%|}{24} \quad (178)$$

Los resultados reportados en las tablas 4.19 y 4.20 se presentan de forma gráfica en las figuras 4.22 y 4.23 respectivamente, el flujo correspondiente a un número de Reynolds de 500 es igual al utilizado durante el experimento, mientras que el número de Reynolds de 100 se utilizó con fines comparativos.

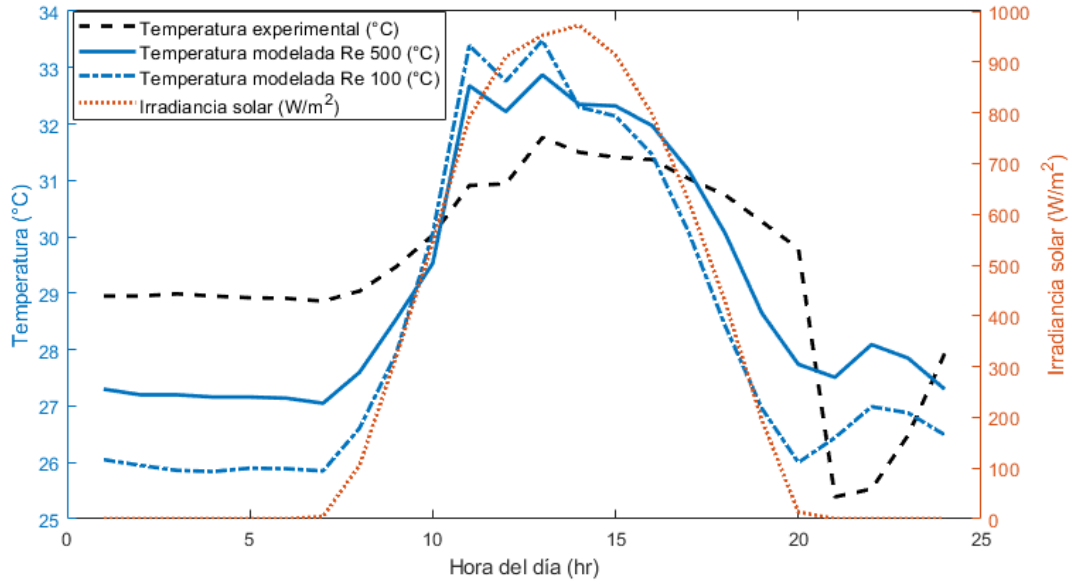


Figura 4.22. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada del ICTA ubicado en Villas universitarias Chetumal Quintana Roo (2 metros de profundidad).

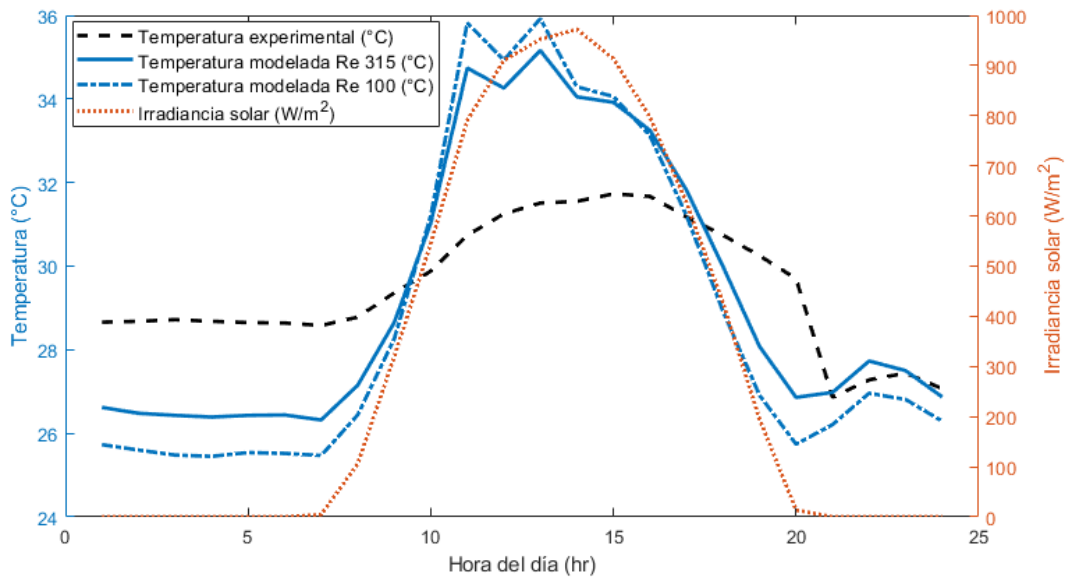


Figura 4.23. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada del ICTA ubicado en Villas universitarias Chetumal Quintana Roo (1 metro de profundidad).

El segundo ICTA del que se obtuvieron datos experimentales está ubicado dentro de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco México, resultados que fueron publicados por H.P. Díaz-Hernández et al. en el año 2020 (figura 4.24) [62].

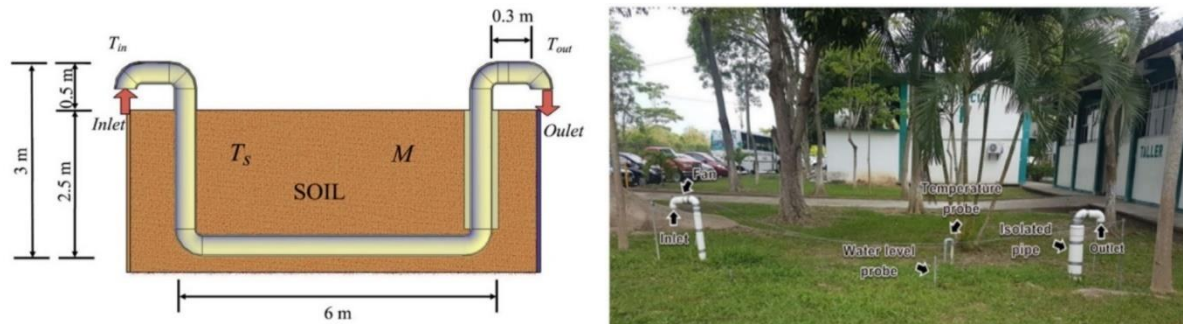


Figura 4.24. Esquema, dimensiones y fotografía del ICTA instalado en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco [62].

En las tablas 4.21 y 4.22 se muestran las condiciones climatológicas de operación para los días 01/agosto/2017 y 01/octubre/2017 respectivamente, días en los que los autores realizaron mediciones experimentales del ICTA instalado, se utilizan 2 días en meses distintos con la finalidad de tener una mayor cantidad y variabilidad en los datos para el análisis y validación del código desarrollado.

Tabla 4.21. Condiciones de operación del ICTA instalado en la UJAT para el 01/agosto/2017

Hora del día	Irradiancia solar (W/m ²)	Humedad relativa aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura ambiental (°C)
0	0	97.06	3.23	25.33
1	0	97.12	3.11	25.12
2	0	96.94	2.9	24.95
3	0	96.88	2.53	24.76
4	0	97	2.1	24.54
5	0	97.06	1.74	24.3
6	66.41	95.44	1.96	24.88
7	228.45	91.12	1.82	26.12
8	457.86	82.12	1.44	28.04
9	607.73	75.94	1.37	29.26
10	644.21	72	1.78	30.19
11	800.17	69.56	2.49	30.87
12	844.73	68.19	3.19	31.29
13	857.77	67.56	3.8	31.46
14	686.88	68.06	4.33	31.4
15	566.92	69.94	4.6	31.01
16	360.83	74.44	4.41	30.28
17	156.27	81.88	3.72	29.11
18	20.32	88.94	3.11	27.59
19	0	91.69	3.13	26.87
20	0	93	3.28	26.58
21	0	95.06	3.01	26.19
22	0	96.94	2.66	25.8
23	0	98.56	2.34	25.38

Tabla 4.22. Condiciones de operación del ICTA instalado en la UJAT para el 01/octubre/2017

Hora del día	Irradiancia solar (W/m ²)	Humedad relativa aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura ambiental (°C)
0	0	95.88	1.99	25.3
1	0	95.81	1.94	25.19
2	0	95.88	1.93	25.09
3	0	95.81	1.96	25
4	0	95.81	1.87	24.91
5	0	95.38	1.71	24.86
6	40.19	95.12	1.36	25.29
7	150.5	92.25	1.47	26.78
8	332.31	88.31	1.76	27.58
9	490.17	84.75	1.72	28.43
10	642.16	79.06	1.53	29.17
11	631.87	76.81	1.04	29.67
12	622.98	74.25	1.49	30.36
13	644.04	72.88	1.84	30.88
14	534.37	72.88	1.69	30.88
15	369.2	74.56	2.69	30.65
16	181.69	79.75	3.66	29.81
17	41.41	87.75	3.8	28.32
18	0	93.06	3.68	26.98
19	0	94.44	3.96	26.56
20	0	95.12	4.16	26.39
21	0	95.5	4.4	26.36
22	0	95.88	4.57	26.42
23	0	96.12	4.73	26.48

Los resultados obtenidos por la modelación numérica CFD, se comparan con las mediciones experimentales obtenidas por H.P. Díaz-Hernández et al. (2020) en las tablas 4.23 y 4.24 respectivamente para las 24 horas de los 2 días anteriormente mencionados, el error relativo porcentual y el promedio se calculan con las ecuaciones (177, 178).

Los resultados y comparación entre la medición experimental y el resultado obtenido por el modelado CFD se presentan de forma gráfica en las figuras 4.25 y 4.26 respectivamente.

Tabla 4.23. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (01/Agosto/2017)

Hora del día	Temp. De salida exp (°C)	Temp. De salida Re = 500* (°C)	Error relativo (%) Re = 500*	Temp. De salida Re = 100* (°C)	Error relativo (%) Re = 100*
0	27.95	26.19	6.3	25.44	8.98
1	26.03	26.13	-0.38	25.34	2.65
2	26.12	26.06	0.23	25.21	3.48
3	26.12	25.98	0.55	25.06	4.07
4	26.3	25.88	1.58	24.87	5.42
5	26.18	25.77	1.55	24.66	5.79
6	26.08	26.16	-0.29	25.51	2.2
7	26.02	27.01	-3.81	27.4	-5.31
8	26.89	28.4	-5.63	30.55	-13.62
9	27.8	29.29	-5.34	32.56	-17.11
10	28.74	29.15	-1.41	31.85	-10.8
11	30.97	29.24	5.58	31.83	-2.78
12	29.84	29.03	2.72	31.1	-4.22
13	30.21	28.82	4.61	30.48	-0.89
14	30.83	28.33	8.11	29.14	5.48
15	30.82	28.01	9.12	28.42	7.79
16	31.04	27.61	11.06	27.59	11.12
17	30.65	27.18	11.31	26.82	12.49
18	31.43	26.65	15.2	25.91	17.55
19	29.82	26.48	11.21	25.69	13.86
20	28.91	26.44	8.56	25.69	11.15
21	28.55	26.38	7.59	25.65	10.15
22	28.4	26.3	7.39	25.56	9.99
23	28.21	26.2	7.12	25.44	9.81
		Error Prom.	5.69	Error Prom.	8.2
		Error mínimo	0.23	Error mínimo	-0.89
		Error máximo	15.2	Error máximo	17.55

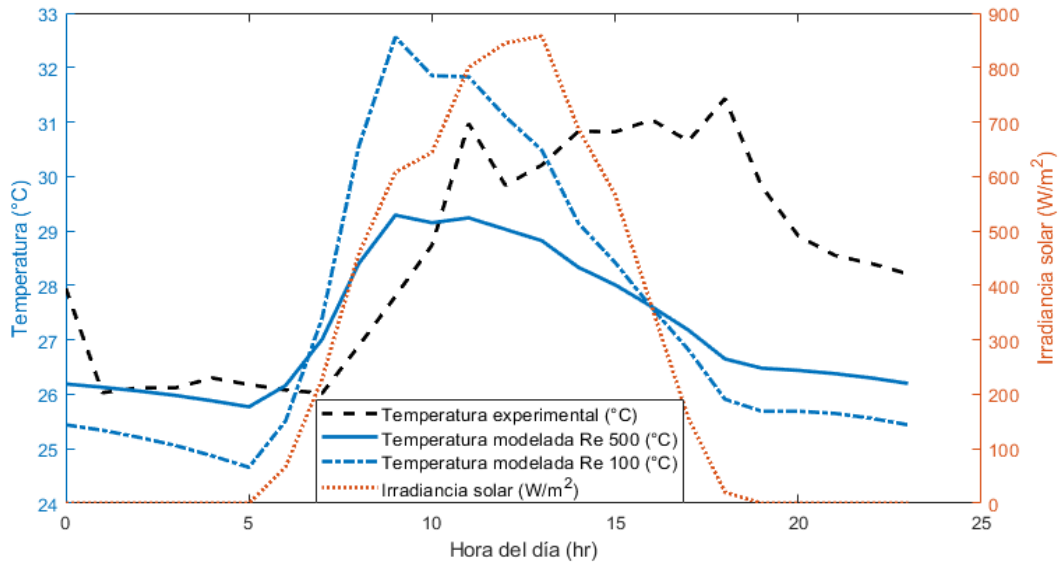


Figura 4.25. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada del ICTA ubicado en la UJAT para el día (01/Agosto/2017).

Tabla 4.24. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (01/Octubre/2017)

Hora del día	Temp. De salida exp (°C)	Temp. De salida Re = 500* (°C)	Error relativo (%) Re = 500*	Temp. De salida Re = 100* (°C)	Error relativo (%) Re = 100*
0	27.08	26.11	3.57	25.12	7.23
1	26.96	26.07	3.29	25.05	7.07
2	26.9	26.04	3.19	25	7.06
3	26.75	26.01	2.76	24.97	6.65
4	26.57	25.98	2.22	24.9	6.28
5	26.5	25.93	2.15	24.79	6.46
6	26.49	26.18	1.17	25.33	4.38
7	26.48	27.03	-2.06	27.12	-2.4
8	26.86	27.81	-3.54	28.97	-7.86
9	27.63	28.57	-3.4	30.78	-11.4
10	28.93	29.39	-1.58	32.74	-13.16
11	30.89	30.07	2.67	34.46	-11.54
12	27.61	29.52	-6.94	32.69	-18.42
13	28.09	29.37	-4.56	32.08	-14.21
14	28.62	29.06	-1.55	31.25	-9.21
15	28.69	28.06	2.2	28.57	0.43
16	27.86	27.41	1.63	27.08	2.81
17	27.57	26.94	2.29	26.33	4.5
18	27.74	26.62	4.05	25.94	6.5
19	26.96	26.55	1.53	25.9	3.94
20	26.99	26.53	1.7	25.89	4.07
21	26.98	26.54	1.64	25.93	3.9
22	27.04	26.57	1.72	26	3.83
23	27.09	26.6	1.79	26.06	3.79
		Error Prom.	2.63	Error Prom.	6.96
		Error mínimo	1.53	Error mínimo	0.43
		Error máximo	-6.94	Error máximo	-18.42

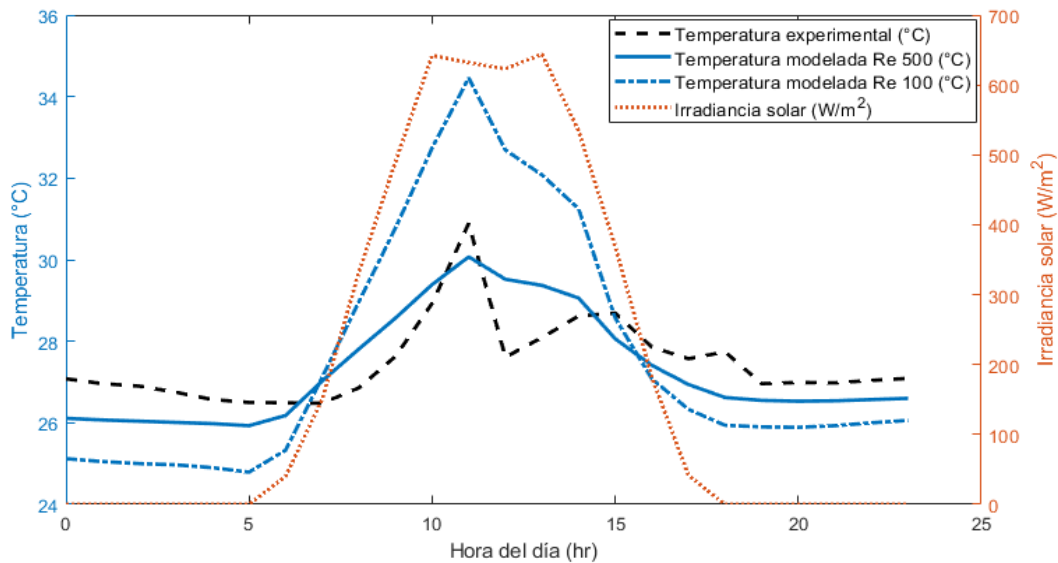


Figura 4.26. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada del ICTA ubicado en la UJAT para el día (01/Octubre/2017).

Una vez concluidas las validaciones con experimentación llevada a cabo dentro del país (México), se realizó la validación con estudios experimentales obtenidos en otros países, sin embargo, todavía es muy escasa la literatura de ICTA instalados en el mundo con resultados experimentales detallados y desglosados en forma de tablas, la mayoría de los autores solo presentan una gráfica o figura en donde reportan sus resultados, sin incluir tablas numéricas de las lecturas registradas, eso sin tomar en cuenta que muchas veces los estudios experimentales trabajan con flujo en régimen turbulento o configuraciones no compatibles con las limitaciones inherentes al modelo y condiciones con las que se trabaja en esta investigación.

En el año 2017 Yousef Belloufi et al. publicaron un trabajo con mediciones experimentales, con resultados reportados en tablas para distintas longitudes del recorrido del aire al interior de la tubería de intercambio de calor, en un ICTA ubicado en el laboratorio de ingeniería mecánica de la universidad de Biskra, Argelia, con una configuración de tubería como se aprecia en la figura 4.27, el sistema cuenta con instrumentación en diferentes longitudes del recorrido de aire, cabe señalar que no se modeló la longitud completa, debido a que registraron temperaturas hasta una longitud de 53.16 metros, para este trabajo solo se tomaron las primeras 4 lecturas para los primeros 3.63, 7.69, 11.73 y 16.04 metros de longitud del ICTA, según las lecturas registradas durante los 2 días de mediciones experimentales en diferentes horarios [89].



System	Value
Soil temperature at depth δ (T_i)	26°C
Depth of buried pipe (δ)	3 m
Air specific heat c_{pair}	1000 J/(Kg.°C)
Air density (ρ)	1.2 Kg/m ³
Soil thermal conductivity (λ_{soil})	1.25 W/(m.°C)
Thermal conductivity of pipe (λ_p)	0.17 W/(m.°C)
Inner radius of the pipe (r_1)	55 mm
Outer radius of the pipe (r_2)	57.5 mm

Figura 4.27. Detalle del ICTA experimental ubicado en la universidad de Biskra, Argelia, datos y dimensiones reportados por los autores [89].

En la tabla 4.25 se muestran las condiciones de operación registradas los días 04/08/2013 y 05/08/2013, datos obtenidos del sitio web de la NASA "Power Acces Viewer" [90], excepto la temperatura de entrada, que fue registrada por los autores del trabajo experimental.

Tabla 4.25. Condiciones climatológicas para los días 04/08/2013 y 05/08/2013 en la universidad de Biskra Argelia

Fecha de la medición	Hora del día (h)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)
04/08/2013	10	914.62	29.5	2.98	36.31
04/08/2013	12	930.01	23.56	2.47	39.32
04/08/2013	14	713.3	20.25	3.24	41.27
04/08/2013	15	527.66	19.38	3.83	43.56
04/08/2013	16	323.45	18.88	4.15	42.39
04/08/2013	18	12.79	29.5	2.41	41.8
04/08/2013	20	0	29.25	2.09	38.34
05/08/2013	1	0	43.38	2.83	34.25
05/08/2013	5	62.51	43.94	3.27	32.13
05/08/2013	10	907.95	26.38	4.29	38.53
05/08/2013	12	939.64	22	3.79	41.43
05/08/2013	14	675.61	20.44	3.5	42.32
05/08/2013	15	488.19	20.56	3.52	43.92
05/08/2013	16	290.21	21.12	3.62	42.92
05/08/2013	18	10.94	29.56	2.8	41.51
05/08/2013	20	0	31.5	3.04	38.42

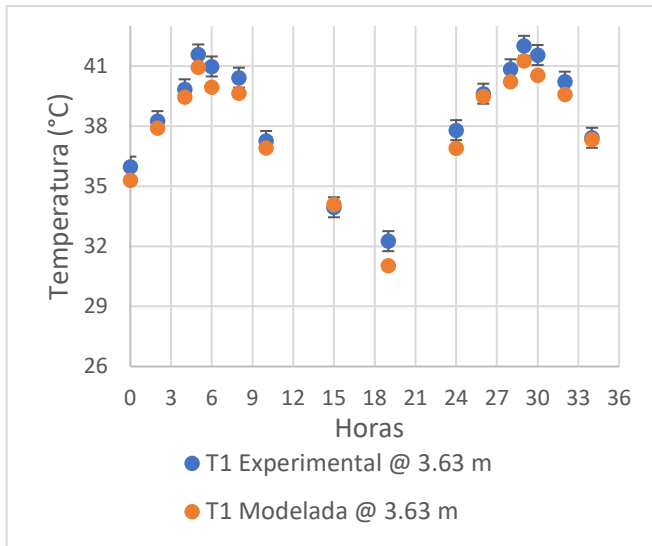
Para realizar la comparativa entre los resultados experimentales reportados por Yousef Belloufi et al. (2017), se realizaron modelaciones con un ICTA de 3 metros de profundidad y 15 metros de longitud horizontal, teniendo un total de 19 metros de recorrido de aire, las modelaciones se realizaron para cada hora (16 modelaciones) con sus correspondientes condiciones de operación reportadas en la tabla 4.25 y las condiciones físicas que reportan los autores en el lado derecho de la figura 4.27, registrando el promedio de temperatura obtenido para las primeras 4 lecturas que registraron los autores a 3.63, 7.69, 11.73 y 16.04 metros del recorrido de aire (T1, T2, T3 y T4 respectivamente).

En la tabla 4.26 se presentan los resultados de la comparación entre las lecturas registradas por el experimento realizado por Yousef Belloufi et al. y las obtenidas por el modelado en este trabajo.

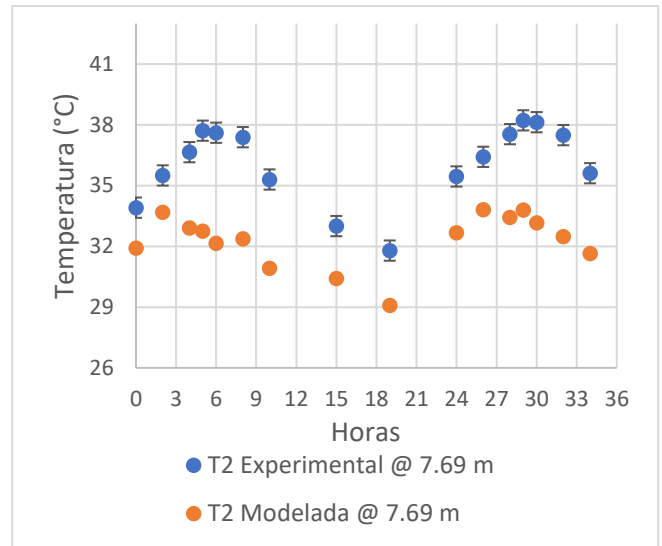
En la figura 4.28 se muestran los resultados de la validación con las 4 temperaturas que fueron medidas, el color azul representa las mediciones experimentales (incertidumbre de ± 0.5 °C) mientras que el color naranja representa las temperaturas obtenidas por el modelado con CFD.

Tabla 4.26. Comparativa y cuantificación de errores de resultados experimentales vs modelados
(ICTA instalado en Biskra Argelia)

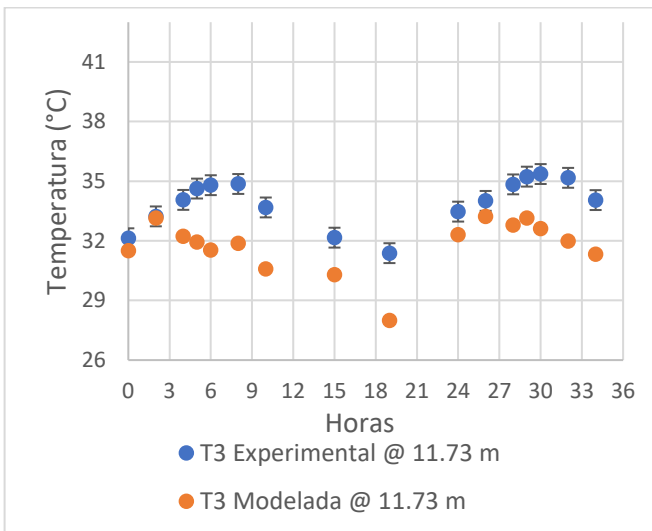
Tiempo (hr)	T1 (°C) Exp. @ 3.63 m	T1 (°C) Modelada @ 3.63 m	Error relativo T1 (%)	T2 (°C) Exp. @ 7.69 m	T2 (°C) Modelada @ 7.69 m	Error relativo T2 (%)
0	35.98	35.31	1.86	33.91	31.91	5.9
2	38.25	37.9	0.92	35.5	33.68	5.13
4	39.84	39.46	0.95	36.65	32.91	10.2
5	41.58	40.94	1.54	37.71	32.76	13.13
6	40.98	39.95	2.51	37.61	32.16	14.49
8	40.42	39.64	1.93	37.39	32.38	13.4
10	37.26	36.92	0.91	35.3	30.92	12.41
15	33.95	34.09	0.41	33	30.42	7.82
19	32.26	31.04	3.78	31.79	29.09	8.49
24	37.8	36.9	2.38	35.45	32.68	7.81
26	39.62	39.48	0.35	36.42	33.81	7.17
28	40.84	40.23	1.49	37.54	33.44	10.92
29	42.01	41.26	1.79	38.22	33.8	11.56
30	41.55	40.54	2.43	38.13	33.17	13.01
32	40.22	39.59	1.57	37.49	32.48	13.36
34	37.42	37.33	0.24	35.61	31.64	11.15
	Error relativo % Promedio		1.57	Error relativo % Promedio		10.37
	MSE		0.48	MSE		15.63
	RMSE		0.69	RMSE		3.95
Tiempo (hr)	T3 (°C) Exp. @ 11.73 m	T3 (°C) Modelada @ 11.73 m	Error relativo T3 (%)	T4 (°C) Exp. @ 16.04 m	T4 (°C) Modelada @ 16.04 m	Error relativo T4 (%)
0	32.13	31.5	1.96	31.37	31.22	0.48
2	33.23	33.14	0.27	32.26	32.77	1.58
4	34.06	32.23	5.37	32.98	31.75	3.73
5	34.63	31.94	7.77	33.5	31.35	6.42
6	34.8	31.54	9.37	33.59	31.11	7.38
8	34.86	31.87	8.58	33.7	31.52	6.47
10	33.68	30.59	9.17	32.72	30.36	7.21
15	32.16	30.29	5.81	31.59	30.21	4.37
19	31.38	28	10.77	30.94	27.94	9.7
24	33.47	32.3	3.5	32.65	32.04	1.87
26	34.01	33.22	2.32	32.93	32.82	0.33
28	34.84	32.79	5.88	33.71	32.33	4.09
29	35.23	33.14	5.93	34.02	32.69	3.91
30	35.36	32.61	7.78	34.15	32.22	5.65
32	35.17	31.99	9.04	34.05	31.65	7.05
34	34.05	31.33	7.99	33.14	31.11	6.13
	Error relativo % Promedio		6.34	Error relativo % Promedio		4.77
	MSE		5.67	MSE		3.22
	RMSE		2.38	RMSE		1.79



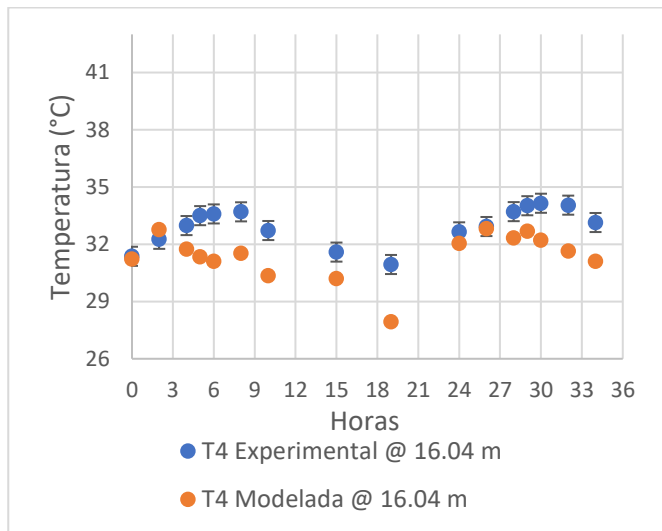
a)



b)



c)



d)

Figura 4.28. Resultados de la validación para las 4 posiciones evaluadas.

Además de los errores relativos obtenidos con las ecuaciones (166, 167), esta vez, se incluyó la cuantificación del error cuadrático medio (MSE), y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) como:

$$MSE = \frac{\sum_1^{16} (Temperatura\ experimental - Temperatura\ modelada)^2}{16} \quad (179)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_1^{16} (Temperatura\ experimental - Temperatura\ modelada)^2}{16}} \quad (180)$$

Para las 4 lecturas de temperatura modeladas, se obtuvo un error relativo promedio de 5.76 %, un error cuadrático de 6.25 y la raíz del error cuadrático medio de 2.20.

