Licenciatura: Ingeniería mecánica

Modalidad: Proyecto de Investigación

Proyecto:

“Análisis numérico de un destilador solar tipo caseta”

Nombre: Moisés Abraham Flores Valencia

Asesor: M. en C. Sandra Chávez Sánchez

Co-asesor: Dr. Hilario Terres Peña

Trimestre: 20-O

Ciudad de México. Marzo 2021

DECLARATORIA

Yo, M. en C. Sandra Chávez Sánchez, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

M. en C. Sandra Chávez Sánchez

DECLARATORIA

Yo, Dr. Hilario Terres Peña, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Dr. Hilario Terres Peña

DECLARATORIA

Yo, Moisés Abraham Flores Valencia, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Moisés Abraham Flores Valencia

AGRADECIMIENTOS

Para comenzar, no tengo manera, salvo estas palabras, de agradecer por todo lo que mis padres, Laura y Felipe, han hecho desde el principio para que este trabajo se haya completado. Gracias por la educación que me dieron desde pequeño, por alentarme a expandir mi potencial como estudiante y como ser humano. Gracias también por su amor y apoyo siempre incondicionales, y por sus consejos en los momentos en que he tenido que tomar decisiones.

Muchas gracias a José Luis y Sara, los provincianos, por estar desde hace una década. La transición a la vida universitaria en la CDMX fue toda una aventura. De ustedes he aprendido muchísimo y agradezco su compañía en esta etapa de crecimiento y madurez. Siempre que me necesiten estaré para ustedes, y espero seguir viéndonos crecer y triunfar juntos. Muchas gracias a Josh, Brenda, Toño, Sharon y Leo por su compañía durante estos años en la escuela. Me alegro por haber tenido la oportunidad de conocerlos, porque aprendí mucho de ustedes, y disfruté mucho los momentos vividos juntos a lo largo de los años. En mí tienen a un amigo siempre disponible, y espero que sean profesionales exitosos y plenos. Y gracias a los grandes amigos de Celaya: Lalo, Tío, Tocayo y Clara. Con ustedes he pasado experiencias increíbles, y para mí siempre es reconfortante tener mejores amigos en casa. Los quiero mucho, y pueden contar conmigo cuando lo necesiten.

Gracias también a mi asesora del proyecto, la M. en C. Sandra Chávez. Gracias por los conocimientos proporcionados en las UEAs, y en especial por brindarme la oportunidad y la confianza para participar en las actividades del servicio social y del proyecto de integración. Aprecio mucho que todo esto me ayudara a despertar y profundizar mi interés académico y profesional por las energías renovables. Gracias también por su disponibilidad para dar asesoría técnica y por la libertad de proponer ideas cuando fuera necesario para resolver situaciones que se presentaran en el proyecto.

Para finalizar, me gustaría agradecer a la universidad. Gracias a las oportunidades que se me presentaron durante estos años, pude desarrollar muchas habilidades, conocer personas increíbles y vivir experiencias que considero irrepetibles. La suma de todo esto me ha llevado a obtener una formación personal, académica y profesional valiosísima.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	8
NOMENCLATURA.....	9
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	11
OBJETIVOS.....	15
Objetivo general	15
Objetivos particulares.....	15
JUSTIFICACIÓN	15
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	16
1.1 Destilación solar	16
1.2 Tipos de destiladores solares	16
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	17
2.1 Análisis numéricos en destiladores solares	17
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO	22
3.1 Fundamentos de la transferencia de calor	22
3.1.1 Transferencia de calor por convección	22
3.1.2 Transferencia de calor por evaporación-condensación	25
3.1.3 Transferencia de calor por radiación.....	27
3.1.4 Transferencia de calor en un destilador solar tipo caseta.....	29
CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	34
4.1 Simulación numérica	34
4.1.1 Método de elementos finitos	34
4.1.2 Fundamentos.....	34
4.1.3 Descripción del método del elemento finito	35
4.1.4 Nodos.....	35
4.1.5 Discretización de elementos	36