4.8 Validación para las estaciones de verano, otoño e invierno en Tabasco México

Adicionalmente, y gracias a la colaboración con los autores responsables de las mediciones experimentales para el segundo ICTA utilizado para la validación del código, fue posible realizar modelaciones de validación adicionales para el ICTA instalado en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), debido a que en su trabajo publicado en 2020 [61], obtuvieron mediciones experimentales del ICTA instalado en la UJAT, de manera ininterrumpida para los 6 meses comprendidos de agosto del 2017 a enero del 2018, con esa información, se decidió utilizar los días 15 de cada uno de los meses con los que se cuenta con mediciones experimentales del ICTA, con la finalidad de comprobar la capacidad del código computacional, para predecir el comportamiento del ICTA, para las distintas condiciones que se dan de forma natural con el cambio de las estaciones del año (verano, otoño e invierno), ya que en México, se considera el inicio del verano el 21 de junio, comienzo del otoño el 22 de septiembre, terminando el 21 de diciembre y dando comienzo al invierno comprendido hasta el 20 de marzo [91] (tablas 4.27 – 4.32 y figuras 4.29 - 4.34).

Tabla 4.27. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (15/agosto/2017)

Hora del día	Irradiancia solar (W/m ²)	Humedad relativa aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temp. de salida exp (°C)	Temp. de salida Re = 500* (°C)	Error relativo (%)
0	0	95.75	3.6	28.2	27.34	3.05
1	0	95.81	3.38	28.02	27.15	3.1
2	0	95.56	3.42	27.4	26.66	2.7
3	0	95.56	3.41	27.12	26.51	2.25
4	0	95.62	3.42	27.11	26.39	2.66
5	0	95.81	3.2	27.04	26.26	2.88
6	53.4	95.12	3	26.68	26.09	2.21
7	233.59	92.38	2.9	26.62	26.54	0.3
8	397.32	87.31	2.81	27.11	27.22	0.41
9	456.34	80.75	2.75	27.91	27.88	0.11
10	700.2	76.44	2.36	28.9	29.47	1.97
11	767.68	72.06	1.98	30.91	30.65	0.84
12	707.32	71.44	1.91	30.21	30.55	1.13
13	596.76	71	2.1	30.67	30.45	0.72
14	579.65	72.5	2.34	30.82	30.56	0.84
15	396.49	75	2.5	30.47	29.68	2.59
16	232.99	76.19	2.92	30.8	29.42	4.48
17	106.07	82.06	2.88	30.33	28.96	4.52
18	10.24	88.62	2.77	30.14	28.81	4.41
19	0	90.38	3.4	29.55	28.48	3.62
20	0	92.25	3.96	29.12	28.19	3.19
21	0	94.31	4.05	28.8	27.93	3.02
22	0	95.5	3.88	28.49	27.61	3.09
23	0	95.5	3.78	28.38	27.52	3.03
				Error relativo % Promedio		2.38
				MSE		0.62
				RMSE		0.79

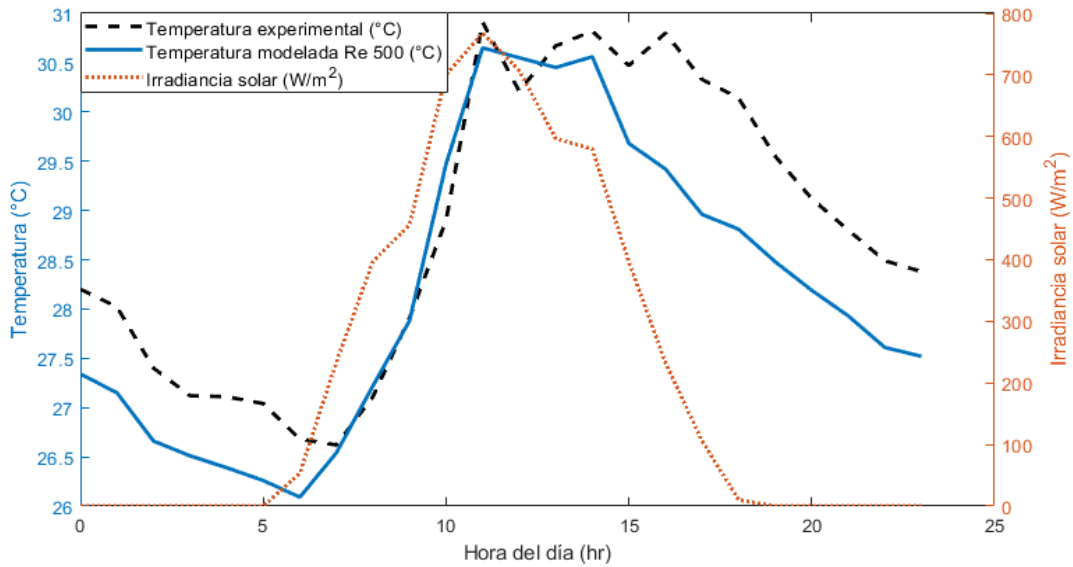


Figura 4.29. Temperatura de salida experimental vs modelada (15/Agosto/2017).

Tabla 4.28. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (15/septiembre/2017)

Hora del día	Irradiancia solar (W/m2)	Humedad relativa aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temp. de salida exp (°C)	Temp. de salida Re = 500* (°C)	Error relativo (%)
0	0	96.88	1.54	27.33	26.63	2.56
1	0	97.12	1.6	27.36	26.62	2.7
2	0	97.44	1.68	27.24	26.55	2.53
3	0	97.62	1.75	27.14	26.41	2.69
4	0	97.75	1.78	26.87	26.2	2.49
5	0	97.75	1.74	26.82	26.16	2.46
6	50.17	96.94	1.74	26.76	26.34	1.57
7	231.36	93.25	2.43	26.79	26.87	0.3
8	439.85	86.56	2.7	27.19	27.66	1.73
9	665.59	77.75	2.68	28.13	28.9	2.74
10	786.6	72.62	2.4	30.15	30.18	0.1
11	852.24	69.88	2.18	31.81	31.06	2.36
12	828.35	68.88	2.16	32.48	31.26	3.76
13	770.99	70.06	2.35	31.83	31.16	2.1
14	566.57	72.44	2.59	30.98	30.8	0.58
15	410.46	76.31	2.89	30.99	30.56	1.39
16	225.05	80.94	3.12	31.28	30.23	3.36
17	69.47	87.56	2.84	30.94	29.92	3.3
18	0	93.5	2.53	30.56	29.49	3.5
19	0	94.81	2.75	29.65	28.65	3.37
20	0	95.88	2.78	28.85	28.04	2.81
21	0	97	2.68	28.44	27.69	2.64
22	0	97.94	2.47	28.08	27.34	2.64
23	0	98.44	2.3	27.8	27.07	2.63
Error relativo % Promedio						2.35
MSE						0.55
RMSE						0.74

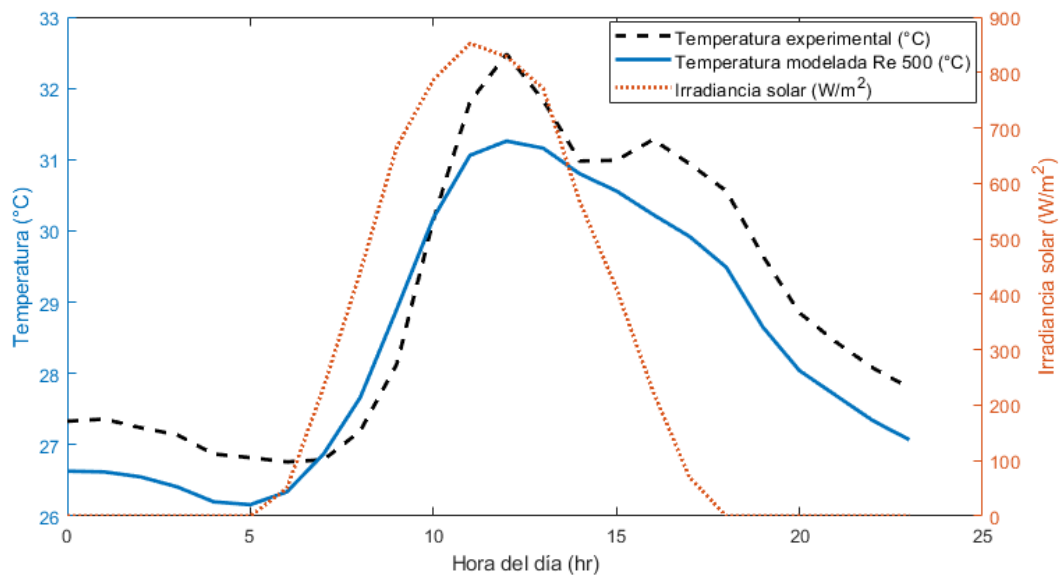


Figura 4.30. Temperatura de salida experimental vs modelada (15/ septiembre /2017).

Tabla 4.29. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (15/octubre/2017)

Hora del día	Irradiancia solar (W/m2)	Humedad relativa aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temp. de salida exp (°C)	Temp. de salida Re = 500* (°C)	Error relativo (%)
0	0	95.62	1.66	26.54	26.13	1.54
1	0	95.88	1.58	26.37	25.92	1.71
2	0	96	1.55	26.39	25.89	1.89
3	0	96	1.51	26.29	25.84	1.71
4	0	95.94	1.42	26.26	25.86	1.52
5	0	95.56	1.31	26.08	25.59	1.88
6	40.66	95.69	1.1	25.97	25.79	0.69
7	145.4	92.06	1.38	25.92	26.21	1.12
8	306.95	84.81	1.81	26.21	26.77	2.14
9	439.8	81.25	1.98	26.95	27.54	2.19
10	445.55	79.12	2.22	28.19	28.72	1.88
11	504.77	77.12	2.56	29.49	29.07	1.42
12	484.09	76.88	2.96	31	29	6.45
13	433.8	77.62	3.37	30.24	29.53	2.35
14	400.71	79.88	3.72	30.12	29.31	2.69
15	263.19	82.62	3.81	29.64	28.86	2.63
16	158.96	85.44	3.62	29.52	28.8	2.44
17	26.93	90.62	2.71	28.23	27.49	2.62
18	0	94.38	2.23	26.85	26.7	0.56
19	0	94.75	2.21	27	26.64	1.33
20	0	95.06	2.15	26.97	26.69	1.04
21	0	95.5	2.09	26.87	26.62	0.93
22	0	95.88	1.96	26.86	26.56	1.12
23	0	96.19	1.9	26.85	26.54	1.15
Error relativo % Promedio						1.88
MSE						0.41
RMSE						0.64

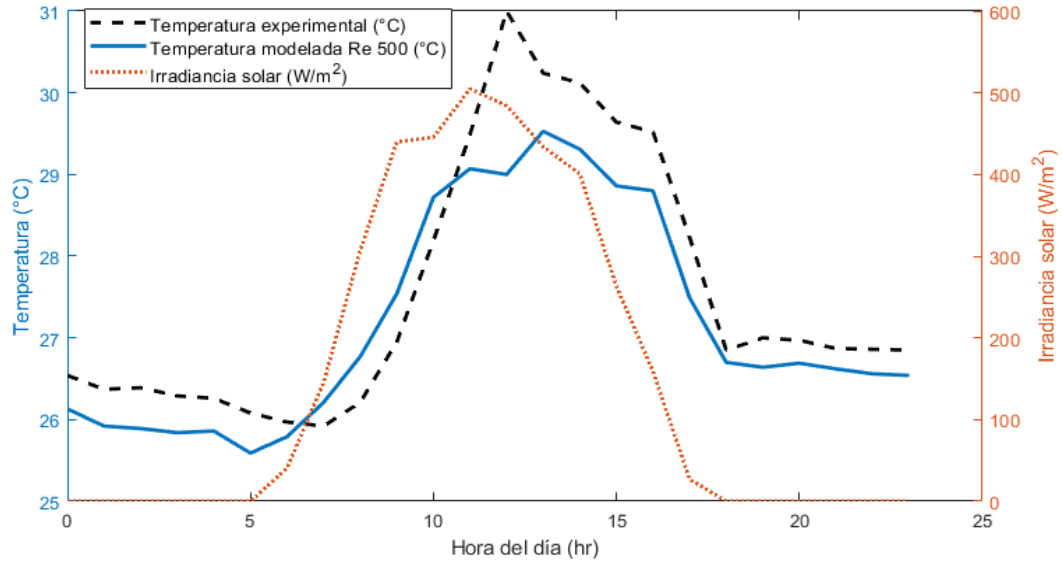


Figura 4.31. Temperatura de salida experimental vs modelada (15/ octubre /2017).

Tabla 4.30. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (15/noviembre/2017)

Hora del día	Irradiancia solar (W/m2)	Humedad relativa aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temp. de salida exp (°C)	Temp. de salida Re = 500* (°C)	Error relativo (%)
0	0	94.69	1.8	24.89	25.35	1.85
1	0	94.81	1.86	24.93	25.22	1.16
2	0	95.06	1.92	24.82	25.14	1.29
3	0	95.19	1.95	24.81	25.11	1.21
4	0	95.12	1.96	24.75	25.07	1.29
5	0	94.94	1.95	24.75	25.04	1.17
6	23.52	94.81	1.9	24.73	25.05	1.29
7	164.45	92.44	1.94	24.65	25.44	3.2
8	359.31	85.88	2.5	24.79	25.9	4.48
9	480.42	80.62	2.85	25.7	26.79	4.24
10	545.72	77.56	2.78	26.63	28.31	6.31
11	549.09	75.56	2.99	28.59	28.06	1.85
12	542.67	74.38	3.35	28.09	27.96	0.46
13	518.42	74.19	3.77	29.01	28.48	1.83
14	407.9	76.25	4.26	27.93	27.92	0.04
15	244.79	80.19	4.68	28.04	27.97	0.25
16	109.2	85.19	4.48	28.31	27.95	1.27
17	10.69	91.81	3.2	28.53	27.72	2.84
18	0	95	2.61	27.25	27.11	0.51
19	0	95.75	2.36	26.59	26.68	0.34
20	0	96.44	2.11	26.3	26.24	0.23
21	0	96.81	1.98	25.96	25.92	0.15
22	0	97.12	1.94	25.63	25.64	0.04
23	0	97.25	1.92	25.54	25.54	0
Error relativo % Promedio						1.55
MSE						0.34
RMSE						0.58

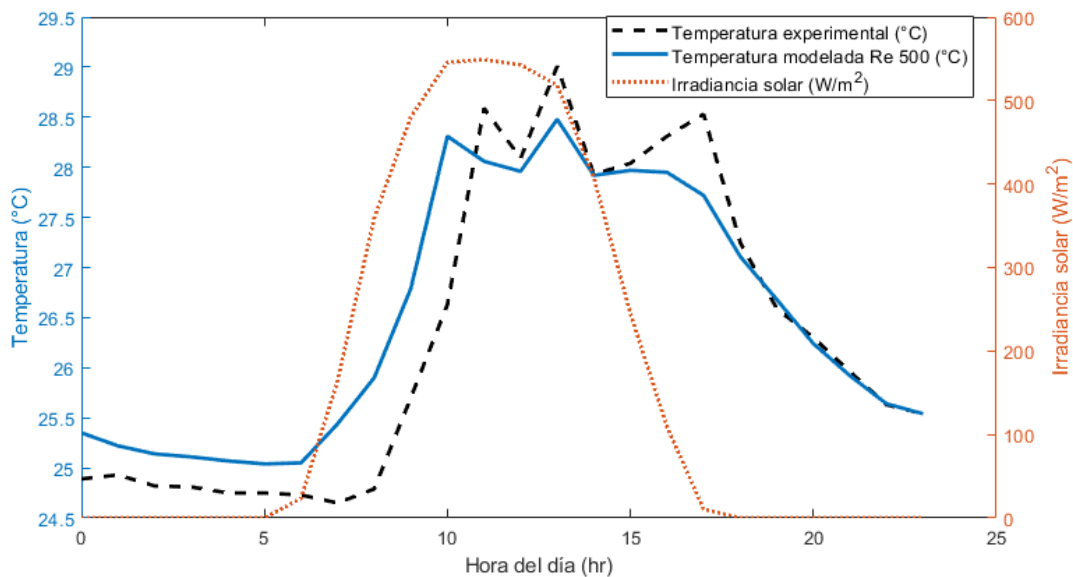


Figura 4.32. Temperatura de salida experimental vs modelada (15/noviembre/2017).

Tabla 4.31. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (15/diciembre/2017)

Hora del día	Irradiancia solar (W/m ²)	Humedad relativa aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temp. de salida exp (°C)	Temp. de salida Re = 500* (°C)	Error relativo (%)
0	0	100	2.67	22.89	23.62	3.19
1	0	100	2.55	22.61	23.33	3.18
2	0	100	2.42	22.43	23.11	3.03
3	0	100	2.25	22.28	22.98	3.14
4	0	100	2.02	22.08	22.89	3.67
5	0	100	1.81	22.01	22.68	3.04
6	9.69	100	1.65	22.02	22.74	3.27
7	157.78	93.69	1.76	21.85	23.08	5.63
8	374.71	84.94	1.57	21.87	23.99	9.69
9	564.84	79.31	1.32	23.03	26.12	13.42
10	701.29	75.5	1.27	24.07	27.87	15.79
11	776.95	73.25	1.2	28.07	29.75	5.99
12	776.48	72.19	1.15	28.64	30.07	4.99
13	712.02	71.31	1.32	26.85	29.61	10.28
14	569.34	70.19	1.76	26.84	28.89	7.64
15	386.73	72.12	2.16	27.2	28.36	4.26
16	177.23	78.5	2.02	26.85	27.46	2.27
17	16.61	88.69	2.05	26.57	26.55	0.08
18	0	92.56	2.23	25.59	26.08	1.91
19	0	94.31	2.31	24.98	25.56	2.32
20	0	95.81	2.45	24.55	25.22	2.73
21	0	97.25	2.53	24.39	25.17	3.2
22	0	98.38	2.63	24.16	25.02	3.56
23	0	98.56	2.8	23.9	24.72	3.43
Error relativo % Promedio						4.99
MSE						2.29
RMSE						1.51

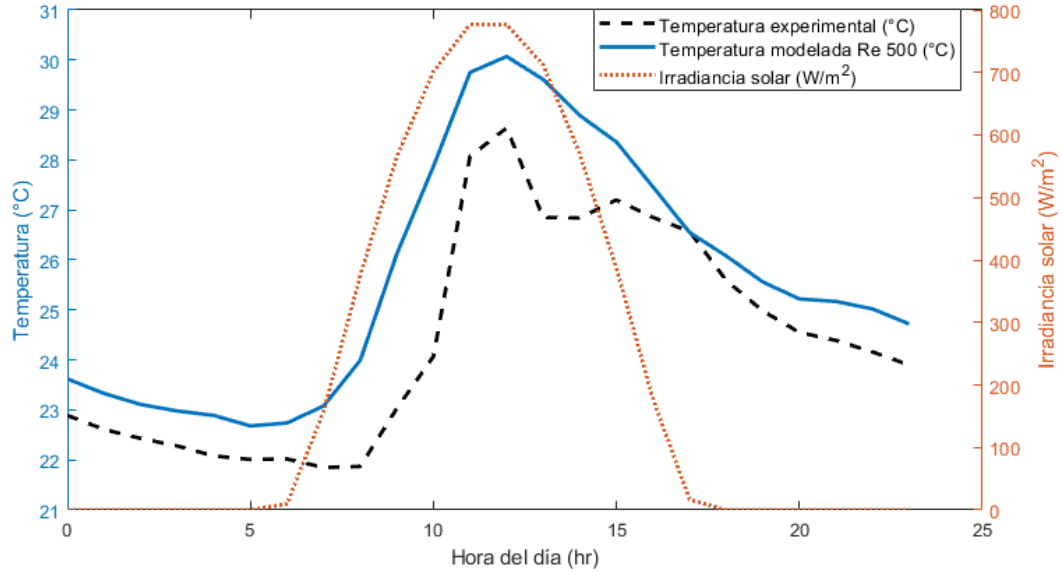


Figura 4.33. Temperatura de salida experimental vs modelada (15/diciembre/2017).

Tabla 4.32. Comparativa de temperatura de salida experimental vs modelada (15/enero/2018)

Hora del día	Irradiancia solar (W/m ²)	Humedad relativa aire (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temp. de salida exp (°C)	Temp. de salida Re = 500* (°C)	Error relativo (%)
0	0	88.31	2.62	22.28	23.27	4.44
1	0	89.06	2.65	22.24	23.2	4.32
2	0	90.19	2.66	22.23	23.19	4.32
3	0	90.94	2.64	22.23	23.22	4.45
4	0	91.81	2.61	22.16	23.26	4.96
5	0	93.06	2.65	22.11	23.18	4.84
6	0	94.25	2.77	21.98	23.17	5.41
7	108.23	88.25	3.84	21.93	23.23	5.93
8	327.51	81	4.67	21.91	23.54	7.44
9	526.27	72.38	5.4	22.22	24.43	9.95
10	602.01	66.31	5.69	23.05	25.25	9.54
11	717.39	63.06	5.59	23.71	25.98	9.57
12	655.62	61.19	5.43	26.65	27.02	1.39
13	555.31	60.19	5.23	25.24	26.2	3.8
14	464.34	60.12	5.03	25.13	25.75	2.47
15	341.16	61.31	4.78	24.9	24.99	0.36
16	174.36	67.56	3.83	25.02	25.22	0.8
17	35.2	80.62	2.82	24.63	24.86	0.93
18	0	85.75	2.92	24.37	24.78	1.68
19	0	87.25	2.96	23.56	24.14	2.46
20	0	88.5	2.89	22.9	23.2	1.31
21	0	89.56	2.66	22.75	23.35	2.64
22	0	91.19	2.43	22.36	23.06	3.13
23	0	93.44	2.25	22.07	22.77	3.17
Error relativo % Promedio						4.14
MSE						1.26
RMSE						1.12

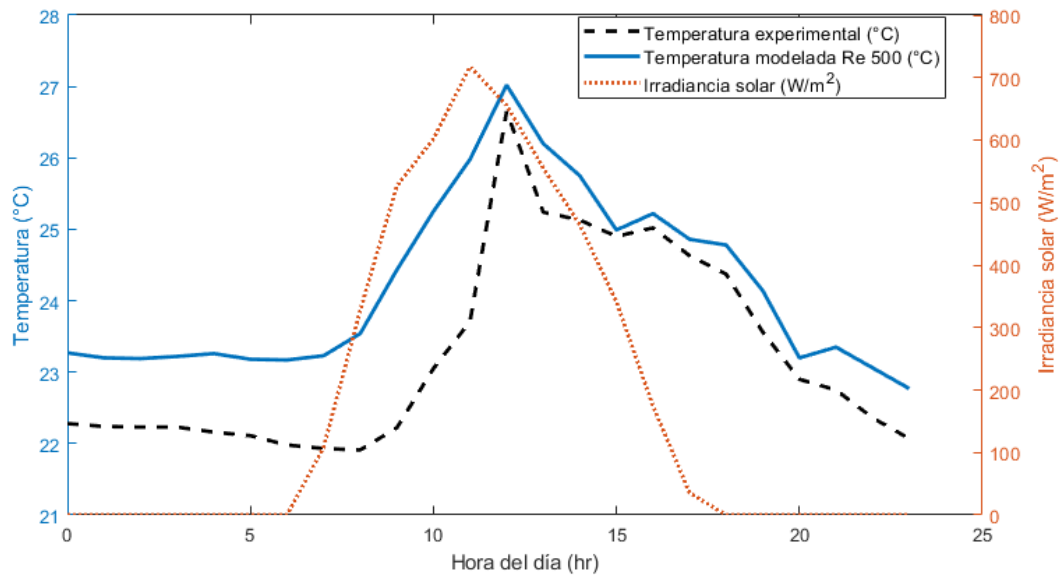


Figura 4.34. Temperatura de salida experimental vs modelada (15/enero/2018).

En algunas figuras como en la 4.32 se observa una distribución de temperatura en el periodo de 10 a 19 horas que difiere respecto al comportamiento de la irradiancia solar, esto es debido a que la solución no solo depende de la irradiancia solar, en este caso, la temperatura de entrada, la humedad relativa del aire y la velocidad del viento tienen una influencia significativa en el resultado final. Otro comportamiento que es posible obtener como resultado, es cuando se da una inversión en los valores de temperatura de salida respecto a la entrada, esto es, que la temperatura de salida sea mayor que la de entrada para casos de enfriamiento, y menor para casos de calentamiento, debido al efecto de la inercia térmica del suelo, ya que éste puede encontrarse a mayor temperatura que el aire de entrada para fines de enfriamiento, o a menor temperatura que la de entrada para fines de calentamiento.

Un último detalle que se debe tomar en cuenta en la validación de un código o modelo matemático al compararse con mediciones experimentales es el concepto de error de medición.

4.9 Errores en mediciones de temperatura

Una medición es una comparación entre una lectura obtenida por un instrumento de medida para un objeto o evento que pueda ser medido respecto a un valor de referencia establecido, en la figura 4.35 se representan los conceptos más importantes asociados a la medición.

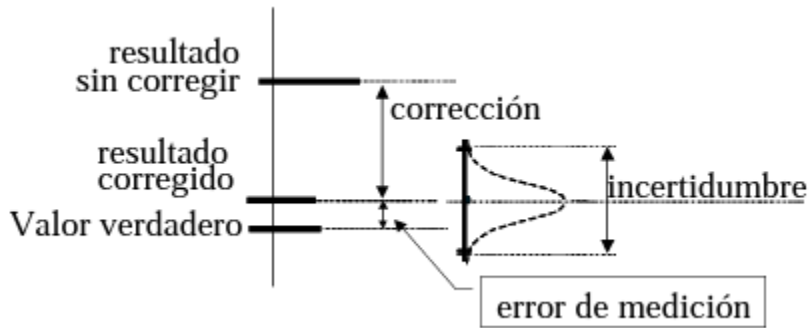


Figura 4.35. Aspectos para tomar en cuenta en mediciones experimentales [92].

En la figura 4.35 se pueden identificar los siguientes conceptos:

- **Valor verdadero:** Es el valor exacto del fenómeno o proceso en el momento de la medición.
- **Resultado sin corregir:** Es una lectura obtenida por un instrumento de medición.
- **Resultado corregido:** Es una lectura obtenida por un instrumento de medición que previamente fue calibrado.
- **Incertidumbre:** Representa el grado de imprecisión en la medición debido a limitaciones físicas del instrumento, fluctuaciones en las condiciones ambientales y en general todo aquello que escapa del control del operador para llevar a cabo una medición.
- **Error de medición:** Es la diferencia entre el valor medido con un instrumento calibrado y el valor verdadero.

Generalmente en la industria e investigación se utilizan termopares o termocuplas para la medición y/o registro de lecturas de temperatura, en la tabla 4.33 se presentan 4 de los más comúnmente utilizados con su rango de aplicación y su respectiva incertidumbre.

Tabla 4.33. Termopares comerciales, rangos de aplicación e incertidumbre [93].

Tipo	Rango de temperatura (°C)	Incertidumbre estándar (°C)
<i>J</i>	0 a 750	2.2 a 1.1
<i>K</i>	-200 a 1250	2.2 a 1.1
<i>E</i>	-200 a 900	1.7 a 1.0
<i>T</i>	-250 a 350	1.0 a 0.5

Debido a los rangos de operación y a la poca incertidumbre que presentan algunos fabricantes, los termopares son el tipo de instrumento de medición adecuado para las lecturas que se pueden obtener en un ICTA instalado como sistema de enfriamiento o calefacción.

Capítulo 5: Resultados y discusión.

Una vez que el código computacional desarrollado cumple con los criterios de verificación, análisis de independencia de malla y del proceso de validación, obteniendo errores relativos promedio menores al 10 %, aspecto que ha demostrado cumplir el código desarrollado para esta investigación, es entonces, cuando es posible garantizar que las proyecciones realizadas por el código desarrollado para probar el potencial de aplicación de los ICTA en un ambiente virtual, con la posibilidad de probar diversas configuraciones y condiciones de operación, son válidas o aceptables con un margen de incertidumbre del 10%. Todo lo anterior con la finalidad de evaluar si es conveniente o no implementar esta ecotecnología, en una determinada localidad, sin la necesidad de realizar experimentación.

5.1 Parámetros y consideraciones para las proyecciones obtenidas con el modelado del ICTA

Como ya se revisó en el capítulo 1, en el territorio nacional se identifican 7 zonas climáticas, de entre las cuales se destacan 4 por su extensión que son: el clima seco y/o semiseco con una extensión del 32.02 % del total, seguido del clima cálido subhúmedo con un 28.87 %, muy seco o seco desértico con 21.09 % y templado subhúmedo con un 10.36 %, en la tabla 5.1 a grandes rasgos se muestran los parámetros que deben tomarse en cuenta para el modelado de este tipo de sistemas.

Tabla 5.1. Parámetros para tomar en cuenta para las proyecciones con el modelado del ICTA

Tipo de suelo	Zona climática Condiciones climáticas	Condiciones climatológicas	Técnica de proyección	Información obtenida
Arena	Seco y/o semiseco. 32.02 % de extensión en Mex.	Evaluación para el día más cálido del año	Modelado CFD para cada hora del día	Distribución de las variables calculadas en el dominio.
	Cálido subhúmedo. 28.87 % de extensión en Mex.			El valor promedio de la temperatura en la salida del ICTA.
Limo	Muy seco o seco desértico. 21.09 % de extensión en Mex.	Evaluación para el día más frío del año		Determinar si el sistema resulta efectivo, según el tipo de suelo y condiciones climatológicas correspondientes.
	Arcilla			Templado subhúmedo. 10.36 % de extensión en Mex.

Al evaluar cuantitativamente por medio del modelado matemático los resultados obtenidos por el modelado del ICTA, será posible establecer que configuraciones resultan más eficaces o incluso cuales no resultan satisfactorias, por lo tanto, así es posible tener una idea clara de en qué condiciones los ICTA resultan útiles y para cuáles no.

Otro aspecto importante para tomar en cuenta, es el cambio de las propiedades de conductividad térmica “ λ ” y calor específico “ C_p ” para el suelo, según su contenido de humedad, para este fin, se utilizaron las relaciones obtenidas de Ramírez Dávila (2013) y utilizadas por Guillermo B. et al. (2022) [94, 95].

Arcilla:

$$\lambda = 8.61(hum)^2 - 0.63(hum) + 0.19 \quad \text{Para} \quad 0\% \leq \%Humedad \leq 26\% \quad (180)$$

$$\lambda = 1.12(hum) + 0.35 \quad \text{Para} \quad 27\% \leq \%Humedad \leq 50\% \quad (181)$$

$$C_p = 4195.1(hum) + 1114.6 \quad \text{Para} \quad 0\% \leq \%Humedad \leq 38\% \quad (182)$$

Limo:

$$\lambda = 13.08(hum)^2 - 0.56(hum) + 0.19 \quad \text{Para} \quad 0\% \leq \%Humedad \leq 21\% \quad (183)$$

$$\lambda = 0.99(hum) + 0.45 \quad \text{Para} \quad 22\% \leq \%Humedad \leq 50\% \quad (184)$$

$$C_p = 4196.2(hum) + 1165.1 \quad \text{Para} \quad 0\% \leq \%Humedad \leq 38\% \quad (185)$$

Arena:

$$\lambda = 82.29(hum)^2 - 1.49(hum) + 0.3 \quad \text{Para} \quad 0\% \leq \%Humedad \leq 10\% \quad (186)$$

$$\lambda = 0.02(hum) + 0.99 \quad \text{Para} \quad 11\% \leq \%Humedad \leq 50\% \quad (187)$$

$$C_p = 4215.4(him) + 1502.5 \quad \text{Para} \quad 0\% \leq \%Humedad \leq 38\% \quad (188)$$

5.2 Proyecciones del potencial de operación de los ICTA para fines de calefacción y enfriamiento

Para las primeras modelaciones, se buscaron 2 localidades que cumplieran con ambas condiciones posibles de operación para un ICTA, las cuales son, las condiciones de enfriamiento y de calefacción respectivamente, la primera de ellas es la localidad del jicarero en Jojutla Morelos, zona considerada con un clima cálido durante casi todo el año, y la segunda localidad es la Rosilla en Durango, área considerada con un clima frío durante todo el año, los datos climáticos para el modelado se obtuvieron de la plataforma digital en línea de la NASA “Power Data Access Viewer” [90], para las 24 horas de los días más cálidos y más fríos reportados en el año 2020 para cada localidad, las dimensiones del ICTA para estas primeras modelaciones son de 2 metros de profundidad por 5 de extensión horizontal y un diámetro de tubería de 0.15 m (6 in).

En las tablas 5.2 y 5.3 se muestran las condiciones de operación y los resultados obtenidos por el modelado numérico, para 3 flujos laminares distintos para los días 04/06/2020 (día cálido) y 02/10/2020 (día frío) respectivamente.

Tabla 5.2. Condiciones de operación y resultados obtenidos por el modelado, en la localidad del Jicarero en Jojutla Morelos, día cálido (04/06/2020)

Hora (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temp. de entrada, amb. (°C)	Temp. de salida Re = 100 (°C)	Temp. de salida Re = 75 (°C)	Temp. de salida Re = 50 (°C)
0	0	62	0.84	23.51	18.02	17.43	16.68
1	0	65.62	0.51	22.76	17.57	16.92	16.09

2	0	68.81	0.29	22.13	17.1	16.39	15.48
3	0	71.12	0.28	21.59	17.01	16.29	15.37
4	0	73.44	0.3	21.05	17	16.28	15.36
5	42.39	71.75	0.49	21.34	18.54	18.02	17.35
6	231.34	59.25	0.15	23.68	25.29	25.66	26.06
7	454.16	46.44	0.54	26.57	29.19	30.06	31.08
8	656.91	37.25	0.72	29.17	32.57	33.87	35.43
9	814.63	30.44	0.91	31.58	34.9	36.03	37.7
10	907.95	25.69	1.35	33.69	32.97	34.03	35.6
11	966.36	22.75	1.92	35.32	30.78	31.83	33.09
12	914.29	20.81	2.42	36.46	28.62	29.39	30.31
13	849.46	19.81	2.85	37.08	27.06	27.63	28.3
14	675.44	19.5	3.03	37.08	25.19	25.52	25.89
15	492.62	19.75	3.17	36.53	23.35	23.44	23.53
16	275.59	21	3.09	35.3	21.36	21.19	20.96
17	74.59	24.38	2.32	33.26	19.41	19.22	18.53
18	0	32.5	1.69	30.88	18.54	18.01	17.34
19	0	38.12	2.41	29.42	18.87	18.39	17.77
20	0	45.44	3.2	27.58	19.1	18.65	18.07
21	0	53.38	3.38	25.94	19.26	18.84	18.28
22	0	60.56	2.97	24.66	19.34	18.92	18.38
23	0	66.5	2.37	23.68	19.31	18.9	18.35

Tabla 5.3. Condiciones de operación y resultados obtenidos por el modelado, en la localidad del Jicarero en Jojutla Morelos, día frío (02/10/2020)

Hora (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temp. de entrada, amb. (°C)	Temp. de salida Re = 100 (°C)	Temp. de salida Re = 75 (°C)	Temp. de salida Re = 50 (°C)
0	0	85.69	2.24	14.1	16.86	16.2	14.85
1	0	83.75	2.45	13.3	16.44	15.53	14.28
2	0	81.5	2.88	12.48	16.03	15.07	13.73
3	0	80.94	3.22	11.49	15.61	14.59	13.17
4	0	81.06	3.43	10.57	15.23	14.15	12.66
5	11.8	81.81	3.53	9.78	15	13.89	12.35
6	166.9	77.44	3.49	10.63	15.87	15.27	13.53
7	420.09	67.19	3.21	13.21	18.64	18.08	17.27
8	647.31	54.56	3.23	16.8	20.93	20.7	20.35
9	826.79	45.44	3.29	19.76	22.59	22.61	22.59
10	941.69	40.69	3.2	21.67	23.84	24.04	24.28
11	990.58	39.88	3.03	22.81	24.81	25.15	25.58
12	948.52	40.19	2.84	23.57	25.13	25.52	26.01
13	823.15	41.19	2.6	23.97	24.79	25.13	25.55
14	644.49	43.19	2.37	24.05	23.83	24.03	24.26
15	420.46	46	2.02	23.97	22.41	22.4	22.33
16	169.84	47.56	1.62	23.26	19.9	19.49	18.92
17	8.51	62.38	1.07	20.39	17.74	17.02	16.02
18	0	64.19	0.66	18.55	16.64	15.74	14.52
19	0	72.19	1.24	16.81	16.9	16.06	14.89
20	0	74.38	1.98	15.79	16.9	16.06	14.9
21	0	78.81	2.5	14.48	16.71	15.85	14.65

22	0	81.56	2.87	13.33	16.42	15.51	14.25
23	0	82.31	3.16	12.39	16.07	15.12	13.79

Mientras que en las figuras 5.1 y 5.2 se muestra la comparativa entre la temperatura de entrada (Temperatura ambiente) con respecto a la temperatura obtenida por el modelado en la salida del ICTA en la localidad del Jicarero en Jojutla Morelos, para 3 flujos laminares durante las horas de los días 04/06/2020 (día cálido) y 02/10/2020 (día frío) respectivamente.

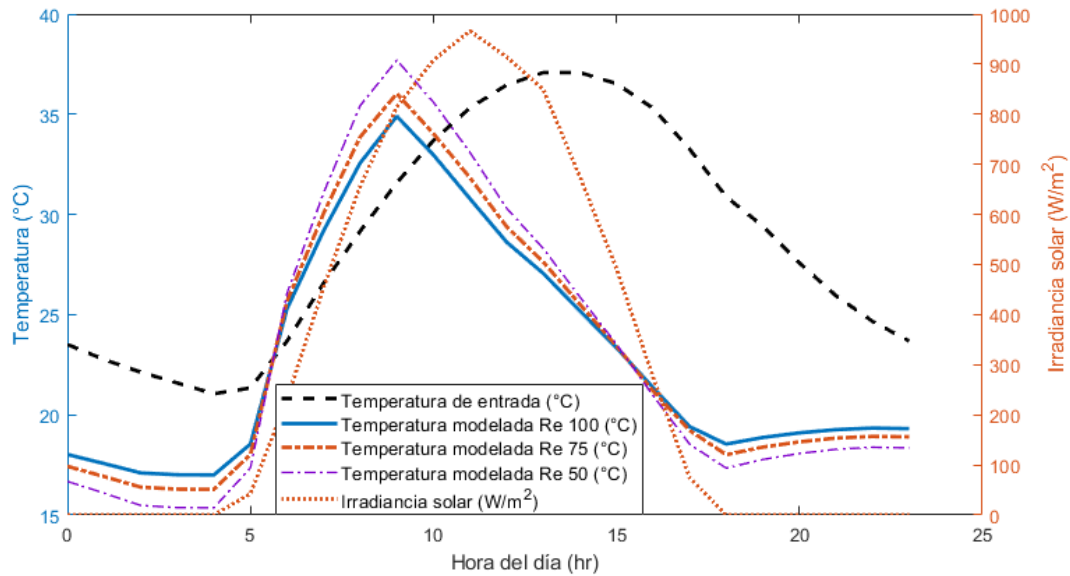


Figura 5.1. Comparativa de temperatura de entrada y salida del ICTA en la localidad del jicarero en Jojutla Morelos para el día más cálido del año 04/06/2020.

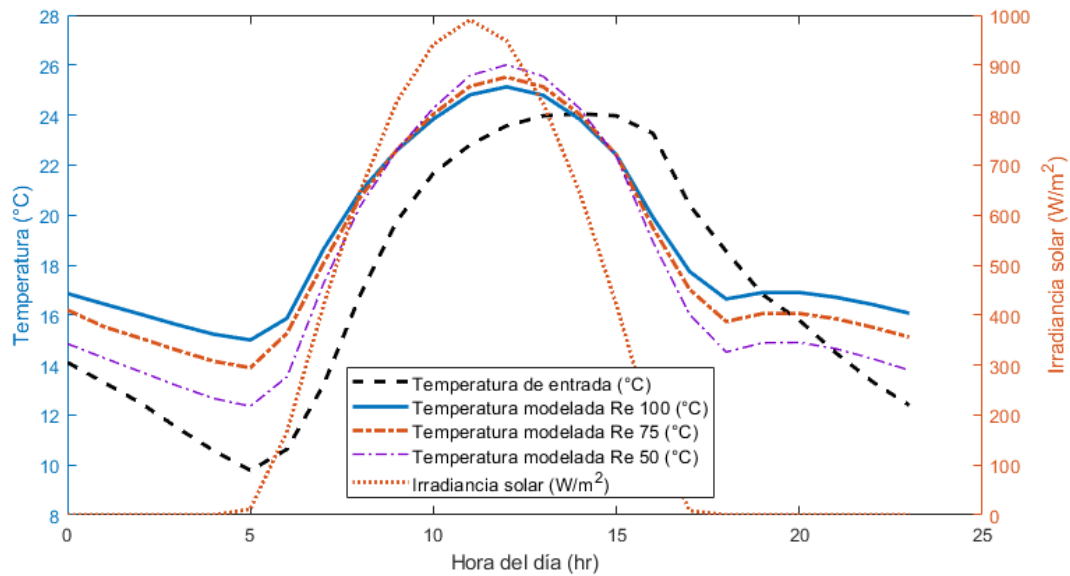


Figura 5.2. Comparativa de temperatura de entrada y salida del ICTA en la localidad del jicarero en Jojutla Morelos para el día más frío del año 02/10/2020.

Los resultados obtenidos para la localidad del Jicarero en Jojutla Morelos (figuras 5.1 y 5.2) resultan especialmente satisfactorios según el potencial de enfriamiento alcanzado para el día más cálido del año 2020, exceptuando el periodo horario comprendido de las 6:00 a 11:00 horas, existe una reducción promedio del nivel térmico para las primeras 6 horas del día de 6.01 °C y para el periodo comprendido de las 12:00 a las 23:00 horas se tiene una reducción promedio de 10.18 °C, y con un promedio de 5.8 °C para las 24 horas del día, con un número de Reynolds de 50, de tal forma que la aplicación de un ICTA con fines de enfriamiento para la temporada cálida de la localidad de Jojutla Morelos resulta altamente recomendable. Mientras que para los resultados obtenidos para el día más frío del año, el sistema se comporta como calefactor durante las primeras 14 horas del día, teniendo un promedio de incremento en el nivel térmico de 3.4 °C, durante el periodo de las 15:00 a 18:00 horas el sistema funciona como sistema de enfriamiento, reduciendo el nivel térmico promedio para ese periodo en 2.37 °C según los resultados obtenidos para un Reynolds de 100, generando un promedio global para las 24 horas del día como sistema de calefacción de 2 °C.

De forma análoga en las tablas 5.4, 5.5 y las figuras 5.3 y 5.4 se muestran los resultados obtenidos para los días 05/06/2020 (día cálido) y 31/12/2020 (día frío) en la localidad de la Rosilla Durango.

Tabla 5.4. Condiciones de operación y resultados obtenidos por el modelado, en la localidad de la Rosilla Durango, día cálido (05/06/2020)

Hora (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temp. de entrada, amb. (°C)	Temp. de salida Re = 100 (°C)	Temp. de salida Re = 75 (°C)	Temp. de salida Re = 50 (°C)
0	0	54.94	2.02	15.28	10	9.72	9.38
1	0	58.31	2.1	14.76	10.03	9.74	9.4
2	0	63.62	1.92	14.05	9.98	9.69	9.35
3	0	70	1.65	13.24	9.88	9.57	9.22
4	0	76.88	1.42	12.46	9.78	9.46	9.09
5	31.59	78.62	1.24	12.75	10.48	10.25	9.97
6	220.52	60.12	1.65	17.21	14.35	14.57	14.82
7	461.8	43.31	2.51	21.45	16.86	17.36	17.96
8	677.47	31	3.12	24.36	18.12	18.76	19.53
9	858.49	23.56	3.5	26.69	19.18	19.95	20.86
10	916.28	19	3.74	28.56	19.42	20.21	21.16
11	990.15	16	3.83	29.97	19.97	20.83	21.85
12	949.44	13.94	3.86	30.93	19.69	20.51	21.9
13	920.42	12.62	3.88	31.45	19.45	20.24	21.19
14	831.83	12	3.76	31.43	18.85	19.58	20.44
15	672.42	11.94	3.47	30.9	17.77	18.37	18.77
16	455.16	12.81	2.99	29.73	16.13	16.53	17.03
17	248.46	15.38	2.36	27.71	14.18	14.36	14.59
18	50.68	25.94	1.48	23.86	11.63	11.52	11.4
19	0	30.81	0.87	21.05	9.77	9.45	9.07
20	0	33.62	0.53	19.78	9.06	8.65	8.17
21	0	37.38	0.48	18.51	8.78	8.34	7.82
22	0	40.75	0.73	17.1	8.87	8.44	7.94
23	0	43.75	1.13	15.76	8.94	8.53	8.04

Tabla 5.5. Condiciones de operación y resultados obtenidos por el modelado, en la localidad de la Rosilla Durango, día frío (31/12/2020)

Hora (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temp. de entrada, amb. (°C)	Temp. de salida Re = 100 (°C)	Temp. de salida Re = 75 (°C)	Temp. de salida Re = 50 (°C)
0	0	92.75	1.44	-4.56	0.63	-0.32	-1.78
1	0	91.12	1.25	-4.65	0.4	-0.62	-2.09
2	0	92.25	0.88	-5.06	-0.33	-1.31	-2.85
3	0	96	0.83	-5.77	-0.96	-1.95	-3.51
4	0	99.12	0.89	-6.35	-1.36	-2.35	-3.9
5	0	100	1.09	-6.66	-1.38	-2.37	-3.91
6	0	100	1.32	-6.96	-1.42	-2.4	-4
7	76.29	87.81	1.54	-5.21	1.67	0.79	-0.78
8	271.35	62.19	2.34	-1.57	5.79	4.97	3.97
9	456.75	42.62	2.87	1.76	7.24	6.13	4.93
10	602.91	32.88	3.09	4.4	10.04	9.74	9.38
11	721.2	28.12	3.17	6.46	11.52	11.41	11.26
12	726.58	25.19	3.2	8.03	11.95	11.89	11.81
13	684.45	24.19	3.27	8.86	11.75	11.66	11.55
14	562.49	24.44	3.19	8.9	10.86	10.66	10.41
15	381.89	26.69	3.18	7.98	9.13	8.72	8.21
16	163.14	34.31	2.67	5.53	6.82	6.12	5.26
17	10.26	53.94	2.25	-0.05	3.52	2.41	1.06
18	0	68.5	2.31	-2.56	2.22	1.24	-0.26
19	0	82.69	2.05	-4.33	1.08	0.16	-1.36
20	0	91.12	2.39	-5.12	0.65	-0.29	-1.75
21	0	95.75	2.48	-5.42	0.46	-0.47	-1.92
22	0	95.94	2.32	-5.49	0.35	-0.64	-2.12
23	0	92.62	2.54	-5.42	0.47	-0.46	-1.91

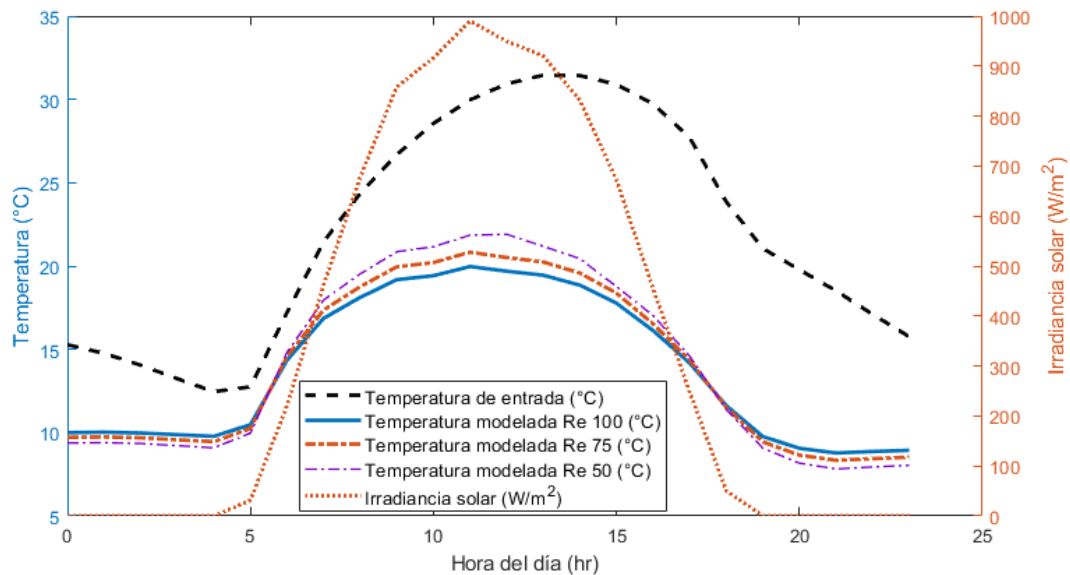


Figura 5.3. Comparativa de temperatura de entrada y salida del ICTA en la localidad de la Rosilla Durango para el día más cálido del año 05/06/2020.

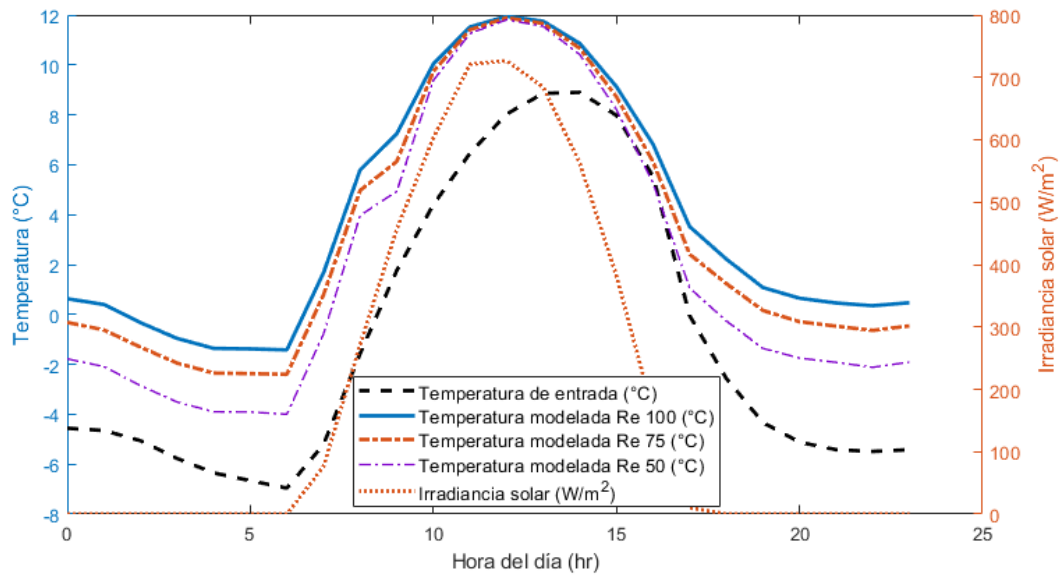


Figura 5.4. Comparativa de temperatura de entrada y salida del ICTA en la localidad de la Rosilla Durango para el día más frío del año 31/12/2020.

El objetivo de modelar el comportamiento del ICTA en diferentes localidades, tiene la finalidad de evaluar por medio del modelado numérico el potencial que tienen estos sistemas para contribuir al confort térmico de edificaciones, según las respectivas condiciones climáticas que se tienen en la localidad estudiada, además, se realiza el modelado numérico para las 2 aplicaciones en condiciones extremas que se pueden dar en un año típico de la actualidad.

Con los resultados es posible determinar en función del potencial de incremento o disminución del nivel térmico obtenido por el modelado, si resulta viable el uso de esta ecotecnología según la ubicación geográfica de la localidad, para fines de calefacción o enfriamiento, o si por el contrario, no resulta provechoso su uso para determinadas localidades o periodos de tiempo a lo largo del año, como es el caso de los resultados observados en la localidad de la Rosilla en Durango, donde la aplicación de un ICTA, resulta satisfactoria para fines de calefacción durante la temporada más fría del año, donde se obtuvo un incremento de temperatura promedio para todo el día 31/12/2020 de 4.76 °C, como se observa en la figura 5.4, además, cumple la función como sistema de calefacción prácticamente las 24 horas del día, evitando temperaturas bajo cero en ciertos periodos de la madrugada para las modelaciones con el número de Reynolds de 100. Sin embargo, para la temporada más cálida de esta localidad, no resulta conveniente el uso de un ICTA, para los periodos horarios comprendidos de las 0:00 a las 7:00 y de las 16:00 a las 23:00, debido a que el sistema tiende a alejarse más del confort térmico durante ese periodo, pero para el periodo comprendido de las 8:00 a las 15:00 horas, el sistema presenta un excelente comportamiento al reducir el nivel térmico del aire ambiente en un promedio de 8.57 °C, manteniendo una temperatura promedio para ese periodo de 20.71 °C según la curva obtenida para un número de Reynolds de 50.

5.3 Análisis paramétrico del ICTA

Con la finalidad de verificar lo reportado en la literatura, además de conocer cómo responde el ICTA respecto a modificar los diferentes parámetros involucrados en su operación, para la primera etapa del análisis paramétrico se plantea modelar diferentes configuraciones de longitud de la tubería enterrada tanto horizontal como verticalmente, además de diferentes diámetros de tubería, todo esto para 2 aplicaciones distintas con 3 flujos laminares cada uno, un escenario como sistema de enfriamiento, y el otro como sistema de calefacción para cada parámetro modificado. Las posibles aplicaciones consideradas para el análisis paramétrico corresponden a las condiciones climatológicas de la hora más cálida para el día más cálido del año 2020 en la localidad del Jicarero en Jojutla M. (13 horas), mientras el otro escenario corresponde a la hora más fría reportada durante el día más frío del año 2020 de la localidad de la Rosilla en Durango (6 horas), en la tabla 5.6 se presentan las condiciones climatológicas para dichas aplicaciones, parámetros que permanecerán constantes para las modelaciones de esta primera etapa del análisis paramétrico.

Tabla 5.6. Parámetros climatológicos seleccionados para el análisis paramétrico

Condición de operación	Irradiancia solar (W/m ²)	Humedad relativa aire (%)	Humedad del suelo (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura ambiente (°C)
Enfriamiento (04/06/2020) Jojutla Mor.	849.46	19.81	30	2.85	37.08
Calefacción (31/12/2020) La Rosilla Dgo.	0	100	30	1.32	-6.96

Las diferentes configuraciones y resultados obtenidos por la modelación se muestran en la tabla 5.7 para la localidad del Jicarero en Jojutla y en la tabla 5.8 para la localidad de la Rosilla en Durango.

Tabla 5.7. Potencial de enfriamiento según las dimensiones del ICTA

Diámetro de la tubería (m)	Profundidad de tubería (m)	Longitud horizontal (m)	ΔT (°C) salida – entrada Re-500	ΔT (°C) salida – entrada Re-250	ΔT (°C) salida – entrada Re-100
Variación de la longitud horizontal					
0.15 (6in)	2	5	-3.03	-9.24	-10.69
0.15 (6in)	2	10	-4.46	-10.18	-10.97
0.15 (6in)	2	15	-4.7	-10.68	-10.87
0.15 (6in)	2	25	-5.77	-11.04	-10.71
Variación de la longitud vertical					
0.15 (6in)	2	5	-3.03	-9.24	-10.69
0.15 (6in)	3	5	-7.47	-10.23	-11.73
0.15 (6in)	4	5	-7.36	-10.34	-11.86
Variación del Diámetro					
0.1 (4in)	2	5	-4.3	-10.15	-11.75
0.15 (6in)	2	5	-3.03	-9.24	-10.69
0.20 (8in)	2	5	-2.76	-8.18	-9.79
0.25 (10in)	2	5	-2.77	-6.41	-9.25

Tabla 5.8. Potencial de calentamiento según las dimensiones del ICTA

Diámetro de la tubería (m)	Profundidad de tubería (m)	Longitud horizontal (m)	ΔT (°C) salida – entrada Re-500	ΔT (°C) salida – entrada Re-250	ΔT (°C) salida – entrada Re-100
Variación de la longitud horizontal					
0.15 (6in)	2	5	0.41	5.32	6.55
0.15 (6in)	2	10	1.74	5.54	6.33
0.15 (6in)	2	15	1.3	5.61	5.86
0.15 (6in)	2	25	1.79	5.46	3.97
Variación de la longitud vertical					
0.15 (6in)	2	5	0.41	5.32	6.55
0.15 (6in)	3	5	5.04	6.63	8.29
0.15 (6in)	4	5	6.19	8.1	10.11
Variación del Diámetro					
0.1 (4in)	2	5	1.55	6.1	7.34
0.15 (6in)	2	5	0.41	5.32	6.55
0.2 (8in)	2	5	-0.19**	4.75	6.06
0.25 (10in)	2	5	-0.3**	4.32	5.23

***Nota: Los valores marcados con ** en la tabla 5.8, representan condiciones de operación totalmente desfavorables, ya que el ICTA pierde su propósito como sistema de calentamiento al reducir el nivel térmico del aire de salida en lugar de incrementarlo para fines de calefacción.*

Debido a lo observado en las tablas 5.7 y 5.8, se optó por evaluar el ICTA para ambos casos (enfriamiento y calentamiento) según el potencial “ ΔT ” obtenido respecto al incremento de la variable evaluada durante el análisis, dichas configuraciones adicionales con sus respectivos resultados se muestran en la tabla 5.9.

Tabla 5.9. Configuraciones recomendadas para la instalación de ICTA

Diámetro de la tubería (m)	Profundidad de tubería (m)	Longitud horizontal (m)	ΔT (°C) salida – entrada Re-500	ΔT (°C) salida – entrada Re-250	ΔT (°C) salida – entrada Re-100
Enfriamiento (Jojutla, M.)					
0.15 (6in)	3	15	-8.95	-11.72	-11.74
0.15 (6in)	4	15	-9.82	-12.58	-11.78
Calentamiento (La Rosilla, Dgo.)					
0.15 (6in)	3	15	5.32	7.68	6.86
0.15 (6in)	4	15	6.71	9.61	8.65

La siguiente etapa del análisis paramétrico consiste en evaluar la variación en el comportamiento al modificar los parámetros climatológicos de humedad relativa del aire, la velocidad del viento, así como la variación en la humedad del suelo, debido a que en diversos estudios como el presentado por Mathias Cuny et al. (2020) han reportado un aumento en el potencial de los ICTA debido al incremento de la humedad en el suelo [96].

Los parámetros geométricos a utilizar serán las dimensiones de 2 metros de profundidad por 5 metros de extensión horizontal, la irradiancia solar no es modificada, debido a que el análisis se centra en evaluar el cambio de una sola variable según condiciones reales de operación, de tal forma que, la condición de enfriamiento perdería su propósito si se modifica la irradiancia solar, mismo caso con la operación para fines de calentamiento, los resultados para el ICTA con fines de enfriamiento se presentan en la tabla 5.10 y en la tabla 5.11 los resultados para fines de calentamiento.