4.1.6	Pasos esenciales para un Análisis de Elemento Finito (FEA).....	37
4.2	Formulación en diferencias finitas de ecuaciones diferenciales	38
4.3	Conducción unidimensional de calor en estado estacionario.....	39
4.4	Conducción bidimensional de calor en estado estacionario.....	41
4.5	Introducción al software ANSYS	42
4.5.1	Modelo multifase	43
4.5.2	Modelo de turbulencia	45
4.5.3	Modelo de radiación	47
CAPÍTULO 5. DESARROLLO DEL PROYECTO.....		49
5.1	Datos experimentales.....	49
5.2	Modelado del destilador solar en ANSYS	50
5.3	Discretización de elementos en el destilador solar	51
5.4	Aplicación de las condiciones de frontera	56
CAPÍTULO 6. RESULTADOS		59
6.1	Distribución de temperatura.....	59
6.2	Distribución de densidad del agua líquida	63
6.3	Distribución de densidad del vapor de agua	67
6.4	Distribución de velocidad de la mezcla de fluidos.....	71
CAPÍTULO 7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		74
7.1	Distribución de temperatura en función de γ ($5^\circ \leq \gamma \leq 40^\circ$)	74
7.2	Distribución de densidad del agua líquida en función de γ ($5^\circ \leq \gamma \leq 40^\circ$).....	76
7.3	Distribución de densidad del vapor de agua en función de γ ($5^\circ \leq \gamma \leq 40^\circ$)	78
7.4	Distribución de velocidad de la mezcla de fluidos en función de γ ($5^\circ \leq \gamma \leq 40^\circ$)	80
CONCLUSIONES.....		81
ENTREGABLES COMPROMETIDOS EN LA PROPUESTA.....		82
APÉNDICE A. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS DIVERSOS CASOS DE APLICACIÓN.....		83
A-1.	Distribución de temperatura.....	84
A-2.	Distribución de densidad del agua líquida	93
A-3.	Distribución de densidad del vapor de agua.....	102

A-4.	Distribución de velocidad de la mezcla de fluidos	111
A-5.	Distribución de radiación incidente	120
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		129

RESUMEN

La demanda de agua potable para consumo humano y para satisfacer ciertas necesidades en la población ha aumentado considerablemente. Para dar solución a dicha demanda, la destilación solar viene a contribuir en el aumento de la sustentabilidad y representa día a día una alternativa idónea para resolver los problemas esenciales de escasez de agua. Un destilador solar cuenta con una cubierta de vidrio que se utiliza como condensador y un recipiente absorbedor (charola metálica), en el cual se deposita el fluido a destilar. La radiación solar incide en el dispositivo y aumenta la temperatura del recipiente absorbedor y posteriormente del fluido, iniciándose así la evaporación. Como la superficie interna de la cubierta de vidrio se encuentra a una temperatura menor, el vapor al tener contacto con ella se condensa, recolectando así el fluido destilado.

Dentro de los muchos parámetros que intervienen en el funcionamiento de un destilador solar se encuentra el ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio. En este proyecto se analiza por el método de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, del inglés *Computational Fluid Dynamics*) cómo afecta la variación del ángulo en el comportamiento térmico del dispositivo. Las variables que se analizan son la temperatura, densidad y velocidad del fluido.

Los resultados muestran que la diferencia de temperatura y de densidad entre la cubierta de vidrio y el recipiente aumenta conforme aumenta el ángulo de inclinación en todos los horarios, hasta alcanzar un valor máximo local para $\gamma=35^\circ$. Dadas las condiciones de este trabajo, éste parece ser el ángulo óptimo, puesto que a una mayor diferencia de temperatura entre dos regiones del volumen se genera una mayor transferencia de calor entre ellas. Se concluye además que el flujo de fluido tiende a seguir un régimen laminar para ángulos de 5° a 25° , mientras que el flujo sigue un comportamiento turbulento para ángulos de 30° a 40° .