Tabla 5.10. Análisis paramétrico del potencial de enfriamiento según las condiciones climatológicas del ICTA

Humedad relativa del aire (%)	Humedad del suelo (%)	Velocidad del viento (m/s)	ΔT (°C) salida – entrada Re-500	ΔT (°C) salida – entrada Re-250	ΔT (°C) salida – entrada Re-100
Variación de la humedad relativa del aire					
0	32	2.85	-4.59	-10.73	-12.69
19.81	32	2.85	-3.03	-9.24	-10.69
40	32	2.85	-1.6	-7.01	-8.66
60	32	2.85	-0.11	-4.73	-5.59
80	32	2.85	1.39**	-2.43	-2.33
100	32	2.85	2.88**	-0.11	1.03*
Variación de la humedad del suelo					
19.81	0	2.85	-1.58	-6.84	-9.84
19.81	10	2.85	-1.95	-7.81	-10.64
19.81	20	2.85	-1.51	-8.63	-10.86
19.81	32	2.85	-3.03	-9.24	-10.69
19.81	40	2.85	-3.31	-9.51	-10.71
19.81	50	2.85	-3.38	-9.44	-10.53
Variación de la velocidad del viento					
19.81	32	0.5	4.48**	2.41**	4.8**
19.81	32	1	1.11**	-2.86	-2.95
19.81	32	2	-1.89	-7.44	-9.15
19.81	32	2.85	-3.03	-9.24	-10.69
19.81	32	4	-4.06	-10.29	-12.02

Tabla 5.11. Análisis paramétrico del potencial de calentamiento según las condiciones climatológicas del ICTA

Humedad relativa del aire (%)	Humedad del suelo (%)	Velocidad del viento (m/s)	ΔT (°C) salida – entrada Re-500	ΔT (°C) salida – entrada Re-250	ΔT (°C) salida – entrada Re-100
Variación de la humedad relativa del aire					
0	30	1.32	0.71	5.61	6.97
20	30	1.32	0.67	5.55	6.88
40	30	1.32	0.64	5.49	6.8
60	30	1.32	0.6	5.44	6.72
80	30	1.32	0.56	5.38	6.63
100	30	1.32	0.41	5.32	6.55
Variación de la humedad del suelo					
100	0	1.32	0.19	4.96	6.78
100	10	1.32	0.45	5.59	7.6
100	20	1.32	0.26	4.9	6.28
100	30	1.32	0.41	5.32	6.55
100	40	1.32	0.76	5.66	6.78
100	50	1.32	0.65	5.42	6.38
Variación de la velocidad del viento					
100	30	0.5	0.05	4.59	5.5
100	30	1.32	0.41	5.32	6.55
100	30	2	0.7	5.59	6.93
100	30	3	0.84	5.8	7.24
100	30	4	0.92	5.93	7.41

5.3.1 Análisis paramétrico para evaluar el efecto de la humedad del suelo

Con la finalidad de tener una mayor certeza en los resultados obtenidos para el análisis paramétrico según la humedad del suelo en el potencial térmico de operación del ICTA, debido a que la humedad del suelo se considera uno de los parámetros más críticos para la operación de un ICTA. Con ese objetivo, se cambiaron las condiciones de prueba para fines de enfriamiento en la localidad del Jicarero en Jojutla Morelos de las 13:00 horas anteriormente utilizadas, al horario de las 15:00 horas. Para fines de calefacción en la Rosilla Durango, ahora se modelaron las condiciones de las 20:00 horas, anteriormente se modeló el horario de las 6:00 horas.

Adicionalmente, para evaluar el efecto de la humedad del suelo sobre el desempeño del ICTA, los intervalos de incremento en el porcentaje de humedad del suelo son del 5 %. Se realizaron modelaciones para 2 flujos laminares (Reynolds de 250 y 500).

En la tabla 5.12 y figura 5.5 se muestran los resultados para fines de enfriamiento (en la tabla 5.12 independientemente de que todos los valores deberían tener signo negativo, debido a que son

perdidas del nivel térmico, el ΔT se reporta como valor absoluto $|\Delta T|$), mientras que en la tabla 5.13 y figura 5.6 se presentan los resultados para fines de calefacción.

Tabla 5.12. Análisis paramétrico del efecto de la humedad del suelo para fines de enfriamiento (Jojutla Mor. 04/06/2020 15:00)

Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Humedad del suelo (%)	Velocidad del viento (m/s)	$ \Delta T $ (°C) para Re=250	$ \Delta T $ (°C) para Re=500
492.62	19.75	0	3.17	7.73	3.96
492.62	19.75	5	3.17	8	4.17
492.62	19.75	10	3.17	8.57	4.61
492.62	19.75	15	3.17	9.27	5.21
492.62	19.75	20	3.17	9.91	5.83
492.62	19.75	25	3.17	10.49	6.51
492.62	19.75	30	3.17	10.69	6.76
492.62	19.75	35	3.17	10.86	6.99
492.62	19.75	40	3.17	10.97	7.15
492.62	19.75	45	3.17	11.01	7.22
492.62	19.75	50	3.17	11.05	7.28

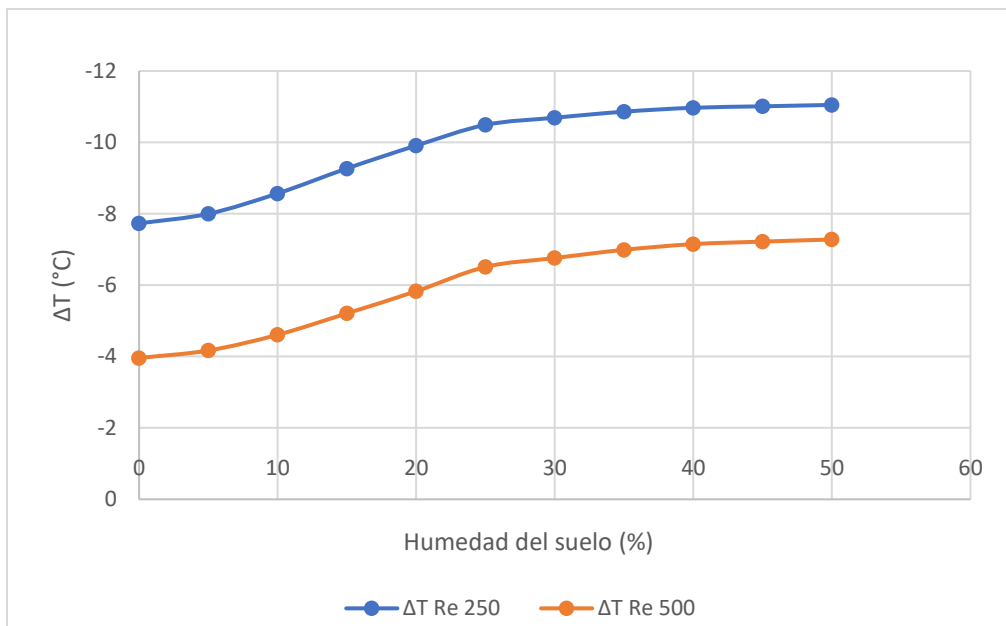


Figura 5.5. Efecto de la humedad del suelo en el potencial de operación de un ICTA para fines de enfriamiento para 2 flujos laminares (Jojutla Mor. 04/06/2020 15:00).

Tabla 5.13. Análisis paramétrico del efecto de la humedad del suelo para fines de calefacción (La Rosilla Dgo 31/12/2020 20:00)

Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Humedad del suelo (%)	Velocidad del viento (m/s)	\Delta T (°C) para Re=250	\Delta T (°C) para Re=500
0	91.12	0	2.39	5.59	2.53
0	91.12	5	2.39	5.74	2.98
0	91.12	10	2.39	5.74	3.38
0	91.12	15	2.39	5.45	3.65
0	91.12	20	2.39	5.15	3.76
0	91.12	25	2.39	5.3	3.87
0	91.12	30	2.39	5.56	4.08
0	91.12	35	2.39	5.8	4.29
0	91.12	40	2.39	5.89	4.36
0	91.12	45	2.39	5.77	4.28
0	91.12	50	2.39	5.66	4.2

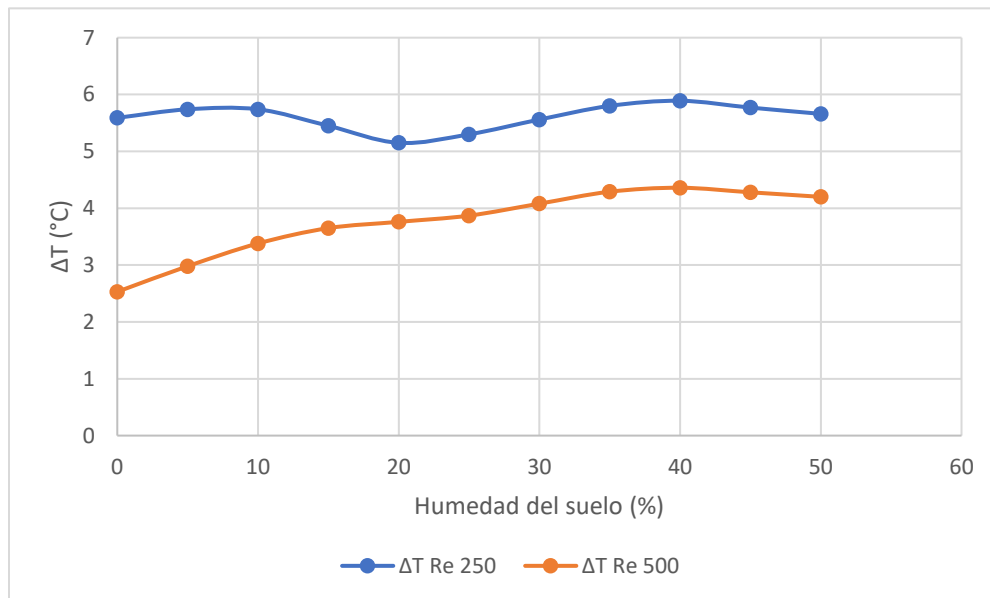


Figura 5.6. Efecto de la humedad del suelo en el potencial de operación de un ICTA para fines de calefacción para 2 flujos laminares (La Rosilla Dgo 31/12/2020 20:00).

Los resultados obtenidos para fines de enfriamiento reportan que el potencial de operación del ICTA se incrementa al aumentar la humedad del suelo desde un suelo totalmente seco hasta una humedad del 50 %, para ambos flujos laminares evaluados, para fines de calefacción el flujo laminar correspondiente a un número de Reynolds de 500 también presentó una tendencia clara de aumento en el potencial del ICTA a medida que se incrementa la humedad del suelo, sin embargo, para flujos menores de operación, no hay una tendencia clara de comportamiento, debido a que los resultados oscilan y se podría considerar que el potencial permanece constante para el flujo laminar correspondiente al número de Reynolds de 250.

Este comportamiento es atribuido a las pérdidas de potencial generadas por el último tramo del recorrido, donde la temperatura del suelo a menos de 1.5 m de profundidad genera una pérdida o

ganancia de energía que no beneficia al potencial térmico (ΔT) obtenido en la zona más profunda del intercambiador, sumando a eso que el rendimiento para fines de calefacción es en general menor para fines de enfriamiento y que la velocidad el flujo para un Reynolds de 250 es significativamente menor que para un Reynolds de 500. Aun así, es posible considerar que el potencial térmico de operación de un ICTA se incrementa con el aumento de la humedad del suelo.

5.4 Análisis de la longitud aislada en la tubería de salida del ICTA

Durante el proceso de análisis de resultados del análisis paramétrico, particularmente en las modelaciones con más de 2 metros de profundidad, se observó un fenómeno interesante según el contorno de temperaturas resultante a partir de aproximadamente los 2 metros de profundidad (figura 5.7).

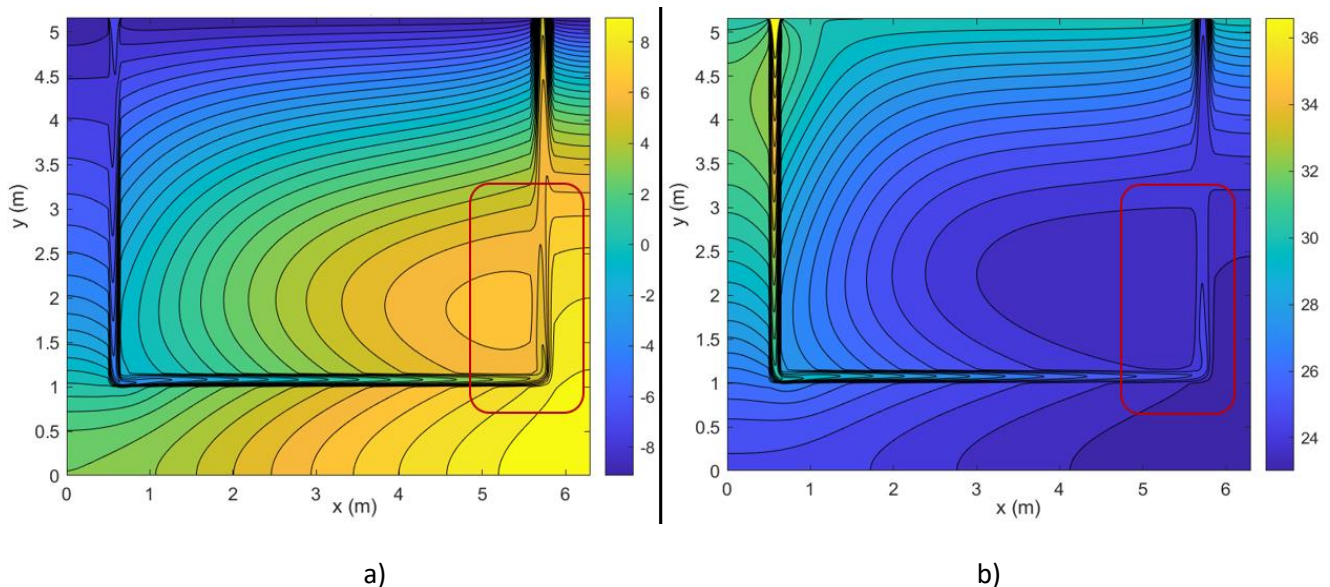


Figura 5.7. Distribución de temperatura del ICTA para fines de calefacción (a) y enfriamiento (b) con una profundidad de tubería de 4 m y un número de Reynolds de 250.

Marcado con un recuadro en color rojo en la figura 5.7, es posible observar un área estable en temperaturas en la última zona del recorrido vertical en ascenso al interior de una edificación, en el año 2014, Xamán et al., determinaron numéricamente que el uso de un material aislante en la tubería de salida, incrementa el potencial tanto de enfriamiento como de calefacción del ICTA, además, establecieron que el espesor adecuado para el material aislante en la tubería de salida es de 0.05 m (2 in) [45], sin embargo, y debido a lo observado en la figura 5.7, es probable que este beneficio solo se dé en los últimos 2 metros del recorrido vertical ascendente del flujo de aire dentro del ICTA, asimismo, la zona marcada en rojo de la figura 5.7, representa también una oportunidad para obtener un mayor beneficio del intercambio térmico, debido a que la zona de la derecha del recuadro rojo, representa también la máxima y la mínima temperatura alcanzadas por el sistema respectivamente, de tal forma que, en dicha zona, es posible propiciar un incremento en el potencial ya sea de enfriamiento y/o calentamiento respectivamente.

Para poner a prueba la hipótesis anterior, se realizaron modelaciones del ICTA, con diferentes longitudes de material aislante en la tubería de salida, conservando siempre el material aislante durante los primeros 1.5 metros de profundidad, hasta los 4 metros completamente aislados, para un ICTA de 4 metros de profundidad de la tubería y 5 metros de longitud horizontal, de forma análoga al análisis paramétrico, se estableció realizar el análisis para ambas condiciones posibles de operación, enfriamiento y calentamiento según las condiciones reales de operación establecidas en la tabla 5.

Esta vez se modelaron 4 flujos laminares correspondientes a un número de Reynolds de 150, 220, 290 y 500 respectivamente, de forma análoga al análisis paramétrico se establece como el potencial de operación del ICTA en función de la diferencia de temperatura obtenida en la salida respecto a la temperatura de entrada al sistema (temperatura ambiente). En la tabla 5.14 se presentan los resultados para las modelaciones según las condiciones climatológicas de la hora más cálida para el año 2020 en la localidad de Jojutla Morelos México, el ICTA operando con fines de enfriamiento.

Tabla 5.14. Resultados del potencial de enfriamiento según la longitud aislada de la tubería de salida del ICTA

Profundidad de la tubería (m)	Longitud aislada (m)	ΔT (°C) salida – entrada Re-500	ΔT (°C) salida – entrada Re-290	ΔT (°C) salida – entrada Re-220	ΔT (°C) salida – entrada Re-150
4	4	-7.36	-8.73	-10.4	-11.62
4	3.5	-7.42	-8.78	-10.45	-11.65
4	3	-7.46	-8.82	-10.49	-11.68
4	2.5	-7.49	-8.85	-10.53	-11.69
4	2	-7.53	-8.89	-10.56	-11.71
4	1.5	-7.57	-8.92	-10.59	-11.7

Para la operación del ICTA con fines de calentamiento, en la tabla 5.15 se muestran los resultados.

Tabla 5.15. Resultados del potencial de calentamiento según la longitud aislada del tubo de salida del ICTA

Profundidad de la tubería (m)	Longitud aislada (m)	ΔT (°C) salida – entrada Re-500	ΔT (°C) salida – entrada Re-290	ΔT (°C) salida – entrada Re-220	ΔT (°C) salida – entrada Re-150
4	4	6.19	7.69	8.5	9.57
4	3.5	6.2	7.69	8.52	9.61
4	3	6.23	7.71	8.54	9.64
4	2.5	6.25	7.72	8.56	9.67
4	2	6.28	7.74	8.59	9.69
4	1.5	6.3	7.75	8.6	9.69

Los resultados para la longitud aislada, muestran para ambos casos (enfriamiento y calentamiento), que es posible reducir el uso del material aislante de 1.5 a 2 metros de

profundidad para sistemas con más de 2 metros de profundidad, ya que existe un pequeño beneficio (aunque puede considerarse despreciable) en la operación, según los resultados obtenidos en las tablas 5.14 y 5.15, independientemente de que se considere despreciable el beneficio obtenido, el ahorro en el uso de material aislante puede representar un mayor beneficio sin pérdidas de rendimiento del ICTA.

5.5 Proyecciones del potencial de operación de ICTA para los 4 climas predominantes de México

Como se mencionó anteriormente en México existen 4 climas que predominan con una extensión territorial combinada del 92.34 % del área total del país, por esta razón se realizaron modelaciones para 2 localidades diferentes representativas de los 4 climas predominantes. Se consideraron las condiciones climatológicas del día más cálido y más frío del año 2022 para cada localidad (Tabla 5.16), de tal forma que, se modelaron 16 días completos, 4 por región climática para 2 localidades diferentes, pero se evaluó el potencial térmico para fines de enfriamiento y de calefacción respectivamente, considerando un ICTA de 3 m de profundidad por 15 m de longitud horizontal, ya que estas fueron las dimensiones óptimas obtenidas y recomendadas por el estudio paramétrico realizado previamente en esta investigación [97].

Tabla 5.16. Ubicaciones representativas para los 4 climas más comunes de México

Tipo de clima	Entidad, municipio, comunidad y/o ciudad representativa
Seco y/o semiseco (Con un 32.02 % de la extensión total de México)	<ul style="list-style-type: none"> • Fronteras, Sonora • San Luis Potosí, San Luis Potosí
Cálido subhúmedo (Con un 28.87 % de la extensión total de México)	<ul style="list-style-type: none"> • Mérida, Yucatán • Tlacotalpan, Veracruz
Muy seco o seco desértico (Con un 21.09 % de la extensión total de México)	<ul style="list-style-type: none"> • Ciudad Juárez, Chihuahua • Guayaquil, Baja California norte
Templado subhúmedo (Con un 10.36 % de la extensión total de México)	<ul style="list-style-type: none"> • La Rosilla, Guanaceví Durango • Santo Tomás Ajusco, Tlalpan ciudad de México

Los resultados obtenidos por las modelaciones para cada zona climática se presentan en las siguientes páginas, tablas (5.17 – 5.32) y figuras (5.8 – 5.23).

Tabla 5.17. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en Fronteras, Sonora (12/Junio/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	20.56	2.05	24.9	17.62	-7.28
1	0	26.06	2.62	23.95	17.51	-6.44
2	0	35.19	3.35	23.34	17.68	-5.66
3	0	45	3.32	22.86	17.77	-5.09
4	0	53.12	2.64	22.15	17.7	-4.45
5	21.14	55.81	2.18	21.99	17.76	-4.23
6	179.54	48.62	2.61	24.39	19.07	-5.32
7	385.73	37.31	3.02	27.52	20.49	-7.03
8	593.34	28.5	3.13	30.5	22.21	-8.29
9	780.23	22.94	3.23	32.95	24.51	-8.44
10	911.41	18.12	3.29	35.42	26.61	-8.81
11	968.18	15.12	3.36	37.33	28	-9.33
12	956.84	13.38	3.59	38.58	28.42	-10.16
13	822.8	12.12	3.99	39.37	27.79	-11.58
14	667.09	11.19	4.48	39.75	26.91	-12.84
15	434.52	10.75	5.02	39.44	26.44	-13
16	255.34	10.69	5.76	38.62	24.54	-14.08
17	164.34	10.94	6.63	37.36	23.01	-14.35
18	58.5	12.25	6.29	35.33	21.37	-13.96
19	0	15.94	4.63	31.59	20.03	-11.56
20	0	18.88	4.52	29.79	19.49	-10.3
21	0	21.81	4.45	28.37	19.02	-9.35
22	0	24.88	3.96	26.88	18.64	-8.24
23	0	27.94	3.19	25.38	18.15	-7.23
					ΔT Promedio	-9.04

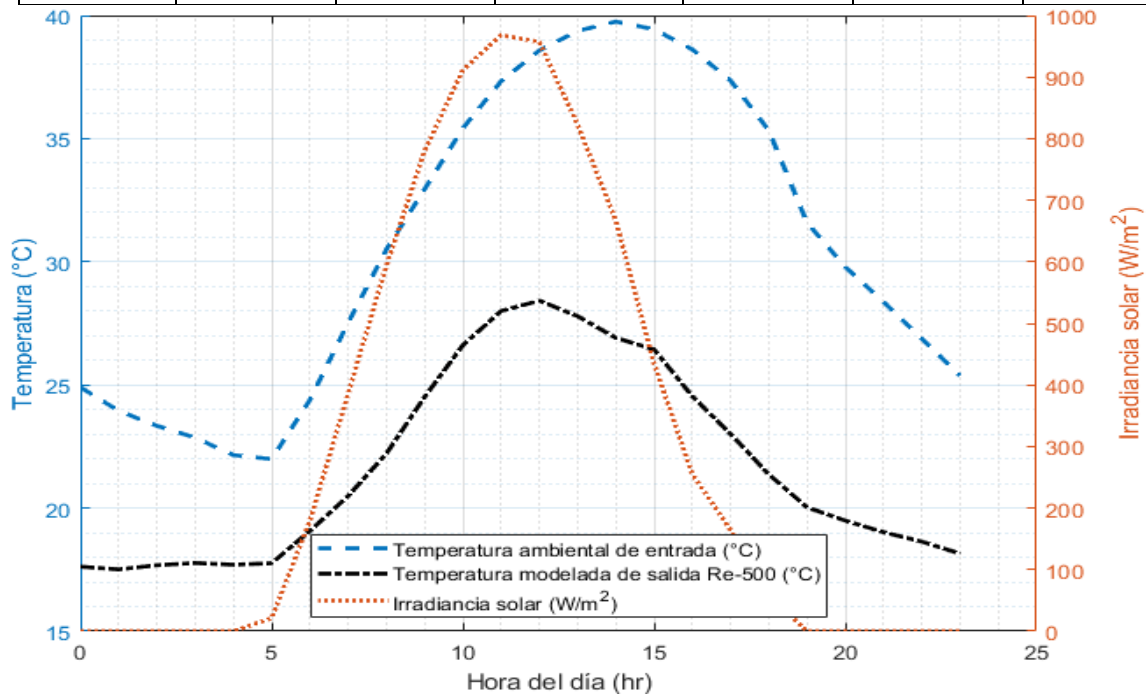


Figura 5.8. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en Fronteras Sonora.

Tabla 5.18. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en Fronteras, Sonora (04/febrero/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	71.69	4.76	-4.27	0.65	4.92
1	0	75.31	5.26	-4.7	0.06	4.76
2	0	78	5.43	-4.99	-0.44	4.55
3	0	79.31	5.33	-5.13	-0.87	4.26
4	0	80.25	5.16	-5.27	-1.18	4.09
5	0	80.44	5.36	-5.31	-1.41	3.9
6	0	79.81	5.97	-5.24	-1.28	3.96
7	56.84	72.56	6.97	-4.13	1.78	5.91
8	277.32	52.19	9.09	-0.99	5.27	6.26
9	493.02	37.62	10.69	1.85	8.19	6.34
10	661.17	30.06	10.85	4.01	10.37	6.36
11	766.52	24.44	10.79	5.7	11.9	6.2
12	804.38	20.94	10.76	6.89	12.78	5.89
13	770.88	19	10.83	7.47	12.93	5.46
14	669.56	18.62	10.9	7.37	12.54	5.17
15	503.87	19.06	10.92	6.75	11.47	4.72
16	294.94	21.06	10.66	5.26	9.62	4.36
17	68.91	26.81	9.29	2.51	6.72	4.21
18	0	33.94	8.63	0.24	4.71	4.47
19	0	39.44	8.57	-1.02	3.61	4.63
20	0	42.94	8.54	-1.84	2.88	4.72
21	0	45.69	8.43	-2.52	2.16	4.68
22	0	48.44	8.03	-3.15	1.44	4.59
23	0	50.31	7.63	-3.64	1.04	4.68
					ΔT Promedio	4.96

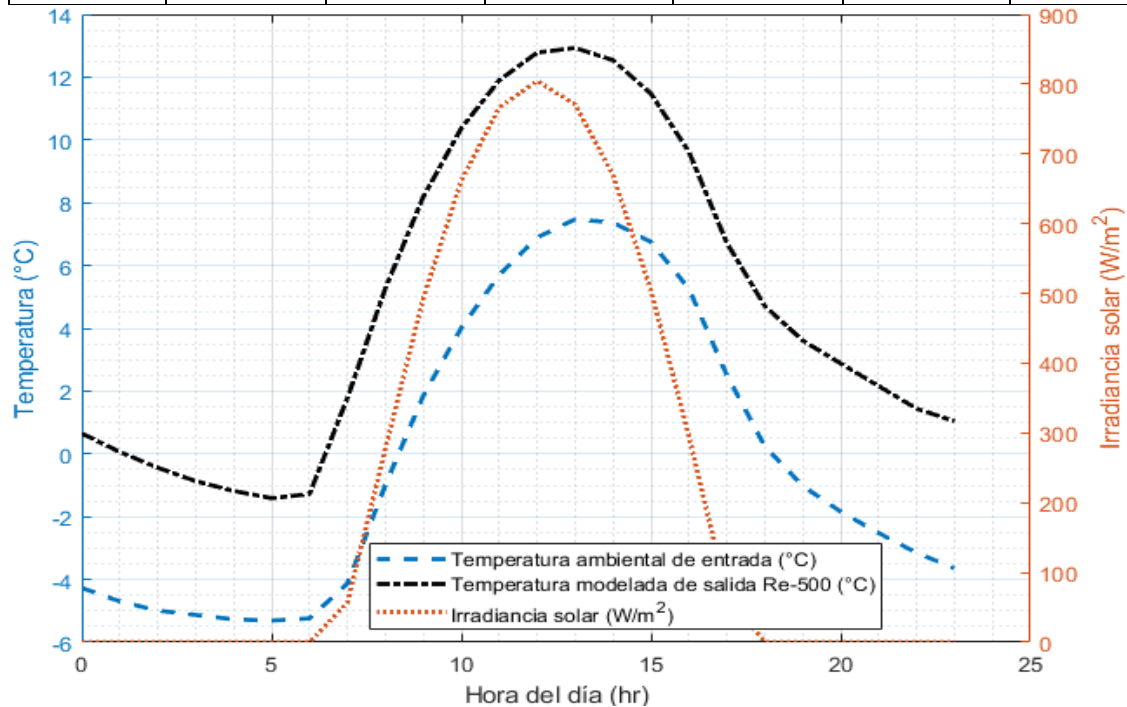


Figura 5.9. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en Fronteras Sonora.

Tabla 5.19. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en San Luis Potosí (08/Mayo/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	36.75	0.57	18.61	15.33	-3.28
1	0	37.31	1.09	17.8	14.98	-2.82
2	0	38.31	1.79	16.56	14.65	-1.91
3	0	39.31	2.44	15.25	14.12	-1.13
4	0	39.75	2.88	14.22	13.94	-0.28
5	49.45	38.12	3.07	14.3	14.1	-0.2
6	273.64	28.31	4.32	18.65	16.04	-2.61
7	518.83	17.25	6.13	23.4	18.33	-5.07
8	738.8	11.5	7.3	27.13	19.92	-7.21
9	907.88	9.56	6.91	29.52	21.43	-8.09
10	1007.77	8.62	6.41	31.35	23.35	-8
11	1026.55	8.38	5.98	32.69	24.63	-8.06
12	964.97	8.31	5.68	33.52	25.03	-8.49
13	885.47	8.25	5.54	33.84	24.84	-9
14	698.84	8.31	5.64	33.64	23.49	-10.15
15	491.42	8.62	5.72	32.92	21.75	-11.17
16	272.2	9.12	5.65	31.62	20.27	-11.35
17	77.8	10.94	4.66	29.21	18.87	-10.34
18	0	15.44	3.81	25.19	17.4	-7.79
19	0	17.56	4.77	23.99	16.87	-7.12
20	0	20.12	4.84	22.8	16.55	-6.25
21	0	23.31	4.23	21.55	16.21	-5.34
22	0	27.75	3.48	20.05	15.87	-4.18
23	0	32.25	2.82	18.78	15.5	-3.28
					ΔT Promedio	-5.96

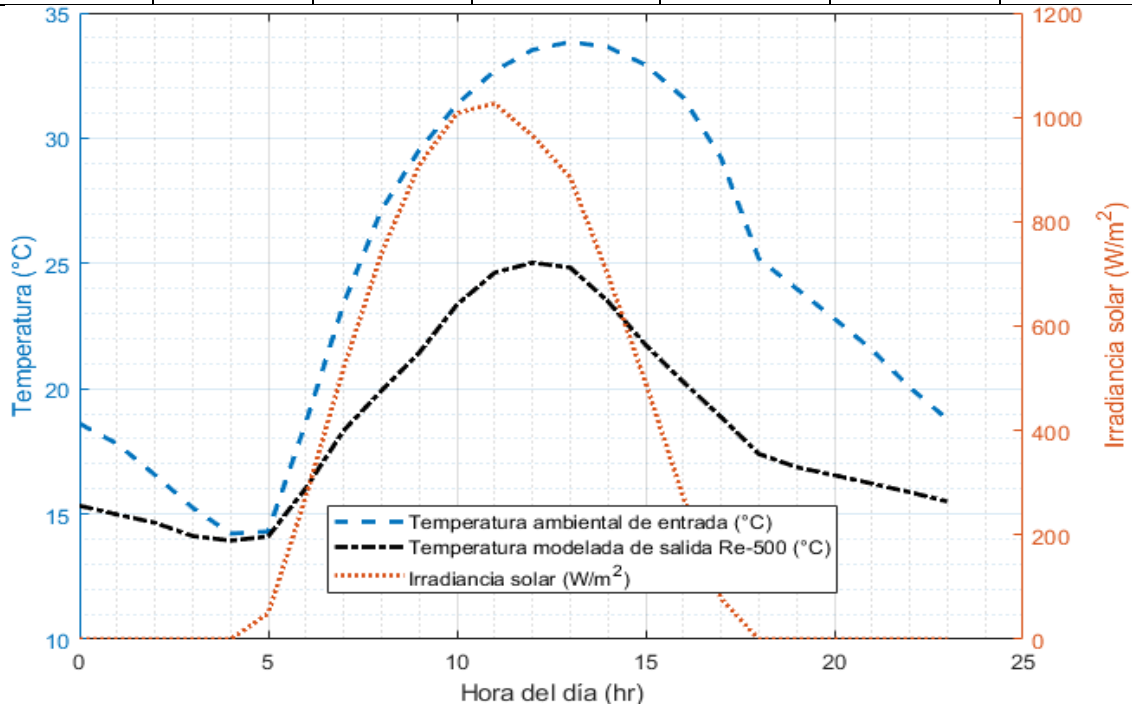


Figura 5.10. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en San Luis Potosí.

Tabla 5.20. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en San Luis Potosí (13/Febrero/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	85.19	5.96	5.47	10.02	4.55
1	0	85.12	5.17	4.53	9.56	5.03
2	0	85	4.61	4.26	9.26	5
3	0	85.44	4.26	4.15	9.05	4.9
4	0	86.81	4.1	3.93	8.88	4.95
5	0	88.94	4.17	3.7	8.64	4.94
6	26.23	88.25	5.01	4.02	8.94	4.92
7	107.6	79.62	6.4	5.83	10.82	4.99
8	215.89	69.19	6.78	7.95	12.6	4.65
9	333.81	61.06	6.7	9.71	13.53	3.82
10	465.15	55.19	6.55	11.09	14.38	3.29
11	498.45	50.38	6.39	12.36	14.91	2.55
12	587.81	47	6.12	13.26	15.25	1.99
13	581.4	45.19	5.84	13.69	15.66	1.97
14	473.62	44.69	5.96	13.62	15.27	1.65
15	308.98	46.94	6.45	12.69	14.42	1.73
16	144.24	52.5	6.94	10.87	13.31	2.44
17	16.27	61.25	6.74	8.49	11.98	3.49
18	0	67.5	6.53	6.8	10.71	3.91
19	0	70.69	6.08	5.69	10.02	4.33
20	0	72.38	5.38	4.94	9.58	4.64
21	0	73.38	4.82	4.51	9.12	4.61
22	0	74.56	4.32	4.18	8.87	4.69
23	0	76	4.02	3.95	8.57	4.62
					ΔT Promedio	3.9

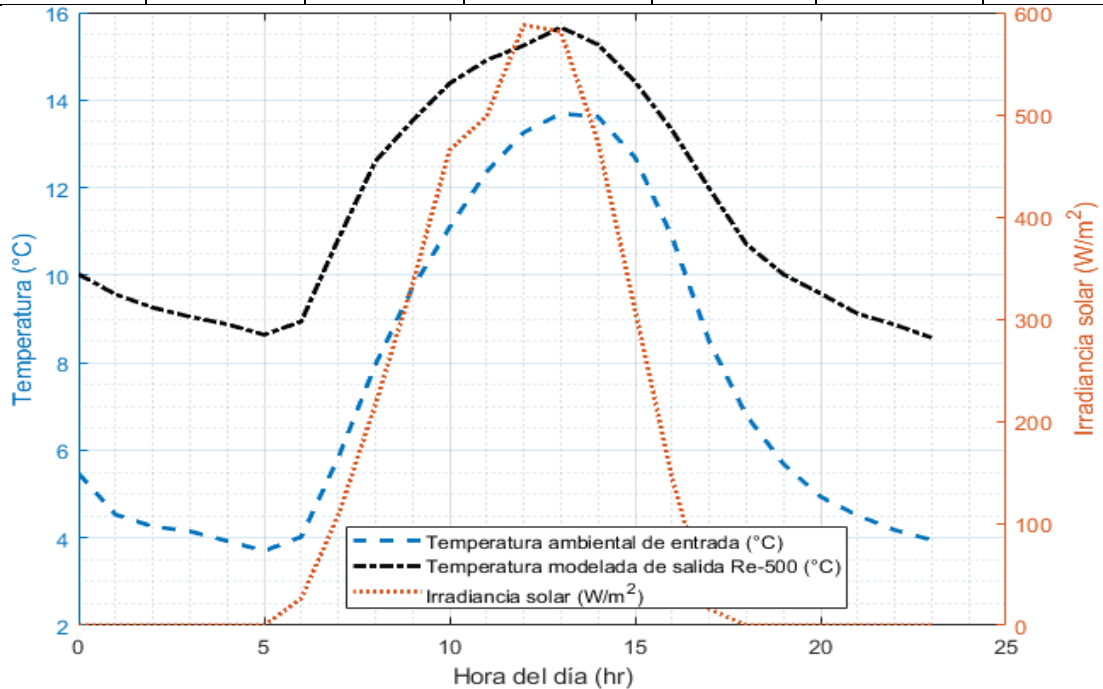


Figura 5.11. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en San Luis Potosí.

Tabla 5.21. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en Mérida, Yucatán (08/Mayo/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m2)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	72.81	0.93	27.72	25.61	-2.11
1	0	75.12	0.89	27.33	25.52	-1.81
2	0	77	1.01	27.08	25.48	-1.6
3	0	79.31	1.1	26.82	25.5	-1.32
4	0	82.31	1.15	26.48	25.51	-0.97
5	13.9	85.12	1.14	26.13	25.54	-0.59
6	154.7	82.69	1.48	26.78	26.52	-0.26
7	367.63	70.81	1.7	28.9	27.92	-0.98
8	582.88	56.75	1.66	31.56	29.47	-2.09
9	771.66	46.44	1.56	34.21	30.17	-4.04
10	885.43	39.44	1.32	36.48	34.41	-2.07
11	923.7	34.44	0.96	38.26	37.93	-0.33
12	898.63	31.12	0.56	39.51	42.03	2.52
13	807.89	29.19	0.46	40.21	41.84	1.63
14	675.97	28.81	0.82	40.19	36.04	-4.15
15	484.98	29.81	1.25	39.5	31.37	-8.13
16	295.5	33	1.65	38.05	29.45	-8.6
17	106.29	38.69	1.83	36.15	28.1	-8.05
18	6.53	46.62	1.71	34.01	27.2	-6.81
19	0	53.62	1.48	32.31	26.79	-5.52
20	0	58.94	1.35	31.19	26.52	-4.67
21	0	61.19	1.32	30.62	26.38	-4.24
22	0	63.44	1.27	30.19	26.33	-3.86
23	0	65.44	1.33	29.82	26.27	-3.55
					ΔT Promedio	-2.98

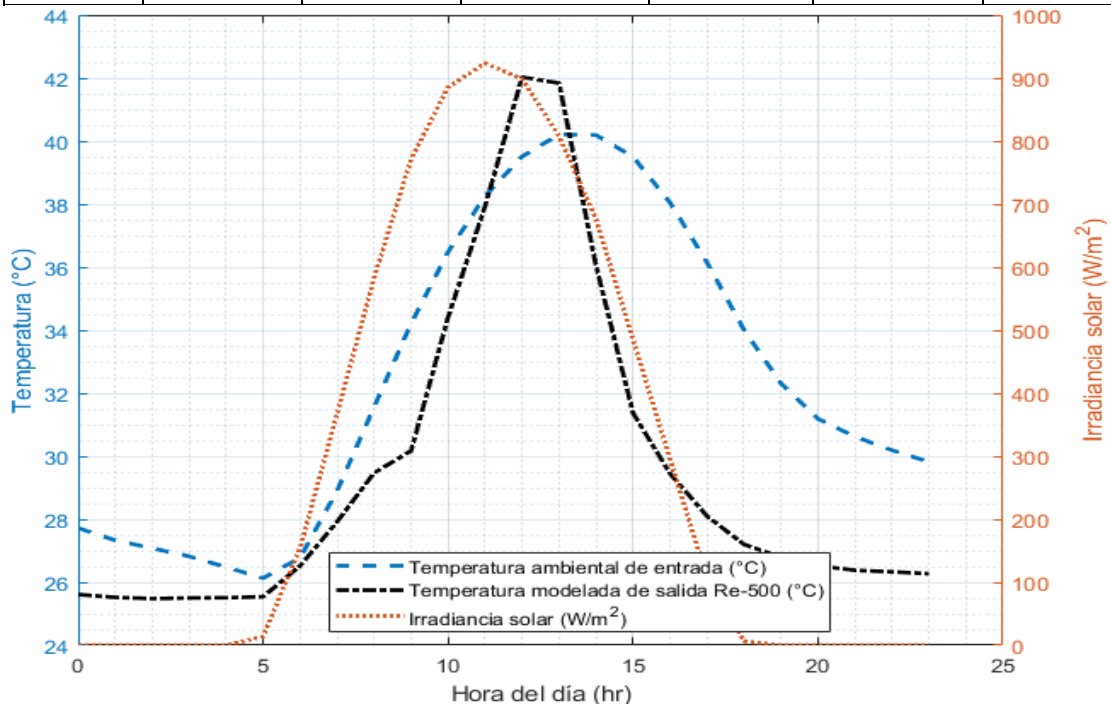


Figura 5.12. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en Mérida, Yucatán.

Tabla 5.22. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en Mérida, Yucatán (18/Enero/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	82.62	1.1	15.67	19.47	3.8
1	0	83.81	1.12	15.39	19.3	3.91
2	0	84.31	1.14	15.25	19.31	4.06
3	0	84.56	1.1	15.16	19.3	4.14
4	0	84.94	1.02	15.09	19.08	3.99
5	0	86.38	1.12	14.87	18.96	4.09
6	8.23	88.12	1.45	14.62	19.06	4.44
7	145.8	81.06	1	15.82	21.44	5.62
8	375.64	62.62	0.82	19.22	24.64	5.42
9	443.74	46.88	1.32	22.71	25.34	2.63
10	725.28	40.75	1.19	24.33	27.58	3.25
11	805.49	35.81	1.04	25.69	28.77	3.08
12	817.42	31.94	0.91	26.89	29.54	2.65
13	752.62	29.69	0.86	27.65	29.43	1.78
14	622.15	29.06	0.94	27.82	28.32	0.5
15	435.34	30	1.06	27.41	26.75	-0.66
16	210.16	33.75	1.14	26.27	24.98	-1.29
17	23.87	47.69	1.08	23.56	23.3	-0.26
18	0	60	1.43	21.1	22.65	1.55
19	0	64.62	1.63	20.58	22.33	1.75
20	0	71.81	1.26	19.72	22.11	2.39
21	0	78.38	1.15	18.98	22.02	3.04
22	0	83.38	1.21	18.47	21.97	3.5
23	0	87.25	1.26	18.09	21.88	3.79
					ΔT Promedio	2.8

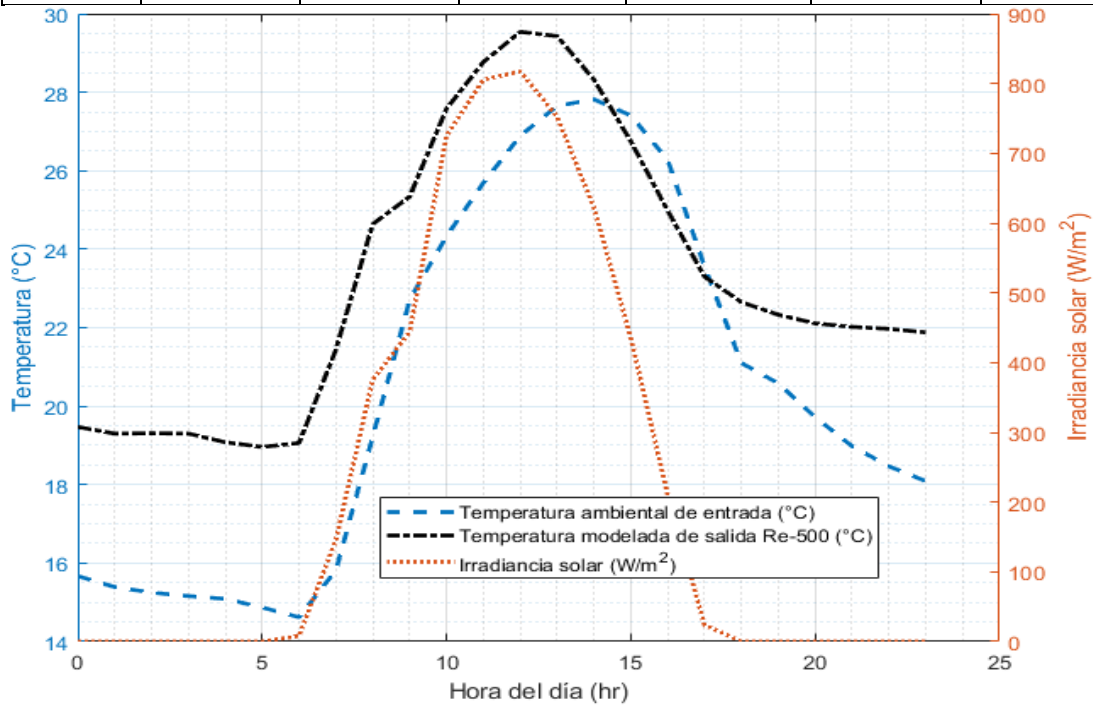


Figura 5.13. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en Mérida, Yucatán.

Tabla 5.23. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en Tlacotalpan, Veracruz (08/Mayo/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	67.38	4.49	29.03	25.78	-3.25
1	0	68	4.78	28.58	25.65	-2.93
2	0	69.5	4.9	28.09	25.61	-2.48
3	0	71.88	4.91	27.55	25.55	-2
4	0	74.62	4.85	27.05	25.28	-1.77
5	0	76.69	4.82	26.66	25.1	-1.56
6	72.13	74.75	5.23	27.12	25.37	-1.75
7	293.09	62.56	6.03	29.44	26.55	-2.89
8	519.88	47.88	5.79	32.73	28.01	-4.72
9	716.68	38.5	5.03	35.55	29.07	-6.48
10	866.59	32.12	4.42	37.94	29.75	-8.19
11	910.05	27.62	3.99	39.87	30.96	-8.91
12	938.73	24.75	3.84	41.23	31.92	-9.31
13	910.9	23.31	4.16	42.07	32.41	-9.66
14	807.09	23.44	4.92	42.25	33.01	-9.24
15	635.5	25.06	5.93	41.73	31.46	-10.27
16	423.59	28.12	7.17	40.55	29.79	-10.76
17	195.81	32.69	8.22	38.71	28.69	-10.02
18	25.01	39.19	8.56	36.16	27.6	-8.56
19	0	46	9.13	33.78	26.9	-6.88
20	0	51.94	9.22	32.1	26.12	-5.98
21	0	56.62	8.7	30.91	25.88	-5.03
22	0	59.94	7.35	30.14	25.81	-4.33
23	0	63.12	6.2	29.38	25.74	-3.64
					ΔT Promedio	-5.86

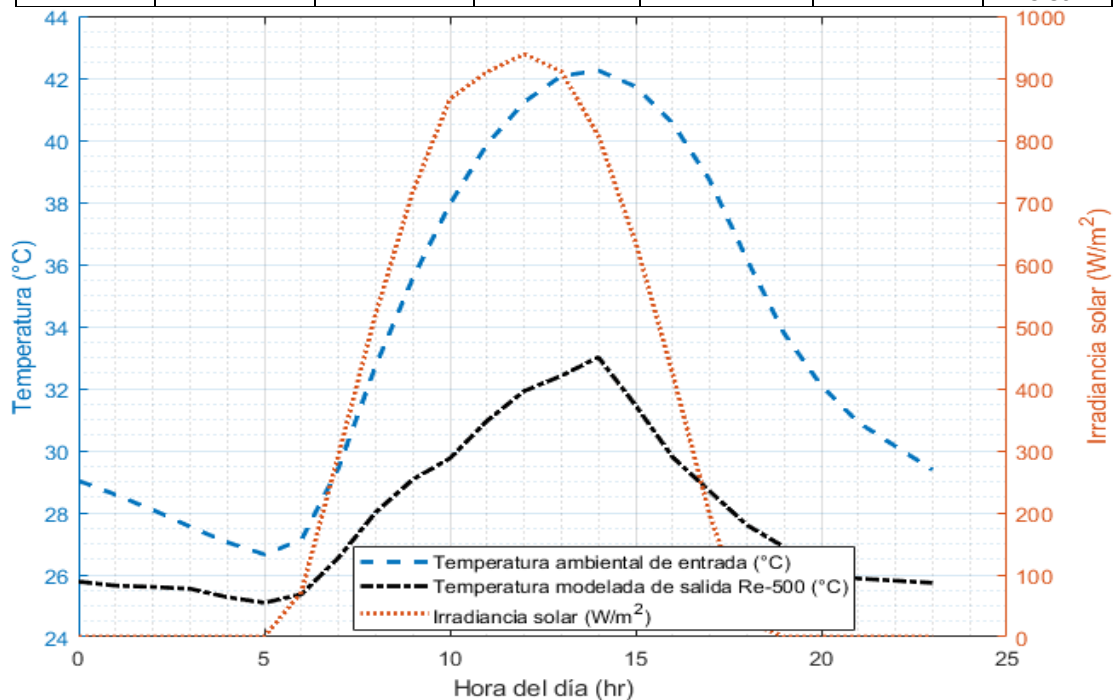


Figura 5.14. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en Tlacotalpan, Veracruz.

Tabla 5.24. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en Tlacotalpan, Veracruz (05/Febrero/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	82.06	10.25	15.76	19.95	4.19
1	0	81.12	10.34	15.61	19.74	4.13
2	0	79.25	10.74	15.51	19.61	4.1
3	0	77.5	10.79	15.33	19.44	4.11
4	0	76.62	10.36	15.05	19.11	4.06
5	0	75.5	10.01	14.74	18.88	4.14
6	0	74.38	9.82	14.44	18.41	3.97
7	8.27	72	9.98	14.46	18.42	3.96
8	47.3	67.62	10.48	14.92	18.78	3.86
9	98.78	63.81	10.79	15.43	19.23	3.8
10	190.71	62.12	10.64	15.95	19.94	3.99
11	304.75	61.81	10.33	16.4	20.72	4.32
12	361.66	61.94	10.02	16.77	21.17	4.4
13	235.7	63	9.58	16.93	20.98	4.05
14	242.71	65.19	9.03	16.76	20.99	4.23
15	213.45	67.56	8.4	16.55	20.82	4.27
16	108.88	70.31	7.65	16.31	20.33	4.02
17	50.25	75	6.58	15.77	19.8	4.03
18	0	81.88	5.47	15.05	19.18	4.13
19	0	84.19	5.26	14.98	19.09	4.11
20	0	85.56	5.24	14.92	19.11	4.19
21	0	86	5.2	14.84	19.07	4.23
22	0	85.69	4.94	14.76	19.12	4.36
23	0	84.56	4.85	14.76	19.2	4.44
					ΔT Promedio	4.13

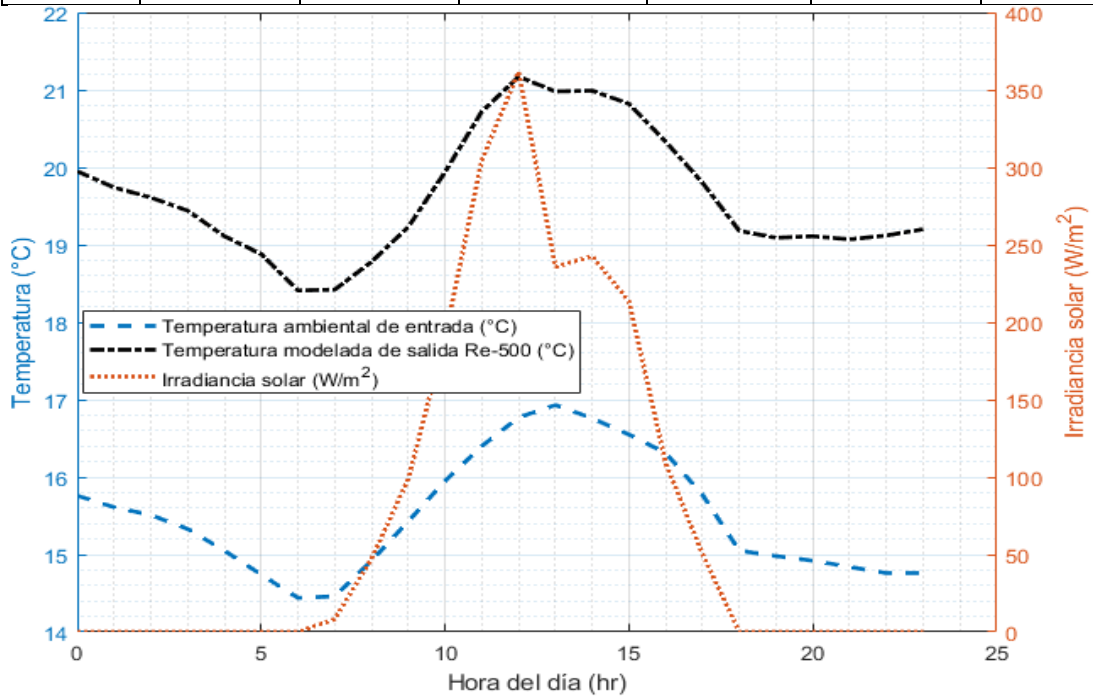


Figura 5.15. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en Tlacotalpan, Veracruz.

Tabla 5.25. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en Ciudad Juárez, Chihuahua (19/Julio/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	26.31	5.07	27.51	18.7	-8.81
1	0	28.12	4.76	26.8	18.31	-8.49
2	0	31	4.01	25.84	18.27	-7.57
3	0	34.38	3.53	25.05	18.16	-6.89
4	0	37.88	3.1	24.4	18.11	-6.29
5	21.68	38.69	2.68	24.7	18.3	-6.4
6	178.85	32.81	2.9	27.73	19.72	-8.01
7	389.98	26.56	2.35	31.21	21.62	-9.59
8	588.27	21.25	1.63	34.49	26.18	-8.31
9	779.81	17.62	0.57	36.87	36.69	-0.18
10	901.98	15.62	0.24	38.54	38.74	0.2
11	964.55	14.5	0.63	39.76	39.55	-0.21
12	980.17	13.94	0.66	40.62	39.61	-1.01
13	932.66	13.56	0.47	41.09	38.24	-2.85
14	848.77	13.06	0.41	41.32	36.5	-4.82
15	688.18	12.56	0.74	41.23	34.11	-7.12
16	495.91	12.31	1.12	40.7	29.5	-11.2
17	272.88	12.44	1.53	39.72	25.41	-14.31
18	69.89	16.5	1.53	37.12	21.84	-15.28
19	0	18.06	2.41	34	20.49	-13.51
20	0	18.44	3.02	32.33	20.22	-12.11
21	0	18.88	3.14	31.11	20.1	-11.01
22	0	20.12	3.07	29.94	19.64	-10.3
23	0	24.12	3.39	29.01	19.17	-9.84
					ΔT Promedio	-7.66

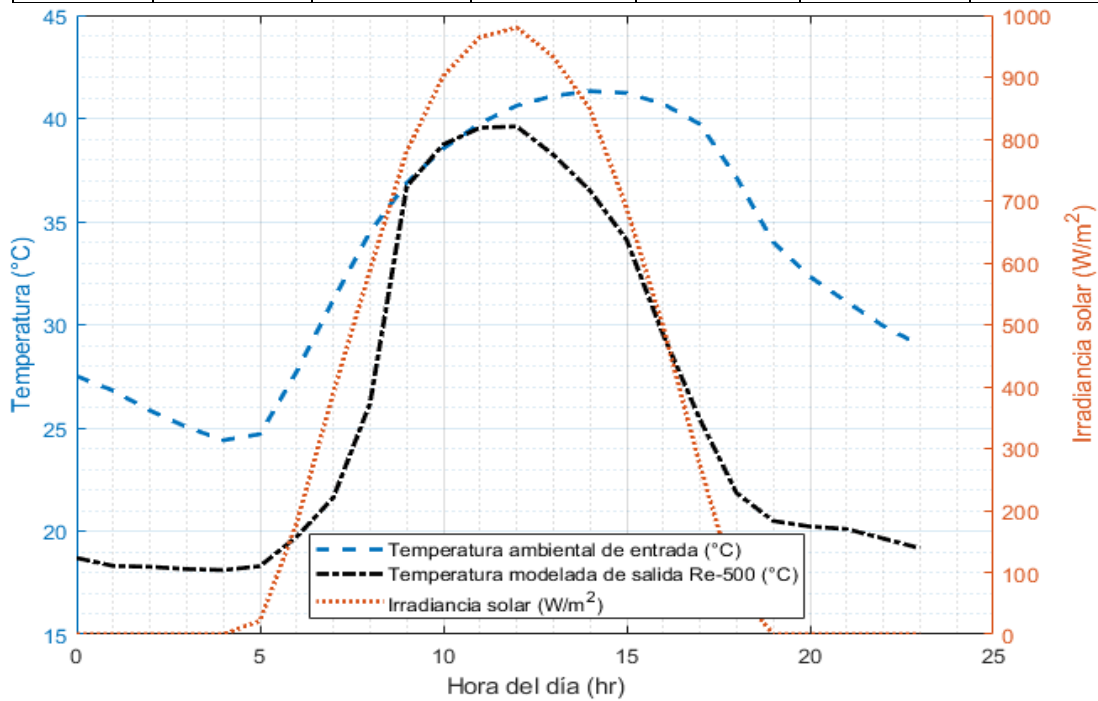


Figura 5.16. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en Ciudad Juárez, Chihuahua.

Tabla 5.26. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en Ciudad Juárez, Chihuahua (04/Febrero/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	71.94	3.23	-8.17	-2.4	5.77
1	0	68.38	3.02	-8.6	-2.51	6.09
2	0	66.31	2.56	-8.77	-2.62	6.15
3	0	65.88	2.23	-8.82	-2.66	6.16
4	0	66.12	2.13	-8.83	-2.72	6.11
5	0	66.5	2.03	-8.8	-3.01	5.79
6	0	66.69	1.81	-8.71	-3.14	5.57
7	87.32	60.38	2.37	-7.3	-0.93	6.37
8	312.25	54.12	2.81	-4.35	3.34	7.69
9	512.43	49.62	3.18	-2.39	6.17	8.56
10	665.69	44.25	3.46	-0.66	8.3	8.96
11	760.17	39.44	3.63	0.83	9.82	8.99
12	786.04	36	3.72	2.05	10.75	8.7
13	722.41	34	3.8	2.9	10.89	7.99
14	610.9	32.56	3.84	3.4	10.55	7.15
15	441.56	32.19	3.76	3.38	9.57	6.19
16	236.42	36	3.1	2.25	7.73	5.48
17	33.12	49.38	2.52	-1.84	3.17	5.01
18	0	50.56	2.82	-3.39	1.67	5.06
19	0	52.31	3.03	-4.29	1.12	5.41
20	0	53.31	3.15	-4.97	0.68	5.65
21	0	53.62	3.18	-5.42	0.27	5.69
22	0	53.69	3.13	-5.67	-0.05	5.62
23	0	53.81	3.05	-5.85	-0.34	5.51
					ΔT Promedio	6.49

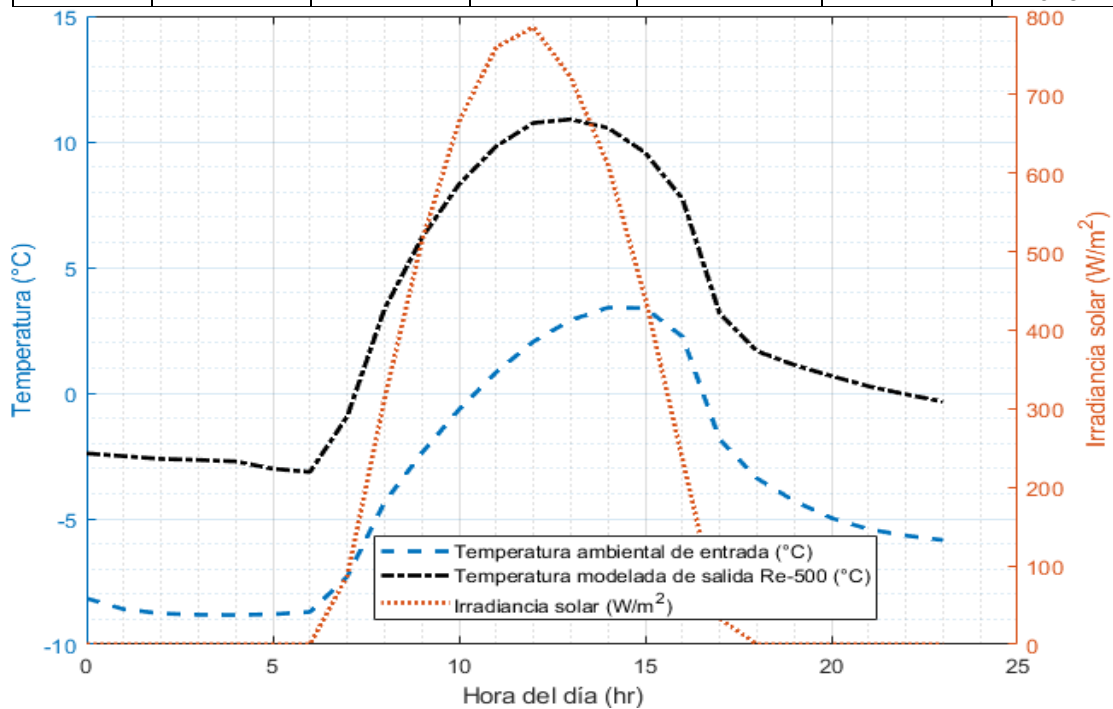


Figura 5.17. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en Ciudad Juárez, Chihuahua.