NOMENCLATURA

A	Área	v_{min}	Velocidad mínima del fluido
a	Coefficiente de absorción	x_m	Coordenada de nodo
C_p	Capacidad calorífica	Y_M	Dilatación fluctuante bajo turbulencia compresible
$C_{1\varepsilon},$ $C_{2\varepsilon},$ $C_{3\varepsilon}$	Constantes de la teoría de renormalización de grupos		
E	Energía	Subíndices	
$\dot{E}$	Razón de generación de calor	a	Ambiente
$\dot{e}$	Razón de generación de calor por unidad de volumen	b	Charola, Flotabilidad
$\vec{F}$	Fuerza externa	c	Convección
G	Radiación solar, Generación de energía cinética	der	Superficie derecha
Gr	Número de Grashof	e	Evaporación
$\vec{g}$	Aceleración gravitacional	$elem$	Elemento
h'_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección del destilador	g	Cubierta
I	Intensidad de radiación	izq	Superficie izquierda
k	Conductividad térmica, Energía cinética de turbulencia	k	Conducción, Gradiente promedio de velocidad
k_{eff}	Conductividad térmica efectiva	m	Nodo
L	Espesor	r	Radiación
M	Número de nodos en la dirección x	sat	Saturación
m	Masa, Coordenada de nodo en la dirección x	∞	Medio ambiente
m_D	Razón de transferencia de masa	Alfabeto griego	
N	Número de nodos en la dirección y	α	Absortancia, Fracción volumétrica
Nu	Número de Nusselt	$\alpha_\varepsilon, \alpha_k$	Inversos efectivos del número de Prandtl
n	Coordenada de nodo en la dirección y , Índice de refracción óptica	γ	Ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio
p	Presión estática	Δ	Diferencia
p_w	Presión de vapor	ΔT_f	Diferencia de temperatura del fluido
$\dot{Q}$	Razón de conducción de calor	$\Delta \rho_l$	Diferencia de densidad del agua líquida
q	Flujo de calor por unidad de área	$\Delta \rho_v$	Diferencia de densidad del vapor de agua
$\vec{r}$	Vector de posición	ε	Razón de disipación de la energía cinética de turbulencia
Ra	Número de Rayleigh		

S_h	Término de radiación y energía volumétrica	θ	Ángulo
S_{α_q}	Término de masa	μ	Viscosidad dinámica
s	Longitud de trayectoria	μ_{eff}	Viscosidad dinámica efectiva
$\vec{s}$	Vector de dirección	$\rho_{l,charola}$	Densidad media del agua líquida en la charola
$\vec{s}'$	Vector de dirección de dispersión	$\rho_{l,vidrio}$	Densidad media del agua líquida en el vidrio
T	Temperatura	$\rho_{v,charola}$	Densidad media del vapor de agua en la charola
$T_{m,charola}$	Temperatura media del fluido en la charola	$\rho_{v,vidrio}$	Densidad media del vapor de agua en la vidrio
$T_{m,vidrio}$	Temperatura media del fluido en el vidrio	σ	Constante de Stefan-Boltzmann
t	Tiempo	σ_s	Coefficiente de dispersión
u	Velocidad del fluido	τ_c	Transmitancia de la cubierta
V	Volumen	Φ	Función de fase
$\vec{v}$	Velocidad	Ω'	Ángulo sólido
$v_{m\acute{a}x}$	Velocidad máxima del fluido	∇	Gradiente

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Datos iniciales de temperatura y radiación solar en función del tiempo	50
Tabla 4.2. Número de nodos y elementos para cada destilador	52
Tabla 4.3. Condiciones de frontera del destilador.....	58
Tabla 5.1. Temperatura máxima del volumen de fluido en función del ángulo de la cubierta.....	59
Tabla 5.2. Temperatura media del fluido en la charola en función del ángulo de la cubierta	62
Tabla 5.3. Densidad máxima del agua líquida en función del ángulo de la cubierta	64
Tabla 5.4. Densidad media del agua líquida en la charola en función del ángulo de la cubierta	66
Tabla 5.5. Densidad media del vapor de agua en el vidrio en función del ángulo de la cubierta.....	68
Tabla 5.6. Densidad media del vapor de agua en la charola función del ángulo de la cubierta	70
Tabla 5.7. Velocidad máxima de la mezcla de fluidos en función del ángulo de la cubierta.....	72
Tabla 5.8. Velocidad mínima de la mezcla de fluidos en función del ángulo de la cubierta.....	73
Tabla 6.1. Diferencia de temperatura del fluido en función del ángulo de la cubierta.....	74
Tabla 6.2. Diferencia de densidad del agua líquida en función del ángulo de la cubierta.....	76
Tabla 6.3. Diferencia de densidad del vapor de agua en función del ángulo de la cubierta	78