Tabla 5.27. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en Guayaquil, Baja California Norte (31/Agosto/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	43.69	3.02	29.19	21.16	-8.03
1	0	43.56	2.9	28.8	21	-7.8
2	0	43.25	2.65	28.39	20.88	-7.51
3	0	41.88	2.48	28.16	20.73	-7.43
4	0	42	2.41	28.01	20.61	-7.4
5	16.91	42.44	2.32	28.33	20.81	-7.52
6	153.4	37	3.54	31.85	22.32	-9.53
7	356.12	33.19	5.23	34.4	23.95	-10.45
8	560.84	31.19	6.3	35.73	25.75	-9.98
9	745.16	29.25	6.68	36.96	27.5	-9.46
10	854.09	27.06	6.47	38.08	28.9	-9.18
11	911.94	24.56	6.42	38.98	29.68	-9.3
12	888.79	22.56	6.58	39.47	29.56	-9.91
13	829.05	20.94	6.56	39.55	29.04	-10.51
14	691.82	20.12	6.28	39.16	27.86	-11.3
15	503.38	20.19	5.92	38.33	26.13	-12.2
16	246.31	21.31	5.36	37.01	23.76	-13.25
17	53.58	23.62	4.02	35.13	22.49	-12.64
18	0	28.5	2.04	32.23	21.45	-10.78
19	0	31.31	1.82	31.12	21.02	-10.1
20	0	33.56	1.83	30.36	20.88	-9.48
21	0	35.56	1.89	29.67	20.77	-8.9
22	0	37.56	1.96	29.04	20.56	-8.48
23	0	39.38	1.98	28.44	20.6	-7.84
					ΔT Promedio	-9.54

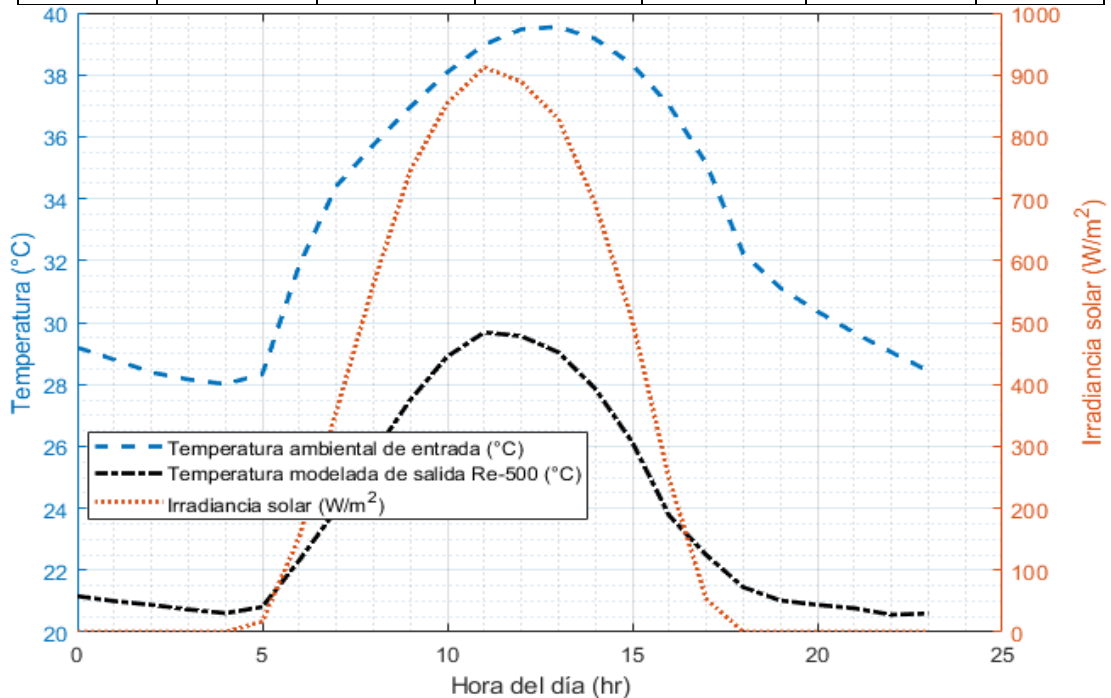


Figura 5.18. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en Guayaquil, Baja California N.

Tabla 5.28. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en Guayaquil, Baja California norte (24/Febrero/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	98.69	2.73	2.62	7.8	5.18
1	0	99.19	2.54	2.25	7.42	5.17
2	0	100	2.58	1.76	7.24	5.48
3	0	100	2.82	1.2	6.67	5.47
4	0	100	3.21	0.81	6.23	5.42
5	0	100	3.51	0.78	6.17	5.39
6	36.54	84.44	4.47	2.69	7.93	5.24
7	248.9	61.31	6.25	6.64	12.09	5.45
8	480.56	47.88	6.63	9.32	15.14	5.82
9	669.6	39.56	6.71	11.12	16.56	5.44
10	798.12	33.88	6.98	12.5	17.28	4.78
11	859.95	30.62	7.13	13.3	17.63	4.33
12	858.09	29	6.97	13.55	17.71	4.16
13	777.8	28.38	6.45	13.41	17.51	4.1
14	637.25	28.38	5.58	12.94	17.07	4.13
15	441.89	28.44	5.01	12.41	16.28	3.87
16	212.16	29.56	4.56	11.4	14.01	2.61
17	22.91	37.31	2.79	7.95	10.71	2.76
18	0	40.44	2.61	6.66	9.62	2.96
19	0	43.19	2.69	5.9	9.21	3.31
20	0	47.12	2.88	5.09	8.78	3.69
21	0	50.56	3.08	4.33	8.31	3.98
22	0	51.88	3.15	3.64	7.63	3.99
23	0	50.38	3.14	3.11	7.16	4.05
					ΔT Promedio	4.45

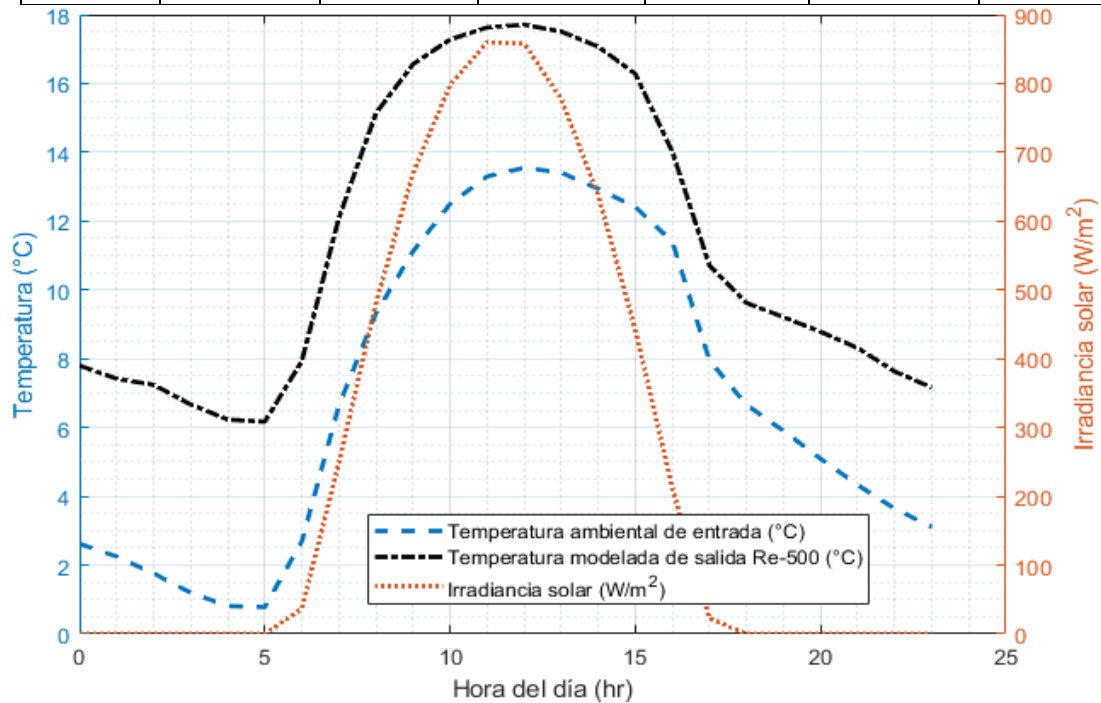


Figura 5.19. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en Guayaquil, Baja California N.

Tabla 5.29. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en La Rosilla, Guanaceví Durango (11/Junio/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	72.69	0.96	15.87	12.71	-3.16
1	0	80.06	1.12	14.51	12.35	-2.16
2	0	86.44	1.16	13.47	12.01	-1.46
3	0	91.31	1.21	12.71	11.86	-0.85
4	0	93.94	1.21	12.26	11.68	-0.58
5	25.21	90.88	1.15	12.69	11.95	-0.74
6	201.91	68.12	1.42	16.93	14.26	-2.67
7	438.2	42.44	1.7	22.07	16.7	-5.37
8	652.26	32.25	2.27	24.94	19.13	-5.81
9	828.26	27.62	2.58	26.8	21.03	-5.77
10	909.64	23.75	2.72	28.51	22.38	-6.13
11	908.73	20.56	2.72	30.09	23.32	-6.77
12	884.68	18.44	2.61	31.22	24.03	-7.19
13	788.33	17.44	2.36	31.6	23.97	-7.63
14	671.65	18	2.17	31.01	22.97	-8.04
15	505.27	19.5	2.05	30.03	21.16	-8.87
16	324.63	21.69	1.94	28.55	18.83	-9.72
17	121.25	24.94	1.75	26.61	16.33	-10.28
18	30.17	35.19	1.12	23.1	14.86	-8.24
19	0	46.88	1.14	19.64	13.68	-5.96
20	0	52.12	1.16	18.44	13.33	-5.11
21	0	58.12	1.06	17.08	12.99	-4.09
22	0	64.69	1.04	15.8	12.56	-3.24
23	0	70.69	1.07	14.76	12.27	-2.49
					ΔT Promedio	-5.1

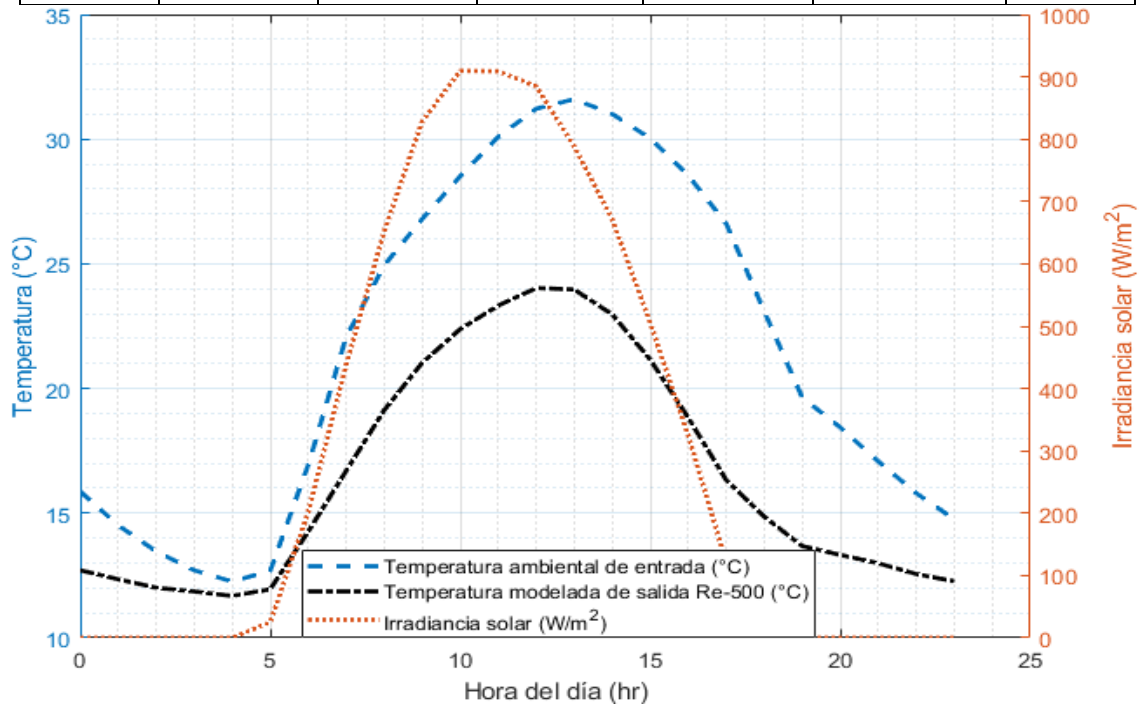


Figura 5.20. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en La Rosilla, Guanaceví Durango.

Tabla 5.30. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en La Rosilla, Guanaceví Durango (07/Febrero/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	94.31	1.72	-1.63	3.2	4.83
1	0	100	2.21	-3.54	1.58	5.12
2	0	100	2.1	-4.77	0.44	5.21
3	0	100	2	-4.9	0.45	5.35
4	0	90.56	2.03	-4.66	0.31	4.97
5	0	76.38	2.08	-4.7	0.24	4.94
6	0	67.94	2.17	-4.9	0.21	5.11
7	131.06	54.69	2.96	-2.15	3.47	5.62
8	371.63	52.25	3.98	1.17	7.2	6.03
9	569.88	45.44	3.92	3.74	9.05	5.31
10	725.05	37.62	3.73	6.11	10.34	4.23
11	813.64	31.94	3.47	7.89	11.29	3.4
12	838.31	28	3.21	9.08	11.88	2.8
13	777.65	25.69	3.19	9.6	11.87	2.27
14	692.99	24.69	3.28	9.44	11.5	2.06
15	518.42	25	3.34	8.54	10.65	2.11
16	286.55	27.75	3.34	6.65	9.32	2.67
17	56.2	39.19	2.43	2.33	6.34	4.01
18	0	51.19	2.47	-0.93	3.53	4.46
19	0	55.06	2.62	-1.73	2.64	4.37
20	0	61.69	2.7	-2.78	2.03	4.81
21	0	68.38	2.7	-3.6	1.46	5.06
22	0	74	2.59	-4.19	0.94	5.13
23	0	78.25	2.48	-4.61	0.56	5.17
					ΔT Promedio	4.38

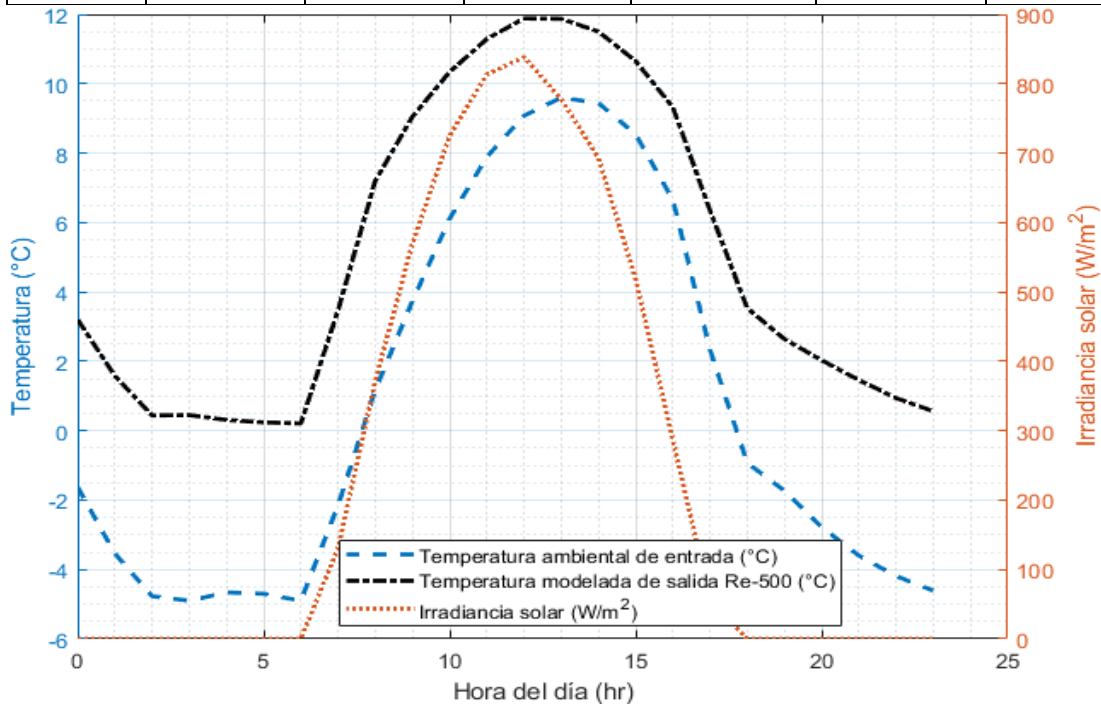


Figura 5.21. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en La Rosilla, Guanaceví Durango.

Tabla 5.31. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de enfriamiento en St. Tomás Ajusco CDMX (16/Abril/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	58.31	1.4	17.99	16.54	-1.45
1	0	57	1.2	17.69	16.34	-1.35
2	0	55.62	1.03	17.35	16.24	-1.11
3	0	55.06	0.81	16.87	16.02	-0.85
4	0	54.12	0.57	16.55	15.58	-0.97
5	20.96	53.94	0.27	16.51	15.61	-0.9
6	206.03	46.69	0.39	18.99	18.41	-0.58
7	440.55	31.5	0.55	23.4	21.64	-1.76
8	658.06	23.81	0.62	27.01	26.26	-0.75
9	789.46	20.31	0.92	29.4	27.77	-1.63
10	864.2	18	1.33	31.25	27.74	-3.51
11	956.38	16.31	1.78	32.64	27.85	-4.79
12	891.89	15.31	2.29	33.48	26.47	-7.01
13	763.4	14.88	2.79	33.65	24.82	-8.83
14	656.99	14.88	2.98	33.23	23.67	-9.56
15	460.85	15.38	3.03	32.2	22.12	-10.08
16	223.59	16.69	2.81	30.44	20.83	-9.61
17	38.27	22	1.74	27.33	19.24	-8.09
18	0	26.81	1.34	24.24	18.02	-6.22
19	0	29.38	0.98	22.82	17.81	-5.01
20	0	31.88	0.43	21.73	17.55	-4.18
21	0	34.12	0.55	20.62	17.02	-3.6
22	0	35.88	0.91	19.62	16.44	-3.18
23	0	37.06	1.3	18.9	16.3	-2.6
					ΔT Promedio	-4.07

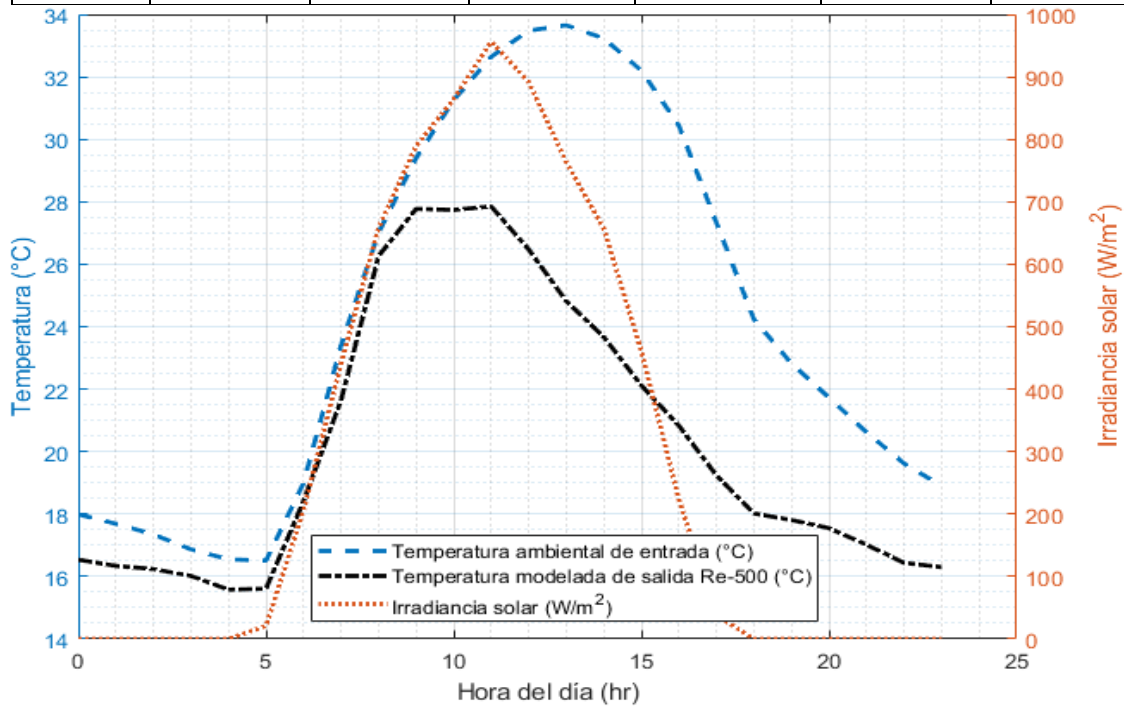


Figura 5.22. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más cálido del año 2022 en St. Tomás Ajusco CDMX.

Tabla 5.32. Condiciones de operación y resultados en la proyección del potencial de un ICTA para fines de calefacción en St. Tomás Ajusco cdmx (10/Febrero/2022)

Hora del día (hr)	Irradiancia (W/m ²)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C) Re = 500	ΔT (°C) Re = 500
0	0	72.81	1.21	9.31	12.33	3.02
1	0	78	1.04	8.77	12.27	3.5
2	0	82.56	0.82	8.33	12.02	3.69
3	0	84.81	0.61	8.19	11.84	3.65
4	0	86.44	0.61	8.08	11.23	3.15
5	0	88.44	0.64	7.94	11.59	3.65
6	38.58	80.88	0.67	9.58	13.41	3.83
7	251.82	67.5	1.67	13.13	16	2.87
8	478.84	55.38	2.78	15.72	17.27	1.55
9	622.93	46.69	3.25	17.86	18.17	0.31
10	733.37	40.75	3.54	19.58	18.88	-0.7
11	811.72	37.06	3.67	20.76	19.38	-1.38
12	831.41	34.88	3.72	21.44	19.6	-1.84
13	802.48	34.62	3.83	21.31	19.42	-1.89
14	588.28	35.69	4.09	20.66	18.59	-2.07
15	393.64	37.31	4.32	19.83	17.81	-2.02
16	179.96	40.88	4.24	18.36	16.86	-1.5
17	15.23	49.69	2.91	15.51	15.52	0.01
18	0	55.38	2.55	13.9	14.93	1.03
19	0	59.31	2.37	12.75	14.64	1.89
20	0	61.88	2.26	11.9	14.22	2.32
21	0	64.19	2.05	11.23	14.01	2.78
22	0	66.44	1.86	10.73	13.78	3.05
23	0	69	1.69	10.26	13.47	3.21
					ΔT Promedio	1.34

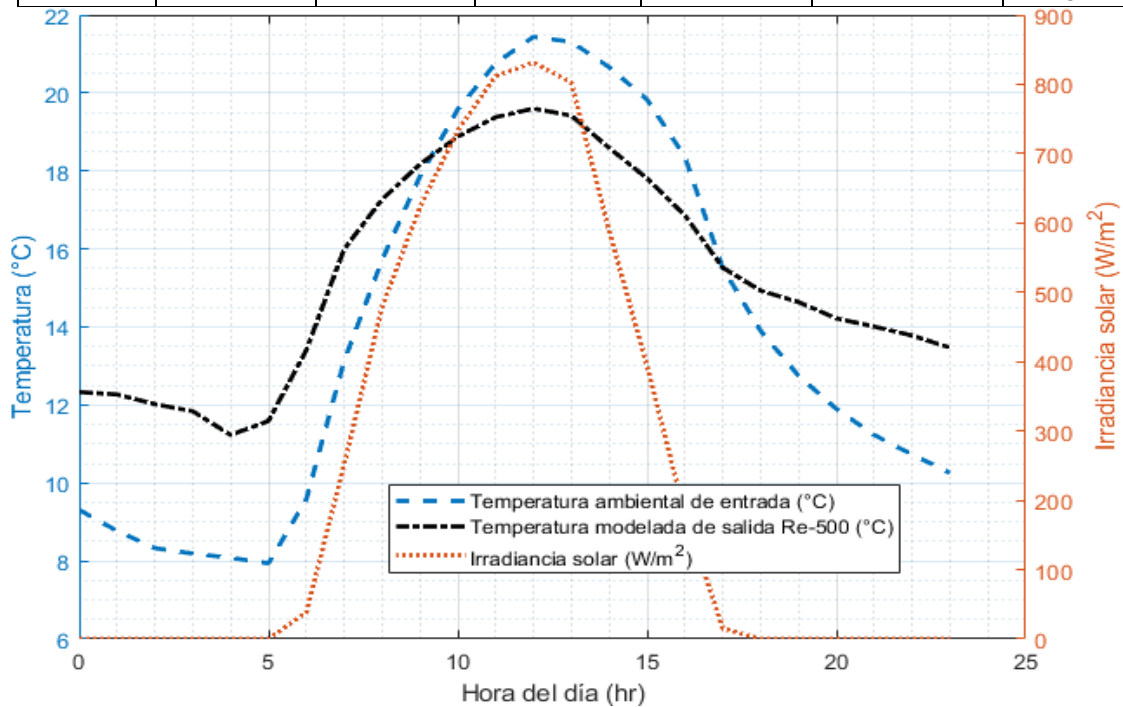


Figura 5.23. Proyecciones del potencial de operación de ICTA para el día más frío del año 2022 en St. Tomás Ajusco CDMX.

En la tabla 5.33 se reportan los promedios diarios obtenidos por las modelaciones para el potencial térmico de operación del ICTA según la zona climática, localidad y condición de enfriamiento o calefacción respectivamente, los valores para el potencial de operación se reportan como el valor absoluto del $|\Delta T|$, sin embargo, es necesario recordar que todos los valores de ΔT para enfriamiento representan una reducción en el nivel térmico.

Tabla 5.33. Potencial de operación del ICTA

Tipo de clima	Entidad, municipio, comunidad y/o ciudad representativa	Condición de operación	Potencial de operación promedio $ \Delta T $ @ Re-500
Seco y/o semiseco	Fronteras, Sonora	Enfriamiento (12/Junio/2022)	9.04 °C
		Calefacción (04/febrero/2022)	4.96 °C
	San Luis Potosí, San Luis Potosí	Enfriamiento (08/Mayo/2022)	5.96 °C
		Calefacción (13/Febrero/2022)	3.9 °C
Cálido subhúmedo	Mérida, Yucatán	Enfriamiento (08/Mayo/2022)	2.98 °C
		Calefacción (18/Enero/2022)	2.8 °C
	Tlacotalpan, Veracruz	Enfriamiento (08/Mayo/2022)	5.86 °C
		Calefacción (05/Febrero/2022)	4.13 °C
Muy seco o seco desértico	Ciudad Juárez, Chihuahua	Enfriamiento (19/Julio/2022)	7.66 °C
		Calefacción (04/Febrero/2022)	6.49 °C
	Guayaquil, Baja California norte	Enfriamiento (31/Agosto/2022)	9.54 °C
		Calefacción (24/Febrero/2022)	4.45 °C
Templado subhúmedo	La Rosilla, Guanaceví Durango	Enfriamiento (11/Junio/2022)	5.1 °C
		Calefacción (07/Febrero/2022)	4.38 °C
	Santo Tomás Ajusco, Tlalpan ciudad de México	Enfriamiento (16/Abril/2022)	4.07 °C
		Calefacción (10/Febrero/2022)	1.34 °C

La localidad que reportó el mayor potencial de aplicación para un ICTA de 3 x 15 m tomando en cuenta ambas aplicaciones (calefacción y enfriamiento) fue Fronteras Sonora, la localidad con el mayor potencial para fines de enfriamiento fue Guayaquil, Baja California norte para las condiciones climáticas del día 31 de agosto del 2022 y el mejor potencial de calefacción se dio en Ciudad Juárez, Chihuahua en el día 04 de febrero del 2022, por otro lado, Mérida Yucatán con un clima cálido subhúmedo fue la localidad con el menor potencial de operación si tomamos en cuenta ambas categorías.

5.6 Consumo de energía en una vivienda promedio equipada con sistema HVAC

En México la comisión federal de electricidad (CFE) es la encargada de la distribución y administración de la energía eléctrica, la cual se basa en un sistema de tarifas para establecer el precio final que el consumidor debe pagar según su consumo (Tabla 5.34).

Tabla 5.34. Aplicación de tarifas domésticas de CFE según el consumo mensual (2023) [28]

Tarifa	Consumo mensual (kWh/mes)
Tarifa 1	250
Tarifa 1A	300
Tarifa 1B	400
Tarifa 1C	850
Tarifa 1D	1000
Tarifa 1E	2000
Tarifa 1F	2500

Todos los años la CFE implementa un programa llamado subsidio de verano o tarifas especiales de verano, el cual solo aplica para consumos domésticos o que sean contemplados dentro de las tarifas 1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E, y 1F que ya de por sí cuentan con subsidio de parte del gobierno de México. En el año 2023 el subsidio para estas tarifas será incrementado para los 6 meses comprendidos del 1 de mayo al 31 de octubre, las tarifas cambian según lo mostrado en la tabla 5.35.

Tabla 5.35. Ejemplo de tarifa normal vs tarifa especial de verano para la CFE.

Tarifa 1B	Clasificación por consumo	Costo por kWh (pesos mexicanos)	Límites de aplicación (kWh)
Abril 2023	Consumo básico	0.963	Hasta 75
	Consumo intermedio	1.174	De 76 a 175
	Consumo Excedente	3.43	> 176
Junio 2023 (Tarifa especial de verano)	Consumo básico	0.871	Hasta 150
	Consumo intermedio bajo	1.010	De 151 a 300
	Consumo intermedio alto	1.302	De 301 a 450
	Consumo Excedente	3.474	>450

Normalizar o establecer un consumo promedio para edificaciones residenciales (viviendas) es una tarea compleja debido a la cantidad de variables a considerar, el número de personas que habitan la vivienda, la cantidad de electrodomésticos, los hábitos de consumo de los ocupantes, las dimensiones y materiales de construcción de los espacios, son solo algunos de los factores que dificultan establecer un consumo válido para la mayoría de edificaciones que cuentan con al menos un equipo de aire acondicionado y/o calefacción instalado. A pesar de esto, en la Tabla 5.36 se muestra una distribución de consumo energético para una vivienda unifamiliar promedio de 4 ocupantes, 3 habitaciones, 2 baños, 1 sala y 1 cocina.

En la tabla 5.36 se considera como constante el consumo de luminarias, uso de lavadora, licuadora, Horno de microondas, ventilador de techo, plancha, secador de cabello, pantalla LED 32 pulgadas, PC de escritorio, laptop conectada, cargadores de dispositivos móviles, equipo de audio, aspiradora y refrigerador para todos los días del año. Lo que cambia son las horas de uso del sistema de aire acondicionado y calefacción, en función de las horas que la temperatura ambiente de la localidad elegida para el análisis (Fronteras, Sonora) esté por encima o por debajo de la temperatura de confort térmico, para una humedad relativa del aire del 50% el cuál sería un valor de 23.01 °C para el límite inferior y un valor de 26.39 °C para el límite superior de confort térmico. Se debe tomar en cuenta que, al ser una localidad con un clima extremo, el requerimiento energético para cumplir con las condiciones de confort térmico será muy elevado, de tal forma que, se obtendrá un consumo para cada mes del año 2022 en función de las horas de uso del sistema HVAC supuesto.

Tabla 5.36. Consumo mensual de electrodomésticos [98]

Equipo	Potencia unitaria (KW)	Unidades instaladas	Horas en uso	Número de días en uso	Consumo mensual total (KWh/mes)
Iluminación incandescente	0.1	2	8	30	48
Iluminación led	0.013	6	12	30	28.08
Lavadora automática	0.6	1	2	4	4.8
Licuadora	0.35	1	0.05	30	0.525
Horno de Microondas	1.5	1	0.5	30	22.5
Ventilador de techo	0.12	2	8	30	57.6
Plancha	1.8	1	2	4	14.4
Secador de cabello	1.6	1	0.05	30	2.4
Pantalla 32 in (TV)	0.075	1	6	30	13.5
PC de escritorio	0.25	1	6	30	45
Laptop enchufada	0.15	2	4	30	36
Cargadores de dispositivos móviles	0.02	6	0.5	30	1.8
Equipo de audio	0.19	1	4	30	22.8
Aspiradora	1.1	1	1	8	8.8
Refrigerador	0.375	1	24	30	270
HVAC (enero)	1.68	1	No de horas x mes (744)		1249.92
				Consumo total, enero	1826.125
	Tarifa 1D			Pago estimado	2105.52
HVAC (febrero)	1.68	1	No de horas x mes (668)		1122.24
				Consumo total, febrero	1698.445
	Tarifa 1D			Pago estimado	1970.2
HVAC (marzo)	1.68	1	No de horas x mes (690)		1159.2
				Consumo total, marzo	1735.405
	Tarifa 1D			Pago estimado	2025.22
HVAC (abril)	1.68	1	No de horas x mes (630)		1058.4
				Consumo total, abril	1634.605
	Tarifa 1D			Pago estimado	1919.03
HVAC (mayo)	1.68	1	No de horas x mes (678)		1139.04
				Consumo total, mayo	1715.245
	Tarifa 1D			Pago estimado	1722.11

HVAC (junio)	1.68	1	No de horas x mes (586)	984.48
			Consumo total, junio	1560.685
	Tarifa 1D		Pago estimado	1576.29
HVAC (julio)	1.68	1	No de horas x mes (580)	974.4
			Consumo total, julio	1550.605
	Tarifa 1D		Pago estimado	1575.41
HVAC (agosto)	1.68	1	No de horas x mes (605)	1016.4
			Consumo total, agosto	1592.605
	Tarifa 1D		Pago estimado	1627.64
HVAC (septiembre)	1.68	1	No de horas x mes (607)	1019.76
			Consumo total, septiembre	1595.965
	Tarifa 1D		Pago estimado	1640.65
HVAC (octubre)	1.68	1	No de horas x mes (653)	1097.04
			Consumo total, octubre	1673.245
	Tarifa 1D		Pago aproximado	1730.14
HVAC (noviembre)	1.68	1	No de horas x mes (709)	1191.12
			Consumo total, noviembre	1767.325
	Tarifa 1D		Pago estimado	2168.51
HVAC (diciembre)	1.68	1	No de horas x mes (744)	1249.92
			Consumo total, diciembre	1826.125
	Tarifa 1D		Pago estimado	2255.26

5.7 Análisis costo/beneficio del consumo energético de una vivienda por la implementación de un ICTA

En 2020, Zhang Chong et al. determinaron numéricamente que el uso de ICTAs en la vivienda tiene la capacidad de reducir la carga energética de sistemas de aire acondicionado y calefacción en un 16 y 50 %, respectivamente [99]. Tomando en cuenta que las condiciones de operación de los ICTA varían en función de las condiciones climatológicas y características del suelo de cada ubicación geográfica. En la tabla 5.37 se presentan tres posibles condiciones de reducción del consumo energético de la edificación planteada en la tabla 5.36 por la posible implementación de ICTA.

tabla 5.37. Posible reducción del consumo energético mensual y anual debido a la implementación de un ICTA en una casa habitación.

Mes		Consumo normal	Reducción del consumo del sistema HVAC en un 16% por implementación de un ICTA	Reducción del consumo del sistema HVAC en un 50% por implementación de un ICTA	Reducción del consumo del sistema HVAC en un 75% por implementación de un ICTA
Enero	Consumo (KWh/mes)	1826.125	1626.137	1201.165	888.685
	Costo estimado (pesos)	2105.52	1874.94	1384.94	1025.54
	Tarifa aplicable	1D	1D	1D	1C
Febrero	Consumo (KWh/mes)	1698.445	1518.886	1137.325	856.765
	Costo estimado (pesos)	1970.2	1761.91	1319.3	993.85
	Tarifa aplicable	1D	1D	1D	1C

Marzo	Consumo (KWh/mes)	1735.405	1549.933	1155.805	866.005
	Costo estimado (pesos)	2025.22	1808.77	1348.82	1010.63
	Tarifa aplicable	1D	1D	1D	1C
Abril	Consumo (KWh/mes)	1634.605	1465.261	1105.405	840.805
	Costo estimado (pesos)	1919.03	1720.22	1297.75	987.11
	Tarifa aplicable	1D	1D	1D	1B
Mayo	Consumo (KWh/mes)	1715.245	1532.998	1145.725	860.965
	Costo estimado (pesos)	1722.11	1539.13	1150.31	864.41
	Tarifa aplicable	1D	1D	1D	1C
Junio	Consumo (KWh/mes)	1560.685	1403.168	1068.445	822.325
	Costo estimado (pesos)	1576.29	1417.2	1079.13	830.55
	Tarifa aplicable	1D	1D	1D	1B
Julio	Consumo (KWh/mes)	1550.605	1394.701	1063.405	819.805
	Costo estimado (pesos)	1575.41	1417.02	1080.42	832.92
	Tarifa aplicable	1D	1D	1D	1B
Agosto	Consumo (KWh/mes)	1592.605	1429.981	1084.405	830.305
	Costo estimado (pesos)	1627.64	1461.44	1108.26	848.57
	Tarifa aplicable	1D	1D	1D	1B
Septiembre	Consumo (KWh/mes)	1595.965	1432.803	1086.085	831.145
	Costo estimado (pesos)	1640.65	1472.92	1116.5	854.42
	Tarifa aplicable	1D	1D	1D	1B
Octubre	Consumo (KWh/mes)	1673.245	1497.718	1124.725	850.465
	Costo estimado (pesos)	1730.14	1548.64	1162.97	879.38
	Tarifa aplicable	1D	1D	1D	1C
Noviembre	Consumo (KWh/mes)	1767.325	1576.745	1171.765	873.985
	Costo estimado (pesos)	2168.51	1934.67	1437.76	1072.38
	Tarifa aplicable	1D	1D	1D	1C
Diciembre	Consumo (KWh/mes)	1826.125	1626.137	1201.165	888.685
	Costo estimado (pesos)	2255.26	2008.28	1483.44	1097.53
	Tarifa aplicable	1D	1D	1D	1C
Consumo anual total (kWh)		20176.38	18054.47	13545.42	10229.94
Costo anual total estimado (pesos)		22315.98	19965.14	14969.60	11297.29

En la tabla 5.38 se presenta el porcentaje de reducción en consumo energético anual y el porcentaje de reducción en el gasto económico anual de energía eléctrica, por la supuesta implementación de un ICTA en la edificación planteada anteriormente.

Tabla 5.38. Porcentajes de reducción del consumo energético por la implementación de un ICTA

	Reducción del 16 % de uso del sistema HVAC por la implementación de un ICTA	Reducción del 50 % de uso del sistema HVAC por la implementación de un ICTA	Reducción del 75 % de uso del sistema HVAC por la implementación de un ICTA
% de reducción del Consumo anual total	10.52 %	32.86 %	49.3 %
% de reducción del Costo anual total estimado	10.53 %	32.92 %	49.38 %

5.8 Emisiones de GEI por consumo de energía eléctrica de una vivienda unifamiliar equipada con un sistema HVAC

La CFE en su guía para determinar el factor de emisión de bióxido de carbono equivalente para el sistema eléctrico nacional, establece que para obtener la cantidad de CO₂ equivalente (E_{CO_2}) es necesario conocer la cantidad de combustible utilizado, su poder calorífico y su factor de emisión, como se aprecia en la ecuación 1 [100]:

$$E_{CO_2} = \sum Ci * Pci * FE_{CO_2} \quad (189)$$

Donde:

Ci : consumo de combustible en kg

Pci : poder calorífico del combustible

FE_{CO_2} : factor de emisión del combustible

En la tabla 5.39 se presentan las propiedades para los 4 combustibles más utilizados para la producción de energía eléctrica en México según la CFE.

Tabla 5.39. Propiedades de los combustibles más utilizados en México para la producción de energía eléctrica [100]

Combustible	producción de energía por unidad de kg o litro de combustible (kWh)	Poder calorífico (kJ/kg)	Factor de emisión IPCC (kg/kJ)		
			Bióxido de carbono (CO ₂)	Metano (CH ₄)	Óxido nitroso (N ₂ O)
Gas natural	6.98 /L	32843	5.61x10 ⁻⁵	1.00x10 ⁻⁹	1.00x10 ⁻¹⁰
Combustóleo	10.31 /L	44685	7.74x10 ⁻⁵	3.00x10 ⁻⁹	6.00x10 ⁻¹⁰
Diésel	10.96 /L	43080	7.41x10 ⁻⁵	3.00x10 ⁻⁹	6.00x10 ⁻¹⁰
Carbón	7.25 /Kg	35731	9.46x10 ⁻⁵	1.00x10 ⁻⁹	1.50x10 ⁻⁹

Se realizó el cálculo de las emisiones de CO₂, CH₄, y N₂O emitidas a la atmosfera por el consumo anual estimado en la tabla 5.36, para cada posible caso de producción de energía planteados por la quema de combustibles fósiles como el Gas, combustóleo, diésel y carbón, en la tabla 5.40 se presentan los resultados de las emisiones producidas para cada caso.

Tabla 5.40. Emisiones estimadas anuales de CO₂, CH₄, y N₂O emitidas por una vivienda promedio

Combustible	Consumo anual (kWh)	Combustible necesario (kg)	Emisiones producidas (kg/año)		
			Dióxido de carbono CO ₂	Metano (CH ₄)	Óxido nitroso (N ₂ O)
Gas natural	20176.38	1245.85	2295.469	0.0409	0.00409
Combustóleo	20176.38	1643.86	5685.4854	0.2204	0.0441
Diesel	20176.38	1531.6	4889.3441	0.1979	0.0396
Carbón	20176.38	2782.95	9406.7957	0.0994	0.1492

5.9 Reducción en la emisión de GEI por la implementación de un ICTA en una vivienda promedio

Tabla 5.41. Emisiones estimadas anuales de CO₂, CH₄, y N₂O emitidas por una vivienda promedio

Reducción del 16 % en el consumo del sistema HVAC								
Combustible	Consumo anual (kWh)	Combustible necesario (kg)	Emisiones producidas (kg)			(% de reducción (CO ₂))	(% de reducción (CH ₄))	(% de reducción (N ₂ O))
			Dióxido de carbono (CO ₂)	Metano (CH ₄)	Óxido nitroso (N ₂ O)			
Gas natural	18054.47	1114.82	2054.047	0.0366	0.00366	10.52	10.51	10.51
Combustóleo	18054.47	1470.98	5087.559	0.1972	0.0394	10.52	10.53	10.66
Diesel	18054.47	1370.56	4375.140	0.1771	0.0354	10.52	10.51	10.61
Carbón	18054.47	2490.27	8417.492	0.089	0.1335	10.52	10.46	10.52
Reducción del 50 % en el consumo del sistema HVAC								
Gas natural	13545.42	836.400	1541.060	0.027	0.002	32.87	32.76	32.76
Combustóleo	13545.42	1103.600	3816.931	0.147	0.029	32.87	32.89	32.88
Diesel	13545.42	1028.270	3282.472	0.132	0.026	32.86	32.84	32.83
Carbón	13545.42	1868.330	6315.240	0.066	0.100	32.87	32.8	32.91
Reducción del 75 % en el consumo del sistema HVAC								
Gas natural	10229.94	631.680	1163.865	0.020	0.002	49.3	49.39	49.39
Combustóleo	10229.94	833.480	2882.689	0.111	0.0223	49.3	49.32	49.43
Diesel	10229.94	776.58	2479.0204	0.1004	0.0201	49.3	49.27	49.24
Carbón	10229.94	1411.03	4769.4967	0.0504	0.0756	49.3	49.3	49.33

En la tabla 5.41 se presentan la reducción de emisiones de GEI emitidas por el consumo de la edificación planteada en la tabla 8 debido a la implementación de sistemas de ICTA.

5.10 Análisis del impacto de los GEI sobre la población

Los gases de efecto invernadero (GEI) retienen la radiación solar infrarroja en la atmosfera, elevando la temperatura promedio de la tierra, ya que, sin la presencia de estas sustancias en la atmosfera, la temperatura promedio del planeta seria -18 °C y no los 14.5 °C actuales. Sin embargo, este balance térmico, se ha descompensado drásticamente desde hace aproximadamente 170 años. Los principales GEI son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el vapor de agua (H₂O), el óxido nitroso (N₂O), el ozono troposférico (O₃), y los clorofluorocarbonos (CFCs).

En octubre del 2021 la organización mundial de la salud (OMS) publicó 5 hechos clave referente al impacto del cambio climático en la salud:

1. El cambio climático afecta los determinantes sociales y ambientales de la salud: aire limpio, agua potable, alimentos suficientes y vivienda segura.
2. Entre 2030 y 2050 se espera que el cambio climático cause aproximadamente 250,000 muertes adicionales anuales, por desnutrición, malaria, diarrea y estrés por calor.
3. Los costos directos de los daños a la salud (excluyendo costos de sectores determinantes de la salud como la agricultura, agua potable y saneamiento) se estiman entre 2 y 4 mil millones de dólares para el año 2030.
4. Las regiones con infraestructuras de salud pública deficientes o débiles, principalmente en países en desarrollo, serán las menos capaces de hacer frente sin asistencia externa para prepararse y responder a esta problemática.
5. La reducción de las emisiones de GEI a través de mejores opciones de transporte, alimentos y uso de energía, puede resultar en una mejor salud, principalmente debido a la reducción de la contaminación del aire [101].

En la tabla 5.42 se presentan las afectaciones a la salud humana por la continua exposición a cada uno de los GEI.

Tabla 5.42. Efectos en la salud humana por la exposición constante a GEI

GEI	Consideraciones y afectaciones a la salud humana
<p style="text-align: center;">Dióxido de carbono (CO₂)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • A partir de aproximadamente 800 ppm, se pueden dar enfermedades respiratorias, dolores de cabeza, fatiga, aumento del ritmo cardiaco, aumento en la presión sanguínea. • A niveles más altos de CO₂ en torno a 2000 – 5000 ppm, el cuerpo humano tiene problemas para regular la acidez de la sangre, calcificación del tejido celular, degradación ósea. • Por encima de las 5000 hasta 10000 ppm, aparecen trastornos del sueño y demás afectaciones cerebrales debido al aumento de hasta un 35% del flujo sanguíneo cerebral, deterioro cognitivo, calcificación renal, disminución de formación de

	hueso, etc [102].
Metano (CH₄)	<ul style="list-style-type: none"> • Es precursor de otros contaminantes atmosféricos como el ozono troposférico. • Al ser quemado, se emite carbón negro, que es uno de los componentes de partículas PM 2.5, las cuales son 30 veces más pequeñas que un cabello humano, por lo que no pueden ser filtradas por nuestra nariz, entrando en los pulmones con la posibilidad de provocar enfermedades respiratorias, incluido el cáncer de pulmón. • Irritación de las vías respiratorias, sensación de ardor y falta de aire, complicación en cuadros asmáticos. • Alteraciones de la respuesta del sistema inmunológico mermando su capacidad para responder a enfermedades que afectan principalmente las vías respiratorias [103].
Óxido nitroso (N₂O)	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene la posibilidad de llegar al cerebro por medio de las vías respiratorias, a partir del nivel de intoxicación los efectos van desde la disminución de la actividad neuronal, puede generar un estado analgésico, excitación, depresión total del sistema respiratorio que sin apoyo artificial puede provocar un estado de coma o la muerte [104].
Ozono troposférico (O₃)	<ul style="list-style-type: none"> • Deterioro en la función pulmonar, envejecimiento prematuro de los pulmones. • Irritación ocular, de nariz y garganta. • Malestar en las vías respiratoria como tos y una mayor incidencia de ataques asmáticos. • Cefaleas y alteraciones del sistema inmunológico [105].
Vapor de agua (H₂O)	<ul style="list-style-type: none"> • La exposición a una humedad relativa elevada del aire empieza a tener consecuencias en la salud cuando su concentración supera el 60 % • El exceso de vapor de agua en el aire que se respira puede provocar enfermedades respiratorias, provoca malestar en climas cálidos y síntomas de irritabilidad [106].
Clorofluorocarbonos (CFCs)	<ul style="list-style-type: none"> • Los Clorofluorocarbonos son emitidos a la atmosfera debido a sus diversos usos como: refrigerantes en aires acondicionados y refrigeradores, propelentes en aerosoles, solventes desengrasantes, entre otros. • Reaccionan con la radiación ultravioleta, convirtiéndolos en fuentes de cloro inorgánico provocando una disminución en la concentración de ozono en la capa de ozono, reduciendo la protección que esta brinda a la radiación ultravioleta que puede provocar cáncer en la piel. • La inhalación directa de CFCs afecta al sistema nervioso central, pudiendo provocar problemas como dificultades respiratorias, afecciones a los riñones e hígado, temblores, convulsiones, alteraciones en el ritmo cardiaco, en casos extremos puede provocar muerte por asfixia [107].

5.11 Criterios de sustentabilidad aplicables a un ICTA

Con los resultados obtenidos en esta investigación se proponen los siguientes criterios de sustentabilidad energética aplicables a los ICTA.

1. Los ICTA se consideran sistemas socialmente responsables debido a que el principal recurso natural para su operación (el fenómeno de inercia térmica del suelo) se encuentra disponible en el suelo de todo el planeta, durante todas las horas del día de todos los días del año, es decir, es una tecnología accesible para la mayoría de la población, ayudando a reducir la creciente situación de pobreza energética por la privación de confort térmico.
2. Las dimensiones óptimas recomendadas para la instalación de un ICTA en viviendas unifamiliares son de 3 m de profundidad por 15 de longitud horizontal (3x15), en caso de pretender incrementar el potencial de operación aumentando el tamaño mínimo, se recomienda en medida de lo posible, incrementar la profundidad a 4 m, debido a que el potencial de operación se beneficia en mayor medida por el incremento de la profundidad que por el incremento en la longitud horizontal.
3. Limitar el uso de material aislante en la tubería de salida hasta los 1.5 a 2 m. de profundidad, debido a que la ausencia del material aislante a partir de 1.5 m de profundidad no compromete el potencial de operación del sistema y representa un ahorro en su construcción, principalmente cuando se desea implementar más de 1 ICTA.
4. La instalación del ICTA debe contar con acceso para mantenimiento, que debe incluir una salida de desagüe, para evitar inundaciones del sistema, así como el uso de mallas de protección y filtros de aire adecuados para evitar el ingreso de roedores y/o insectos.
5. Es necesario realizar un estudio previo para evaluar el potencial de operación de un ICTA, según la localidad, tipo de clima y tipo de suelo donde se desee instalar un ICTA con la finalidad de conocer el posible beneficio (potencial de operación) antes de decidir instalarlo.
6. Para los flujos laminares modelados en esta investigación no se recomienda la instalación de ICTA en localidades con velocidades de viento promedio diarias menores a 1 m/s y humedades relativas del viento promedio diario mayores al 90%.

Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

1. La demanda de sistemas HVAC se verá fuertemente incrementada en los próximos 30 años a nivel mundial, y México se contempla en el octavo lugar de países y/o regiones del mundo con mayor demanda de sistemas HVAC para el año 2050, lo que implica la necesidad de acelerar los esfuerzos para reducir la carga de trabajo que estos sistemas requerirán en el futuro próximo, evitando en medida de lo posible, la creciente situación de pobreza energética, esto es, la privación del servicio de confort térmico para la mayor parte de la población civil.
2. A partir de la conceptualización de un modelo físico, al que le corresponde un modelo matemático, se desarrolló un código computacional validado numéricamente basado en CFD, que será utilizado como herramienta para la obtención de resultados predictivos del comportamiento de un ICTA.
3. Se comprobó que existe una diferencia cuantitativa de 1.35 °C en la temperatura promedio de salida del ICTA, al utilizar 2 diferentes modelos matemáticos para la distribución inicial de temperatura del suelo según su profundidad, se concluye que; resulta necesario conocer la distribución de temperatura inicial real del suelo para reducir la incertidumbre en el resultado del modelo.
4. El código computacional desarrollado fue validado en 2 condiciones experimentales distintas en México, ambos experimentos se ubican en la zona sur del país (Villahermosa Tabasco y Chetumal Quintana Roo México), reportando un error relativo porcentual promedio global de aproximación del 4.52 respecto a las mediciones experimentales, también se realizó la validación con experimentación fuera de México, con un ICTA ubicado en la universidad de Biskra en Argelia, reportando un error relativo % promedio global de 5.76, un MSE global de 6.25 y un RMSE global de 2.2.
5. Los resultados obtenidos confirman lo reportado en la literatura, los ICTA tienen un mejor desempeño en climas extremos, ya que el sistema resultó más efectivo en el periodo cálido de una localidad con un clima considerado como cálido (Jojutla Morelos) y para el periodo frío de una localidad con un clima considerado como frío (la Rosilla Durango).
6. Se utilizó el código validado con resultados experimentales para realizar un estudio paramétrico de los aspectos geométricos de operación según las condiciones atmosféricas y humedad del suelo en un ICTA, para las 2 posibles condiciones de operación, enfriamiento y calentamiento. Se observó un mayor potencial de enfriamiento y calentamiento al incrementar la profundidad de la tubería respecto a incrementar la longitud horizontal del recorrido, debido a lo anterior se presenta como ventaja la posible implementación en áreas reducidas o con poco espacio para la instalación.

El potencial del ICTA disminuye al incrementar el diámetro de la tubería para ambos casos (enfriamiento y calefacción)

Se obtuvo un mayor potencial en la operación de un ICTA tanto para fines de enfriamiento como de calefacción, al disminuir la humedad relativa del aire, es decir, la humedad relativa del aire tiene un efecto inversamente proporcional en la operación de los ICTA.

Se demostró que el incremento del 0 al 50 % en la humedad del suelo, incrementa el potencial térmico de operación de los ICTA.

La velocidad del viento genera en ambos casos de operación (enfriamiento y calefacción) un incremento en el potencial de operación de los ICTA a medida que esta se incrementa.

7. Se determinaron las dimensiones mínimas recomendadas para la instalación de un ICTA, las cuales son 3 metros de profundidad y 15 metros de extensión horizontal, para un diámetro de tubería de 0.15 metros (6 in), según los resultados obtenidos por el análisis paramétrico.
8. No se recomienda el uso del ICTA para fines de calentamiento con diámetros mayores a 0.2032 m (8 in) a partir de un flujo con un número de Reynolds mayor a 500. Para el caso de enfriamiento, no se recomienda el uso del ICTA en zonas con velocidades del viento menor o iguales a 0.5 m/s, ni humedades relativas del 100% (para flujos con un número de Reynolds mayor o igual a 500, no se recomienda su uso a partir de velocidades del viento de 1 m/s o menores, ni humedades relativas del aire mayores al 80%), debido a que según el análisis paramétrico, éstas condiciones generan el efecto contrario al deseado, es decir, para fines de enfriamiento el ICTA incrementa el nivel térmico y para fines de calefacción reduce el nivel térmico, según la temperatura promedio obtenida por el modelado en la salida del ICTA.
9. Se determinó numéricamente la posibilidad de reducir el uso del material aislante en la tubería de salida del ICTA de 1.5 a 2 metros en la última sección del recorrido vertical hasta la salida, para sistemas con más de 3 metros de profundidad, ya que la reducción en la extensión del material aislante en la tubería de salida, presenta poca variabilidad promedio de -0.17 °C para la operación de enfriamiento y de 0.098 °C para fines de calentamiento, reduciendo el costo de construcción de los ICTA debido a la reducción en el uso de material aislante.
10. Los resultados obtenidos por las proyecciones realizadas para evaluar el potencial de aplicación de un ICTA en México, Fronteras Sonora es la localidad que presentó el mayor potencial de operación, al tomar en cuenta ambos casos de operación, enfriamiento y calefacción, con un potencial de reducción del nivel térmico del aire ambiente de -9.04 °C y un aumento de 4.96 °C para los días 12/junio/2022 y 04/febrero/2022 respectivamente.

Guayaquil, Baja California norte, resultó ser la localidad con el mayor potencial para fines de enfriamiento para el día 31/agosto/2022 con un potencial de reducción en el nivel térmico promedio para todo el día de -9.54 °C.

Ciudad Juárez, Chihuahua, presentó el mayor potencial para fines de calefacción según las condiciones del día 04/febrero/2022 con un potencial de incremento en el nivel térmico de 6.49 °C.

Mérida, Yucatán, fue la localidad con el menor potencial de operación para fines de enfriamiento según las condiciones del día 08/Mayo/2022 con un potencial promedio de -2.98 °C, y a su vez fue la localidad con el peor rendimiento general si se toma en cuenta ambas condiciones de operación, ya que su potencial de calefacción fue de 2.8 °C según las condiciones del día 18/enero/2022, este comportamiento se atribuye principalmente a la baja velocidad del viento, con un promedio de 1.25 m/s para la condición de enfriamiento y de 1.14 m/s para la condición de calentamiento, también aunque en menor medida, la elevada humedad relativa del aire que se da en climas cálidos subhúmedos.

El potencial calculado como el más bajo para fines de calefacción fue en la localidad de Santo Tomás Ajusco CDMX, para el día 10/febrero/2022 con 1.34 °C de incremento en el nivel térmico ambiental, se atribuye principalmente a la elevada humedad relativa del aire, promediando un 60 % para la condición de calefacción, mientras que, para la condición de enfriamiento, el promedio de la humedad del aire es de 32.71 %, obteniendo un rendimiento aceptable con un potencial de reducción del nivel térmico de -4.07 °C.

11. En general según las proyecciones realizadas, el horario comprendido entre las 12 y 19 horas presenta el mejor potencial de operación del ICTA para fines de enfriamiento, mientras que, para calefacción, los horarios que obtienen un mejor beneficio por la supuesta implementación de un ICTA son: de las 0 a las 6 horas y de las 19 hasta las 23 horas del día.
12. Se definieron 6 criterios de sustentabilidad aplicables a los ICTA en función de los resultados obtenidos en esta investigación.
13. Se presentó de manera cuantitativa la posible reducción en el consumo y emisiones de gases de efecto invernadero en una edificación equipada con un sistema de aire acondicionado y un ICTA, para 3 diferentes posibles condiciones de reducción del 16, 50 y 100 % del uso del aire acondicionado respectivamente, reportando una reducción en el consumo energético anual de 10.52, 32.87 y 49.3 % respectivamente.

6.2 Recomendaciones

Las limitaciones de este estudio son las siguientes:

El modelado numérico es válido y aplicable solo a flujo laminar; no se considera la transferencia de masa entre el suelo y el ICTA, debido a que el suelo se considera como un medio sólido isotrópico y no como medio poroso; el estudio de transferencia de calor se realiza considerando coordenadas rectangulares en un espacio bidimensional y bajo condiciones de operación en estado estacionario.

Las principales recomendaciones para futuros trabajos referentes al estudio de los ICTA están relacionadas con:

La implementación de modelos y técnicas de turbulencia al software computacional desarrollado, con la finalidad de evaluar el comportamiento del sistema para flujos turbulentos.

Es necesario contar con mediciones experimentales fiables de las propiedades físicas y químicas de diferentes suelos en México, para tener información adecuada para las condiciones de frontera en la superficie del suelo, así como la distribución de temperatura inicial para los primeros 4 o 5 metros de profundidad del suelo.

Es necesario construir un banco de experimentación modular de un ICTA, donde sea posible controlar algunas variables como el flujo de aire de entrada y la cantidad de humedad en el suelo.