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 5.1. Temperatura media del fluido en el vidrio en función del ángulo de la cubierta	60
Gráfica 5.2. Temperatura media del fluido en el vidrio en función del ángulo de la cubierta para las 13 h, 14 h, 15 h y 16 h	61
Gráfica 5.3. Temperatura media del fluido en la charola en función del ángulo de la cubierta	62
Gráfica 5.4. Temperatura media del fluido en la charola en función del ángulo de la cubierta para las 13 h, 14 h, 15 h y 16 h	63
Gráfica 5.5. Densidad media del agua líquida en la cubierta en función del ángulo de la cubierta	64
Gráfica 5.6. Densidad media del agua líquida en el vidrio en función del ángulo de la cubierta para las 13 h, 14 h, 15 h y 16 h	65
Gráfica 5.7. Densidad media del agua líquida en la charola en función del ángulo de la cubierta	66
Gráfica 5.8. Densidad media del agua líquida en la charola en función del ángulo de la cubierta para las 13 h, 14 h, 15 h y 16 h	67
Gráfica 5.9. Densidad media del vapor de agua en el vidrio en función del ángulo de la cubierta	68
Gráfica 5.10. Densidad media del vapor de agua en el vidrio en función del ángulo de la cubierta para las 13 h, 14 h, 15 h y 16 h.....	69
Gráfica 5.11. Densidad media del vapor de agua en la charola función del ángulo de la cubierta	70
Gráfica 5.12. Densidad media del vapor de agua en la charola función del ángulo de la cubierta para las 13 h, 14 h, 15 h y 16 h	71
Gráfica 5.13. Velocidad máxima de la mezcla de fluidos en función del ángulo de la cubierta	72
Gráfica 6.1. Diferencia de temperatura del fluido en función del ángulo de la cubierta	75
Gráfica 6.2. Diferencia de densidad del agua líquida en función del ángulo de la cubierta	77
Gráfica 6.3. Diferencia de densidad del vapor de agua en función del ángulo de la cubierta	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Clasificación de los destiladores solares (Tiwari et al, 2016)	16
Figura 1.2. Apariencia de un destilador solar de una vertiente (Chávez, 2015)	17
Figura 1.3. Tasa de producción de agua potable según datos experimentales y de simulación (Mahmood et al, 2017)	18
Figura 1.4. Tasa de producción de agua potable en función del ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio (Aybar et al, 2009)	20
Figura 1.5. Ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio en función del ángulo de latitud (Khalifa, 2011)	20
Figura 1.6. Agua potable recolectada total en función del ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio (Azooz y Younis, 2016).....	21
Figura 2.1. Convección natural en una placa inclinada con temperatura baja en la superficie inferior	23

Figura 2.2. Convección natural en una placa horizontal con temperatura alta en la superficie superior	24
Figura 2.3. Distribución de temperatura en distintos instantes como función de la distancia vertical (Kozanoglu, 2007)	25
Figura 2.4. Esquema de la sección transversal de un destilador solar tipo caseta	30
Figura 2.5. Principales mecanismos de transferencia de energía en un destilador solar tipo caseta	31
Figura 3.1. Tipos de elementos comunes en el método del elemento finito (Dean y Nicolescu, s.f.)	36
Figura 3.2. Ejemplo de malla generada por el método de elementos finitos (Dean y Nicolescu, s.f.)	37
Figura 4.1. Dimensiones de la sección transversal del destilador solar	51
Figura 4.2. Geometría y malla del destilador con $\gamma=5^\circ$	53
Figura 4.3. Geometría y malla del destilador con $\gamma=10^\circ$	53
Figura 4.4. Geometría y malla del destilador con $\gamma=15^\circ$	54
Figura 4.5. Geometría y malla del destilador con $\gamma=20^\circ$	54
Figura 4.6. Geometría y malla del destilador con $\gamma=25^\circ$	55
Figura 4.7. Geometría y malla del destilador con $\gamma=30^\circ$	55
Figura 4.8. Geometría y malla del destilador con $\gamma=35^\circ$	56
Figura 4.9. Geometría y malla del destilador con $\gamma=40^\circ$	56
Figura A-1.1. Temperatura a las 10:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°	84
Figura A-1.2. Temperatura a las 10:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°	84
Figura A-1.3. Temperatura a las 11:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°	85
Figura A-1.4. Temperatura a las 11:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°	85
Figura A-1.5. Temperatura a las 12:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°	86
Figura A-1.6. Temperatura a las 12:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°	86
Figura A-1.7. Temperatura a las 13:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°	87
Figura A-1.8. Temperatura a las 13:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°	87
Figura A-1.9. Temperatura a las 14:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°	88
Figura A-1.10. Temperatura a las 14:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°	88
Figura A-1.11. Temperatura a las 15:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°	89
Figura A-1.12. Temperatura a las 15:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°	89
Figura A-1.13. Temperatura a las 16:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°	90
Figura A-1.14. Temperatura a las 16:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°	90
Figura A-1.15. Temperatura a las 17:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°	91
Figura A-1.16. Temperatura a las 17:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°	91
Figura A-1.17. Temperatura a las 18:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°	92
Figura A-1.18. Temperatura a las 18:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°	92
Figura A-2.1 Densidad del agua líquida a las 10:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°	93
Figura A-2.2 Densidad del agua líquida a las 10:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°	93
Figura A-2.3 Densidad del agua líquida a las 11:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°	94
Figura A-2.4. Densidad del agua líquida a las 11:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°	94

OBJETIVOS

Para el presente proyecto se establecieron los siguientes objetivos:

Objetivo general

Analizar, mediante métodos numéricos, el comportamiento térmico de un destilador solar tipo caseta al variar el ángulo de la cubierta de vidrio.

Objetivos particulares

Caracterizar la radiación solar incidente y las temperaturas en las superficies que delimitan al destilador solar, tales como: fluido, charola y cubierta de vidrio, para ponderar su funcionamiento.

Modelar y discretizar la configuración del destilador solar en ANSYS para obtener las distribuciones de temperatura, densidad y velocidad durante el proceso de destilación solar, variando el ángulo de la cubierta de vidrio de 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35° y 40°.

Evaluar los resultados y determinar cuál es el ángulo óptimo de inclinación en el destilador solar.

JUSTIFICACIÓN

Existen muchas pruebas experimentales que muestran diferentes resultados sobre el desempeño de los destiladores solares tipo caseta tomando como parámetro principal el ángulo de elevación de la cubierta de vidrio del destilador. Sin embargo, todos los resultados que se encuentran en la literatura especializada en destilación son para localidades en diferentes países.

En este sentido, la realización de este proyecto es importante porque aportará nuevos resultados referentes al ángulo óptimo en la cubierta de vidrio para las condiciones de la Ciudad de México. Además, la importancia de realizar la simulación del proceso de destilación reside en que actualmente esta actividad resulta más práctica que construir un equipo para cada ángulo de inclinación y caracterizar experimentalmente las distribuciones de temperatura, de densidad y de velocidad en cada uno de los destiladores.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Destilación solar

La destilación solar es un proceso utilizado para purificar agua salina y convertirla en agua potable usando energía solar (Tiwari et al, 2016). Este proceso también puede interpretarse como una replicación del ciclo natural del agua, donde un volumen de agua en estado líquido se evapora. Debido al cambio en la densidad del agua, ésta asciende hasta un punto donde la temperatura del medio ocasiona que se condense. Y finalmente, el agua en estado líquido desciende por la gravedad.

Un ejemplo de estudio del proceso de destilación es el proyecto realizado sobre el diseño, la construcción y la evaluación experimental y exergética de un destilador solar (Chávez, 2015). La relevancia de este trabajo reside en el hecho de que de aquí se tomarán la geometría y las dimensiones para crear el modelo que será simulado numéricamente en el proyecto.

1.2 Tipos de destiladores solares

De acuerdo con la figura 1.1 los destiladores solares se clasifican principalmente según su funcionamiento, siendo este pasivo o activo.

Figura 1.1. Clasificación de los destiladores solares (Tiwari et al, 2016)

Para este proyecto, se estudiará el comportamiento de un destilador solar de una vertiente, el cual es mostrado en la figura 1.2.

Figura 1.2. Apariencia de un destilador solar de una vertiente (Chávez, 2015)

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1 Análisis numéricos en destiladores solares

En las últimas décadas, al proceso de desarrollo de proyectos en ingeniería se ha incorporado la etapa de simulación, y especialmente en proyectos de ingeniería solar. Por ejemplo, en 2017 el método de modelado por CFD fue empleado para investigar parámetros de un destilador solar, donde se compararon los datos de la simulación usando el software ANSYS-FLUENT con los datos experimentales (Mahmood et al, 2017). En la figura 2.1 se muestran los resultados reportados en el trabajo.

Figura 2.1. Tasa de producción de agua potable según datos experimentales y de simulación (Mahmood et al, 2017)

Por otra parte, en otro estudio se simuló la productividad de un destilador solar tipo caseta (destilador solar de una vertiente) mediante el software ANSYS-CFX. Se usó un modelo tridimensional con dos fases para estudiar los procesos de evaporación y condensación. Además, se implementaron las condiciones meteorológicas de Mehsana, India, abarcando desde las 9:00 hasta las 17:00 horas, en intervalos de 1 hora. Los investigadores consideraron un modelo en estado estacionario, donde aplicaron condiciones de temperatura y radiación a las superficies del destilador. Como resultado, encontraron un buen ajuste entre los resultados experimentales y los de la simulación para la producción de agua destilada, la temperatura del agua y los coeficientes de transferencia de calor (Panchal y Shah, 2011).