También es necesaria experimentación de aplicación en entorno real de operación para los EHAE, esto es, tener bancos experimentales donde se incluya el acople de una habitación con la finalidad de evaluar el efecto del flujo de aire de salida del ICTA en la temperatura al interior de la habitación.

Referencias

1. Naciones Unidas (ONU), Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC), 12 diciembre 2015, disponible en esta dirección: <https://www.refworld.org/es/docid/602021b64.html>
2. Secretaría de energía (SENER), Subsecretaría de planeación y transición energética, Dirección general de planificación e información energéticas, México 2023. Balance nacional de energía 2022. <https://www.gob.mx/sener/articulos/balance-nacional-de-energia-296106>
3. Herrero, L. M. J. (2000). Desarrollo sostenible: Transición hacia la coevolución global. Ediciones Pirámide.
4. Cortés Mura, H. G., & Peña Reyes, J. I. (2015). De la sostenibilidad a la sustentabilidad. Modelo de desarrollo sustentable para su implementación en políticas y proyectos. *Revista EAN*, (78), 40-55.
5. Ramírez, M. A. (2012). Energía y Sustentabilidad: algunas características de la energía sustentable. *Revista Digital Universitaria*, Vol 13, pag 1-11.
6. Peñalosa Acosta, M., Arévalo Cohén, F., & Daza Suárez, R. (2009). Impacto de la gestión tecnológica en el medio ambiente. *Revista de Ciencias Sociales*, 15(2), 306-316.
7. Common, M. (2017). Towards an Ecological Economics of Sustainability 1. In *The Economics of Sustainability* (pp. 199-226). Routledge.
8. Ortiz Moreno, J. A., Malagón García, S. L., & Masera Cerutti, O. R. (2015). Ecotecnología y sustentabilidad: una aproximación para el Sur global. *INTER disciplina*, Vol 3, No 7, 193-215.
9. Pacheco, R., Ordóñez, J., & Martínez, G. (2012). Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3559-3573.
10. Sudhakar, K., Winderl, M., & Priya, S. S. (2019). Net-zero building designs in hot and humid climates: A state-of-art. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100400.
11. Attia, S. (2012). A tool for design decision making: zero energy residential buildings in hot humid climates. *Presses univ. de Louvain.Chambéry, France*, August 26-28.
12. Chen, X., Yang, H., & Lu, L. (2015). A comprehensive review on passive design approaches in green building rating tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1425-1436.
13. Tian, Z., Zhang, S., Li, H., Jiang, Y., Dong, J., Zhang, B., & Yi, R. (2015). Investigations of nearly (net) zero energy residential buildings in Beijing. *Procedia Engineering*, 121, 1051-1057.
14. Santos-Herrero, J. M., Lopez-Guede, J. M., & Flores-Abascal, I. (2021). Modeling, simulation and control tools for nZEB: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110851.

15. Hughes, B. R., & Cheuk-Ming, M. (2011). A study of wind and buoyancy driven flows through commercial wind towers. *Energy and Buildings*, 43(7), 1784-1791.
16. St. Clair, P., & Hyde, R. (2009). Towards a new model for climate responsive design at the university of the sunshine coast chancellorry. *Journal of green building*, 4(3), 3-20.
17. (S/f). Sitio web: Seiscubos.com. Recuperado el 08 de mayo de 2023, de <https://www.seiscubos.com/blog/imparable-incremento-del-uso-de-la-refrigeracion-en-los-edificios>
18. The Future of Cooling, Opportunities for Energy-Efficient Air Conditioning. U.S. Energy Information Administration, 2018. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>
19. Pierre-Louis, K. (2018). The World Wants Air-Conditioning. That Could Warm the World. *New York Times*.
20. Wang, Y., Li, Y., Sabatino, S. D., Martilli, A., & Chan, P. W. (2018). Effects of anthropogenic heat due to air-conditioning systems on an extreme high temperature event in Hong Kong. *Environmental Research Letters*, 13(3), 034015.
21. Chen, M., Sanders, K. T., & Ban-Weiss, G. A. (2019). A new method utilizing smart meter data for identifying the existence of air conditioning in residential homes. *Environmental Research Letters*, 14(9), 094004.
22. Robles-Bonilla, T., & Cedano, K. G. (2021). Addressing thermal comfort in regional energy poverty assessment with Nussbaumer's MEPI. *Sustainability*, 13(1), 352.
23. Cedano, K. G., Robles-Bonilla, T., Santillán, O. S., & Martínez, M. (2021). Assessing energy poverty in urban regions of Mexico: The role of thermal comfort and bioclimatic context. *Sustainability*, 13(19), 10646.
24. González-Eguino, M. (2015). Energy poverty: An overview. *Renewable and sustainable energy reviews*, 47, 377-385.
25. Boardman, B. (1991). Fuel poverty is different. *Policy Studies*, 12(4), 30-41.
26. García-Ochoa, R., & Graizbord, B. (2016). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. *Economía, sociedad y territorio*, 16(51), 289-337.
27. INEGI. (noviembre 2018). Primera encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares (ENCEVI). Instituto Nacional De Estadística y Geografía, Comunicado de prensa núm. 541/18, 18-22.
28. SEMARNAT - atlas / atmósfera. (s/f). Gob. Mx. Recuperado el 2 de mayo de 2023, de http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html
29. EDAFOLOGIA. Lección 4. Textura del suelo. (s/f). Edafologia.net. Recuperado el 2 de mayo de 2023, de <http://www.edafologia.net/introeda/tema04/text.htm>
30. SEMARNAT - atlas / suelos. (s/f). Gob. Mx. Recuperado el 5 de mayo de 2023, de http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/suel_TSuelo.html
31. Cárcel Carrasco, F. J., & Martínez Márquez, D. (2015). La energía geotérmica de baja entalpía. *3C Tecnología*, 4(3), 96-108.
32. EGEC - European Geothermal Energy Council. (2021, August 31). The Voice of Geothermal in Europe - EGEC - European Geothermal Energy Council. <https://www.egec.org/about/#aboutgeot>
33. IGME. Instituto Geológico y Minero de España. Web Site Oficial España. <https://www.igme.es/>
34. Comisión Reguladora de Energía. (2016). Informes anuales de la Comisión Reguladora de Energía 2011. <https://www.gob.mx/cre/documentos/informes-anuales-de-la-comision-reguladora-de-energia-2011>
35. Cheruy, F., Dufresne, J. L., Ait Mesbah, S., Grandpeix, J. Y., & Wang, F. (2017). Role of soil thermal inertia in surface temperature and soil moisture-temperature feedback. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9(8), 2906-2919.

36. Matsushima, D. (2018). Thermal Inertia-Based Method for Estimating Soil Moisture. In Soil Moisture. IntechOpen.
37. Bombas de calor geotérmicas, Especialistas en Geotermia. (2016, septiembre 28). Girod Geotermia. <https://girodgeotermia.com/>
38. Ángel Sánchez Inocencio. (2016). La primera casa autosuficiente sin facturas de agua o electricidad se ha hecho realidad y está perfilada como la casa del futuro. 2016, de El Horticultor Sitio web: <https://elhorticultor.org/la-primera-casa-autosuficiente-sin-facturas-de-agua-ni-luz-se-ha-hecho-realidad-y-se-perfila-como-la-vivienda-del-futuro/?amp>
39. Ángel Sánchez Inocencio. (2016). Pozo canadiense: tecnología sostenible que reduce costos de climatización hogareña. 2016, de El Horticultor Sitio web: <https://elhorticultor.org/pozo-canadiense-tecnologia-sostenible-que-reduce-costos-de-climatizacion-hogarena/>
40. Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., & Papanikolaou, N. (1994). Impact of ground cover on the efficiencies of earth-to-air heat exchangers. *Applied Energy*, 48(1), 19-32.
41. Gauthier, C., Lacroix, M., & Bernier, H. (1997). Numerical simulation of soil heat exchanger-storage systems for greenhouses. *Solar energy*, 60(6), 333-346.
42. El-Din, M. S. (1999). On the heat flow into the ground. *Renewable Energy*, 18(4), 473-490.
43. Su, H., Liu, X. B., Ji, L., & Mu, J. Y. (2012). A numerical model of a deeply buried air–earth–tunnel heat exchanger. *Energy and Buildings*, 48, 233-239.
44. Ramírez-Dávila, L., Xamán, J., Arce, J., Álvarez, G., & Hernández-Pérez, I. (2014). Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates. *Energy and buildings*, 76, 238-248.
45. Xamán, J., Hernández-Pérez, I., Arce, J., Álvarez, G., Ramírez-Dávila, L., & Noh-Pat, F. (2014). Numerical study of earth-to-air heat exchanger: The effect of thermal insulation. *Energy and buildings*, 85, 356-361.
46. Xamán, J., Hernández-López, I., Alvarado-Juárez, R., Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., & Chávez, Y. (2015). Pseudo transient numerical study of an earth-to-air heat exchanger for different climates of México. *Energy and Buildings*, 99, 273-283.
47. Wei, H., & Yang, D. (2019). Performance evaluation of flat rectangular earth-to-air heat exchangers in harmonically fluctuating thermal environments. *Applied Thermal Engineering*, 162, 114262.
48. Rosa, N., Soares, N., Costa, J. J., Santos, P., & Gervásio, H. (2020). Assessment of an earth-air heat exchanger (ICTA) system for residential buildings in warm-summer Mediterranean climate. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38, 100649.
49. Chiesa, G., & Zajch, A. (2020). Contrasting climate-based approaches and building simulations for the investigation of Earth-to-air heat exchanger (ICTA) cooling sensitivity to building dimensions and future climate scenarios in North America. *Energy and Buildings*, 227, 110410.
50. Agrawal, K. K., Misra, R., Agrawal, G. D., Bhardwaj, M., & Jamuwa, D. K. (2019). The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system. *Geothermics*, 82, 34-50.
51. Rodríguez-Vázquez, M., Xamán, J., Chávez, Y., Hernández-Pérez, I., & Simá, E. (2020). Thermal potential of a geothermal earth-to-air heat exchanger in six climatic conditions of México. *Mechanics & Industry*, 21(3), 308.
52. Mostafaiepour A, Goudarzi H, Khanmohammadi M, et al. Techno-economic analysis and energy performance of a geothermal earth-to-air heat exchanger (ICTA) system in residential buildings: A case study. *Energy Sci Eng.* 2021; 9:1807–1825. <https://doi.org/10.1002/ese3.952>
53. Mihalakakou, G., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1994). Modelling the thermal performance of earth-to-air heat exchangers. *Solar energy*, 53(3), 301-305.
54. Santamouris, M., Mihalakakou, G., Argiriou, A., & Asimakopoulos, D. N. (1995). On the performance of buildings coupled with earth to air heat exchangers. *Solar energy*, 54(6), 375-380.

55. Cichota, R., Elias, E. A., & van Lier, Q. D. J. (2004). Testing a finite-difference model for soil heat transfer by comparing numerical and analytical solutions. *Environmental Modelling & Software*, 19(5), 495-506.
56. James, H. M. (1980). Some extensions of the flash method of measuring thermal diffusivity. *Journal of Applied Physics*, 51(9), 4666-4672.
57. Badescu, V. (2007). Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house. *Renewable energy*, 32(5), 845-855.
58. Ascione, F., Bellia, L., & Minichiello, F. (2011). Earth-to-air heat exchangers for Italian climates. *Renewable energy*, 36(8), 2177-2188.
59. Vaz, J., Sattler, M. A., Brum, R. D. S., dos Santos, E. D., & Isoldi, L. A. (2014). An experimental study on the use of Earth-Air Heat Exchangers (ICTA). *Energy and buildings*, 72, 122-131.
60. Díaz-Hernández, H. P., Aguilar-Castro, K. M., & Melo, E. (2017). Diseño de un intercambiador de calor tierra-aire en clima cálido-húmedo. *Revista del Desarrollo Tecnológico*, 1, 44-51.
61. Li, H., Ni, L., Yao, Y., & Sun, C. (2019). Experimental investigation on the cooling performance of an Earth to Air Heat Exchanger (ICTA) equipped with an irrigation system to adjust soil moisture. *Energy and Buildings*, 196, 280-292.
62. Díaz-Hernández, H. P., Macias-Melo, E. V., Aguilar-Castro, K. M., Hernández-Pérez, I., Xamán, J., Serrano-Arellano, J., & López-Manrique, L. M. (2020). Experimental study of an earth to air heat exchanger (ICTA) for warm humid climatic conditions. *Geothermics*, 84, 101741.
63. Bordoloi, N., Sharma, A., Nautiyal, H., & Goel, V. (2018). An intense review on the latest advancements of Earth Air Heat Exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 261–280. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.056>
64. Soares, N., Rosa, N., Monteiro, H., & Costa, J. J. (2021). Advances in standalone and hybrid earth-air heat exchanger (ICTA) systems for buildings: A review. *Energy and Buildings*, 253(111532), 111532. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111532>
65. Benhammou, M., Draoui, B., Zerrouki, M., & Marif, Y. (2015). Performance analysis of an earth-to-air heat exchanger assisted by a wind tower for passive cooling of buildings in arid and hot climate. *Energy conversion and management*, 91, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.042>
66. Darius, D., Misaran, M. S., Rahman, M. M., Ismail, M. A., & Amaludin, A. (2017, July). Working parameters affecting earth-air heat exchanger (ICTA) system performance for passive cooling: A review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 217, No. 1, p. 012021). IOP Publishing.
67. Sampieri, R. H. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw Hill México.
68. Gray, D. D., & Giorgini, A. (1976). The validity of the Boussinesq approximation for liquids and gases. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 19(5), 545-551.
69. Xamán, J. (2016). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. Palibrio.
70. José Ángel Caballero Martínez. (2016). Software CAD/CAE. 2020, de IFIC Indico Sitio web: <https://slideplayer.es/slide/10231885/>
71. Oberkampf, W. L., & Trucano, T. G. (2002). Verification and validation in computational fluid dynamics. *Progress in aerospace sciences*, 38(3), 209-272.
72. Zawawi, M. H., Saleha, A., Salwa, A., Hassan, N. H., Zahari, N. M., Ramli, M. Z., & Muda, Z. C. (2018). A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD).

73. Mayeli, P., & Sheard, G. J. (2021). Buoyancy-driven flows beyond the Boussinesq approximation: A brief review. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 125(105316), 105316. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105316>
74. Mihalakakou, G., Santamouris, M., Lewis, J. O., & Asimakopoulos, D. N. (1997). On the application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles. *Solar Energy*, 60(3-4), 181-190.
75. Landsberg, H. E. (1961). *Microclimatology: Das Klima der bodennahen Luftschicht*. Rudolf Geiger. Vieweg, Braunschweig, Germany, ed. 4, 1961. 646 pp. Illus. *Science*, 134(3489), 1517-1517.
76. Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*/Suhav V. Patankar. Hemisphere, Washington [etc.], 1-2.
77. De las Heras Jimenez, S. (2012). *Mecánica de fluidos en ingeniería*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
78. Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid mechanics: the finite volume method*. In Prentice Hall.
79. Van Doormaal, J. P., & Raithby, G. D. (1984). Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows. *Numerical heat transfer*, 7(2), 147-163.
80. Ghia, U. K. N. G., Ghia, K. N., & Shin, C. T. (1982). High-Re solutions for incompressible flow using the Navier-Stokes equations and a multigrid method. *Journal of computational physics*, 48(3), 387-411.
81. de Vahl Davis, G. (1983). Natural convection of air in a square cavity: a benchmark numerical solution. *International Journal for numerical methods in fluids*, 3(3), 249-264.
82. Oosthuizen, P. H., & Naylor, D. (1999). *An introduction to convective heat transfer analysis*. New York, EU, McGraw Hill.
83. Cúnsulo, M., Kurbán, A., Tosetti, S., & Montilla, E. (2019). Potencial de enfriamiento geotérmico para edificaciones en zona árida. *Revista hábitat sustentable*, 9(2), 42-51.
84. Givoni Baruch. (1994). *Passive and low energy cooling of buildings*. New York: Jhon Wiley & Sons.
85. Derradji, M., & Aiche, M. (2014). Modeling the soil surface temperature for natural cooling of buildings in hot climates. *Procedia Computer Science*, 32, 615-621.
86. Kusuda, T., & Saitoh, T. (1980). *Simplified heating and cooling energy analysis calculations for residential applications* (No. PB-80-213986). National Engineering Lab. (NBS), Washington, DC (USA).
87. Bisioniya, T. S. (2015). Design of earth-air heat exchanger system. *Geothermal Energy*, 3, 1-10.
88. Arcos Feria Víctor (2016). *Estudio Experimental del desempeño térmico de un Intercambiador de Calor Tierra-Aire en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo* (Tesis de Maestría, Universidad de Quintana Roo).
89. Belloufi, Y., Brima, A., Zerouali, S., Atmani, R., Aissaoui, F., Rouag, A., & Moumami, N. (2017). Numerical and experimental investigation on the transient behavior of an earth air heat exchanger in continuous operation mode. *International Journal of Heat and Technology*, 35(2), 279-288.
90. Sitio web: Herramienta web de la NASA para consultar y descargar datos e información climatológica disponible en <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
91. Del año, E. (2023, mayo 17). Estaciones del año en México. Estaciones del año. <https://www.estacionesdelano.com/mexico/>
92. Sinencio, I. C. (2002). Incertidumbre en las mediciones: impactos económicos y sociales. In *Simposio de Metrología*. México: CENAM (pp. 1-6).
93. Termopar: Tipos y Aplicaciones. (s/f). Omega.com. Recuperado el 6 de agosto de 2023, de <https://mx.omega.com/prodinfo/termopar.html>
94. Ramírez-Dávila, L., Xamán Villaseñor, J., Arce, J., Álvarez, G., & Hernández-Pérez, I. (2014). Numerical study of earth-to-air heat exchanger for three different climates. *Energy and Building*, 238-248.

95. Becerra, G., Picazo, M., Aguilar, J. O., Xamán, J., Osorio, E., Hernandez, J., & Ledesma-Alonso, R. (2022). Experimental study of a geothermal earth-to-air heat exchanger in Chetumal, Quintana Roo, Mexico. *Energy Efficiency*, 15(4), 20.
96. Cuny, M., Lin, J., Siroux, M., & Fond, C. (2020). Influence of rainfall events on the energy performance of an earth-air heat exchanger embedded in a multilayered soil. *Renewable Energy*, 147, 2664-2675.
97. Aranda-Arizmendi, A., Rodríguez-Vázquez, M., Jiménez-Xamán, C. M., Romero, R. J., & Montiel-González, M. (2023). Parametric Study of the Ground-Air Heat Exchanger (GAHE): Effect of Burial Depth and Insulation Length. *Fluids*, 8(2), 40. <https://doi.org/10.3390/fluids8020040>
98. Sitio web: Consumo energético de los electrodomésticos en el hogar <http://enebro.pntic.mec.es/gald0000/proyectoCItalia/consumo.html>
99. Zhang, C., Wang, J., Li, L., Wang, F., & Gang, W. (2020). Utilization of earth-to-air heat exchanger to pre-cool/heat ventilation air and its annual energy performance evaluation: A case study. *Sustainability*, 12(20), 8330. <https://doi.org/10.3390/su12208330>
100. Comisión federal de electricidad (CFE), Guía para determinar el factor de emisión de bióxido de carbono equivalente para el sistema eléctrico nacional (2016).
101. Climate change and health. (s/f). Who.int. Recuperado el 11 de mayo de 2023, de <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
102. Bierwirth, P. N. (2018). Carbon dioxide toxicity and climate change: a major unapprehended risk for human health. Web Published: ResearchGate, 10. DOI: 10.13140/RG.2.2.16787.48168.
103. Infografía: ¿Cómo afecta el metano nuestra salud? (2020, octubre 20). Interamerican Association for Environmental Defense (AIDA). <https://aida-americas.org/es/infografia-como-afecta-el-metano-nuestra-salud>
104. ©PRTR-España. (s/f). N2O (Óxido nitroso). Ministerio de Agricultura, alimentación y medio ambiente. Recuperado el 11 de mayo de 2023, de <https://prtr-es.es/n2o-oxido-nitroso,15592,11,2007.html>
105. Ozono y salud - Medio ambiente - Portal del Gobierno de La Rioja. (s. f.). <https://www.larioja.org/medio-ambiente/es/calidad-aire-cambio-climatico/calidad-aire/ozono-troposferico/ozono>
106. Ventilación, S. (2019, mayo 9). Exceso de vapor de agua en el aire, ¿cómo solventarlo? El blog de la ventilación inteligente. <https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/exceso-vapor-agua-aire/>
107. Cartón, A. (2020, enero 3). CFC o CLOROFLUOROCARBONOS: Qué Son, Ejemplos y Productos. *ecologiaverde.com*. <https://www.ecologiaverde.com/cfc-o-clorofluorocarbonos-que-son-ejemplos-y-productos-2451.html>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

PROGRAMAS EDUCATIVOS DE CALIDAD RECONOCIDOS POR CIEES, CACEI Y CONAHCYT

SGI Certificada en la norma ISO 9001:2015 e ISO 21001:2018

FORMATO T-2

NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA
Y DICTAMEN DE REVISIÓN

Cuernavaca, Mor., a 27 de febrero de 2024.

DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ

DR. LUIS CISNEROS VILLALOBOS

DRA. MARIANA ROMERO AGUILAR

DR. JESÚS CEREZO ROMÁN

DR. MARTÍN RODRÍGUEZ VÁZQUEZ

DR. CARLOS MIGUEL JIMÉNEZ XAMÁN

DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ

P R E S E N T E

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la comisión revisora de la tesis que presenta ALFREDO ARANDA ARIZMENDI, titulada: Modelación de un sistema sustentable para el aprovechamiento de la energía geotérmica de baja entalpía por medio de un intercambiador de calor tierra-aire, realizada bajo la dirección del Dr. Moisés Montiel González, del Programa Educativo de Doctorado en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

A T E N T A M E N T E

Por una humanidad culta

MTRA. ANGÉLICA GALINDO FLORES

DIRECTORA INTERINA

D I C T A M E N

MTRA. ANGÉLICA GALINDO FLORES

DIRECTORA INTERINA DE LA FACULTAD

DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

D I C T A M E N

NOMBRE	VOTO	FIRMA
DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ	Aprobatorio	
DR. LUIS CISNEROS VILLALOBOS	Aprobatorio	
DRA. MARIANA ROMERO AGUILAR	Aprobatorio	
DR. JESÚS CEREZO ROMÁN	Aprobatorio	
DR. MARTÍN RODRÍGUEZ VÁZQUEZ	Aprobatorio	
DR. CARLOS MIGUEL JIMÉNEZ XAMÁN	Aprobatorio	
DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ	Aprobatorio	

Se anexan firmas electrónicas



Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería, Tel. (777) 329 70 00, Ext. 7039/ fcqei@uaem.mx

UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

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

ANGELICA GALINDO FLORES | Fecha:2024-02-28 10:02:38 | Firmante

PvIYXZBV5hfXavSRftILyDOvyNIQdXLR4DmugZEfJwerJ9SkE03kwzcbj4JLvujVY36O/iBKH5wARRtolknlj64f8Lbc1Ef57A1Q5J5FC9AttVSz9BGns1uKEAQCHfG9/55gaMKQAxey1tkWLBxbuXwiAkNMnQu88jEAFxj9G5MhXCfHZ3w/xMlsXTseKvgsrDyoG2CbT7ZwwEOthZBW46kL1o2dk6Rn+QxTWYGr7XHz0ZHlx66Q4eHpEbN34p/CwrzEoYmcbj05MnDOa qdF9wjLB39IK1U51F6DEJrr2osoTMxNpvlXoX39frHzLUSfRhNgTTvsX0mGB2CwwMJdA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[QNP96xEif](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/WK4Wj6EahBOFUyuDSgoQ5EC3LCf5rMuE>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

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

MOISES MONTIEL GONZALEZ | Fecha:2024-03-13 16:50:37 | Firmante

Z8jcbOm75IDTHWBomKL+kEjtYmNhZqvkb7mYK8JREbwyhSWagd42w4vxprOFbz3d7jug7yAvs77Yy9YK2cQWRDS3qSNxV/O9owZVzLNFEDsiga5GL+2uPPfbqTK3c2Bp1H5KEQnflQb+/+WMBbBVggTV75JzjeAK2ORdQLBA+3vzB7/Y6yhB8aiDp7EEcyozY6dcB8xtZJFWIRrJt6lYmPIAI7t4zM8CM10HG44IAbA6SdBP0hJcnvRtabJtgmTg5/mz2M2Mc1aG4x8cwNZpj5ZroR2H8t87w/68SfLUhQEIHUkay/rKcqwZ750R6dBTg6Y1Ds20nSz7F2MvP1iJg==

CARLOS MIGUEL JIMENÉZ XAMÁN | Fecha:2024-03-13 21:08:24 | Firmante

byFyJStM5Q10Vq5BdYD9+S9BVfkHcGsy8mdUvK6JdQX/WricW7dqQqm6uBRpCs78+xxnHCJNKWzbMw//8PvqEafABHd0SV+02/EU4Fpszn3esUIIWi8T06GNxAD55Zna19LkSMaJKKhAy5MWN6ki7JDIZHcDqPKcWRDA1hfCxULHheUvR3rpfD0eYwci3QldaEpD6ataXiz5B24g/GW+rqzSgl3ZTclpYBaxsGEAvPof3O6RR19tAygE/CuFYd2jns2w4hWqEPAWJtOdDi+UD3Ajo0gWmfCTQIApS+oaqNB0NLmZDaUrmAKRWXUPUwZ3n+EC4YM2+EsG5QuAM3w==

LUIS CISNEROS VILLALOBOS | Fecha:2024-03-13 21:48:33 | Firmante

KsCDMq0YqjaFcaWjNjGulVtLewSG2Os5l+fPqhBUPnm8ZJ4NU9Lht0tjVnWga1QAzjTolcOt2yau/CNkzb/Op5yiyvqPW1zj/VZYOGxqZbmDr9p4eFteQeTASD7UvqDiudcn04qHHsVW2g+qMAEnm9DDFo09meF1zbAyxwXwgKHQ2Kc2yM93PDQLzBUGcvsW1/zYyNoxztkvgh1JWECq3hUWE41nKB99MI8dbZgcXNgMtzHyfULDP3RNXXdSmwFHK2U65M2aiZ+2BO5uj0Y9JlIS5wJyuOF1vVZ8CYeWaKlv0TiT1mL0sPa16wQWCT1IEFfHY0/TVPEpReu6j4w==

MARTIN RODRÍGUEZ VÁZQUEZ | Fecha:2024-03-13 22:39:54 | Firmante

q/O4b/qO6vEZQ9RpEbP70LAI9w1YQNJ3Y5KSStVnfmL8/DpKakGf0Cy6glpo1nOV9/y/oMQUSRDj7zYR5HhggoxGI2zbnD SughuRdZicVWVUq8ATujkpfkfgnD+x2nwY9gEPtLY4Mj8jsG+plqfyLWPKHevga6WcKgD9PGUAzJ8SOzkWDkOresdPYoFbak4w/hCZKmhRKXgXAO/FMd9BGewTkmdLtmS9ZfZ6jNHO/m2RqG4GDbQlf904JS0fJ42336M4gryr5MeRQIRILHE5ELnnS5v3gZqnE0G0xhU7wt4fKCVVcs11iaqafikZa/GZaFhS1eWZvy2G25fNXdw==

MARIANA ROMERO AGUILAR | Fecha:2024-03-14 08:52:49 | Firmante

ILN5FWGuJqslxAr3xIOMERm7SoBeS1fq+rgRaSXTz80bMmMfNgzqioXSG/P2n3LMfSbi5qwTTm/ciEModZYHS/L/d13kz45T9/7mcnevNacXQQhEK/J9MN7luE90Uy71sE/nZmgdl2Wt2Pe+0f/0bOsM4dqL7B1IHV6l/xA1THNG9bkjckS6PmNIFPrMx/Lq3MDHq36JscO5VQwKL8NBEaX+x07MTN9rKsPUcmTxyfUISYQ2WhGWgmZfQ0Bb4Zu7tw9lTm1VP9FHLJLlCdXgcOsP+UeLCZ7KX8QFqS0Cyu7H64FSAMF61ekYV5ofozrGBx2gN8WGB9jG6BrNhSazw==

ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMINGUEZ | Fecha:2024-03-14 09:49:53 | Firmante

MQbrjP6t2G+CPTxonnuwhFudDnKAQ/XD8KR8WNhQLeZRH4Nxp6TAnYfDjrTppX6bsejkyOkx4T+7LcTEjBPPrsSa82ZcCveTqf1XDpp3FRLwLB5iskW/OpwYD3zfJJK74UQjByxnMj/FAYjqz19ZtSMHGH+TQ3MOMnn+HGInOsRVXqimM//TpsGKvwooUN51ha3reaj8037yqMfm2OD1L13jmlx/Nkymki6xFW5NOlzGBY429Js2I3ABK1i9fJWEJttWu/eJeGPee2inbPqfMwanZbH+dDhGkXRvscQBdtzXmMJ9vd+/GB8Sj7TrguzDoYCMKEP/s8XECxHuzWQ==

JESUS CEREZO ROMAN | Fecha:2024-03-20 08:51:41 | Firmante

qkuPPSiawNXeNS7xbFekJgSdbByhclgVpP1bVwRsz6c2xCLBFCgC30kblvdg+qllP9r/dh1OCC43Qjh9M79Xc5udYw2aE7HtROGxAZc9q64j2pgqjQ8XrrY7hnyTE28LVXGsuas7iHwCB4+MIEzkSUEM4bpMFECUzdV2JpCp4+LA1WTPrFCQ+ba+zaWMLQI2+pum3fYRJPd9z96UEnDlyFuoM6kSpGiOSEHQu56PEp9Xa7i5swzi8qckWOGCEVsa6hgXA5pqGRg2KFxDruV8zdEjnox65Vpl7Navp75swclw+AIYvklvJODleg8rNiIDzN6lp3cgGGFADBe0pLPg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



I0rbPQHB

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/xiwnL2sTMXzsne2AZrU4tGboZyT8DZ0>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029