En otro trabajo, estos mismos investigadores simularon un destilador con geometría hemisférica y cubierta de acrílico, pero ahora usando el software FLUENT de ANSYS. El propósito de su trabajo fue analizar la distribución de temperaturas en el destilador y la productividad de agua líquida destilada en función de la hora del día. En este proyecto, utilizaron datos de temperatura y radiación en las superficies del destilador para un intervalo de las 9:00 a las 17:00 horas, en periodos de 1 hora, en el mes de mayo de 2012, para la localidad de Mehsana, India. Y de la misma forma que en su trabajo anterior, realizaron una simulación en estado estacionario para cada hora del intervalo. Al final, los resultados de la simulación también se ajustaron adecuadamente a los datos obtenidos de forma experimental con anterioridad (Panchal y Shah, 2013).

Este conjunto de trabajos es relevante porque muestra la alta concordancia entre los de datos experimentales y los arrojados por simulaciones, y revela que los programas de simulación son herramientas potentes y confiables para analizar el funcionamiento de los distintos diseños de sistemas de destilación solar.

Ahora bien, uno de los parámetros que es posible estudiar en un destilador solar tipo caseta es el ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio. A partir de este parámetro se puede analizar cómo afecta la variación del ángulo el desempeño del dispositivo.

En la última década y en diferentes partes del mundo se han llevado a cabo diversas pruebas experimentales donde se modifica este parámetro. Desafortunadamente, se ha llegado a resultados heterogéneos. Por ejemplo, en proyectos independientes se encontró que la productividad de un destilador solar es máxima cuando el ángulo de inclinación es igual a la latitud de la locación geográfica de las pruebas, es decir que el ángulo óptimo depende a su vez de otro parámetro (Aybar et al, 2009) (Khalifa, 2011). En las figuras 2.2 y 2.3 se muestran los resultados reportados en los trabajos.

Figura 2.2. Tasa de producción de agua potable en función del ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio (Aybar et al, 2009)

Figura 2.3. Ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio en función del ángulo de latitud (Khalifa, 2011)

En contraparte, en otro trabajo se determinó que la productividad del dispositivo es máxima cuando el ángulo de inclinación está en el intervalo de 20° a 25°, es decir que establecieron un intervalo constante en el que se obtienen las condiciones óptimas (Azooz et al, 2016). Este conjunto de investigaciones es relevante para el proyecto porque sientan una base experimental de qué ángulo es óptimo, y sirve para comparar los resultados teóricos que se obtengan al final de este proyecto. En la figura 2.4 se muestran los resultados reportados en el trabajo.

Figura 2.4. Agua potable recolectada total en función del ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio (Azooz y Younis, 2016)

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1 Fundamentos de la transferencia de calor

El calor es la transferencia de energía térmica debido a una diferencia de temperatura en el espacio (Incropera et al, 2007). En general, existen varios *modos* para transferir el calor. En este capítulo se tratarán algunos de ellos y se describirán los fenómenos más importantes relacionados con el funcionamiento de un destilador solar.

3.1.1 Transferencia de calor por convección

El *modo* de transferencia de calor por convección se compone de dos *mecanismos*. Además de la transferencia de energía por el movimiento molecular aleatorio (difusión), la energía se transfiere también por el movimiento macroscópico, o de volumen, del fluido. Este movimiento de fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes cantidades de moléculas se mueven colectivamente, o como agregados.

En la convección, cuando un volumen de fluido se mueve, conserva también la energía asociada al movimiento aleatorio de sus moléculas. Por tanto, la convección es la superposición del transporte de energía por el movimiento del fluido como volumen y como moléculas vibrando aleatorias.

Convección natural

La convección en fluidos puede clasificarse según si es natural o forzada, dependiendo de la ausencia o presencia, respectivamente, de elementos que aumenten el momentum del fluido. En la convección natural, el movimiento de fluido se debe a las fuerzas de flotación dentro del fluido. La flotación ocurre por la presencia combinada de un gradiente de densidad del fluido y una fuerza de cuerpo que es proporcional a la densidad. En la práctica, la fuerza de cuerpo es usualmente de tipo gravitacional. También existen muchas formas en que puede originarse un gradiente de densidad de masa en un fluido, pero la situación más común es la presencia de un gradiente de temperatura. Se sabe que la densidad de los gases y líquidos depende de la temperatura, y generalmente decrece (debido a la expansión del fluido) al incrementar la temperatura ($\partial\rho/\partial T < 0$).

Convección natural en placas

En un destilador solar, se pueden identificar dos placas sometidas a convección natural: la charola, considerada como una placa horizontal con superficie superior a temperatura alta; y la cubierta de vidrio, que se interpreta como una placa inclinada con superficie inferior a temperatura baja. Cuando una placa se encuentra inclinada un ángulo θ con respecto a la gravedad, la fuerza de flotación tiene una componente normal y una paralela a la superficie de dicha placa. Al reducirse la fuerza de flotación paralela a la superficie se origina una reducción en las velocidades del fluido a lo largo de la placa.

Por otro lado, si la placa es horizontal, la fuerza de flotación es completamente normal a la superficie. Cuando la superficie a temperatura baja se expone hacia abajo, o la superficie a temperatura alta se expone hacia arriba, el flujo de fluido es causado por parcelas de fluido que ascienden y descienden. La conservación de la masa dicta que un fluido frío (caliente) descendente (ascendente) desde una superficie (a una temperatura T_s) será remplazado por un fluido ascendente (descendente) a temperatura más alta (más baja) desde el entorno (que se encuentra a una temperatura T_∞), y la transferencia de calor será mucho más efectivo. En las siguientes figuras se muestra el comportamiento mencionado en los párrafos anteriores.

Figura 3.1. Convección natural en una placa inclinada con temperatura baja en la superficie inferior

Figura 3.2. Convección natural en una placa horizontal con temperatura alta en la superficie superior

Capa límite térmica

Otro fenómeno relacionado con la convección es la capa límite térmica. Cuando un fluido está en contacto con una superficie a una temperatura más alta o baja que la suya, las moléculas en la *capa* o región del fluido más cercana a dicha superficie adquieren una temperatura muy cercana a la de ésta. Pero conforme las capas del fluido se alejan en dirección perpendicular a la superficie, su temperatura comienza a disminuir o aumentar, hasta que ésta deja de verse afectada por la presencia de la superficie. La región del fluido donde la variación de la temperatura es significativa es la *capa límite térmica*. Un parámetro importante en la capa límite térmica es el *espesor*, que se define como la distancia, desde la superficie a la cual la diferencia entre la temperatura del fluido y la de la superficie es de 99%.

Aunque este fenómeno tiene una definición general, la forma en que la capa límite se desarrolla en la práctica depende mucho de otros factores, como si el fluido está en movimiento o no, la viscosidad del fluido, el tipo de superficie a estudiar (por ejemplo, si es una esfera, una placa o un cilindro) la orientación relativa de la superficie con el fluido, o si la convección es natural o forzada, entre otros. Para el caso de un destilador solar, se tiene un fluido (agua líquida) en reposo sobre una superficie plana colocada horizontalmente, bajo un régimen de convección natural.

En la literatura y la teoría, este caso de estudio no cuenta con abundantes referencias. Afortunadamente, existe un trabajo donde se estudió la formación de la capa límite térmica para una situación en condiciones muy similares (Kozanoglu et al, 2007). El experimento constaba de un volumen de agua purificada en reposo colocado sobre una placa de aluminio pintada de negro, y aislada térmicamente con poliuretano en la superficie inferior. Además, como fuente de calor se

tenía una lámpara colocada a una distancia cercana del volumen de agua. La energía por radiación emitida por esa fuente se midió con un piranómetro en la superficie superior del volumen de agua líquida. Usando técnicas de interferometría holográfica, los investigadores obtuvieron la distribución de temperatura en el fluido en diferentes instantes.

En sus resultados fue posible observar que, durante un periodo inicial, el modo predominante de transferencia de calor fue la conducción, dado que el fluido no se movía de manera apreciable. Pero después, el modo predominante de transferencia de calor fue la convección, y fue posible observar la formación de corrientes en el fluido debido a las variaciones de densidad del agua debido a las variaciones de temperatura. Además, los investigadores estudiaron la variación de la diferencia de temperatura $T-T_o$ en función de la distancia vertical del fluido. En este caso, T es la temperatura promedio del fluido y T_o es la temperatura de la superficie de la placa de aluminio. Los resultados se muestran en la siguiente figura. Aquí I_o es la radiación medida en la superficie superior del agua. Se observa que, con el paso del tiempo, el valor de $T-T_o$ aumenta para un mismo valor de altura del volumen de agua. En la figura 2.3 se observan los resultados reportados en el trabajo.

Figura 3.3. Distribución de temperatura en distintos instantes como función de la distancia vertical (Kozanoglu, 2007)

3.1.2 Transferencia de calor por evaporación-condensación

Ebullición

Cuando una superficie se expone a un líquido y se mantiene a una temperatura superior a la temperatura de saturación del líquido, es posible que se presente la ebullición (Holman, 2010). Este es un fenómeno identificado comúnmente por la formación de burbujas de vapor en la interfaz

sólido-líquido, que, por la diferencia de presión entre el vapor y el líquido, ascienden hasta la superficie libre del líquido y ahí la burbuja explota.

Cuando la superficie calentada se sumerge bajo un líquido que tiene una superficie libre y no tiene fuerzas externas de agitación, este tipo de ebullición se conoce como *ebullición de estanque*. Si la temperatura del líquido es menor a su temperatura de saturación, al proceso se le llama *subenfriado*. Si el líquido se mantiene a su temperatura de saturación, el proceso se denomina *saturado*.

Evaporación

En un destilador solar se cumplen las condiciones de ebullición de estanque, y ocurre un proceso de evaporación en la interfaz sólido-líquido, donde el sólido es la charola metálica y el líquido es el volumen de agua líquida. Esta evaporación es un tipo particular de ebullición por convección natural, donde la temperatura de la superficie es ligeramente mayor que la temperatura de saturación del agua para la presión del sistema. Las corrientes de convección hacen que el líquido sobrecalentado circule y se desplace (por las fuerzas de flotabilidad) hacia arriba. La evaporación del agua ocurre en la superficie libre del líquido, dado que en esta zona la temperatura del agua sigue siendo mayor a su temperatura de saturación.

Condensación

El fenómeno de la condensación puede ocurrir en dos situaciones: Para un vapor a una temperatura determinada, la presión de éste aumenta hasta ser mayor a su presión de saturación; o cuando la temperatura de un vapor desciende hasta ser menor a su temperatura de saturación, para una presión determinada. Esta segunda situación se presenta normalmente cuando el vapor entra en contacto con una superficie con una temperatura menor a la temperatura de saturación de ese vapor.

Existen dos formas por las que se desarrolla la condensación: en película y por gotas. Para este trabajo la condensación por gotas es relevante, dado que en los destiladores solares el vapor de agua asciende hasta encontrarse con la cubierta de vidrio. En ese momento, debido a la diferencia de temperaturas y a las propiedades físicas del agua, ésta se condensa en gotas, y al alcanzar cierto tamaño, las gotas descienden por la cubierta hasta las orillas, donde el agua se recolecta y se extrae del destilador.

La condensación por gotas es uno de los mecanismos más eficaces de la transferencia de calor, dado que se pueden lograr coeficientes de transferencia extremadamente grandes. Pero es importante recalcar que estos coeficientes tienen poco significado si el material de la superficie de condensación no es un buen conductor, o si la resistencia térmica al otro lado de la superficie es demasiado grande (Cengel et al, 2007).

3.1.3 Transferencia de calor por radiación

La energía térmica de radiación puede estar compuesta de ondas electromagnéticas o de partículas energéticas sin masa, llamadas fotones (Modest, 2003). Todos los materiales emiten y absorben continuamente ondas electromagnéticas, o fotones, al disminuir o aumentar los niveles de energía moleculares. La fuerza y las longitudes de onda de las emisiones dependen de la temperatura del material emisor.

La radiación térmica funciona de la siguiente manera: Cuando una onda electromagnética que viaja a través de un medio (o el vacío) golpea la superficie de otro medio (sólido o líquido), la onda puede ser reflejada (total o parcialmente), y cualquier porción no reflejada penetrará en el medio. Al continuar por dicho medio, la onda puede atenuarse continuamente.

Si la atenuación es completa, de manera que no reemerja ninguna radiación penetrante, se dice que el medio es *opaco*. Si una onda atraviesa el medio sin atenuarse, se dice que el medio es *transparente*, y un medio con atenuación parcial se llama *semitransparente*. Estas propiedades dependen del tipo de material, así como de su espesor. Además, una superficie que no refleje radiación alguna se llama *absorbedor perfecto* o *superficie negra*.

Un fenómeno relevante en la radiación térmica es la *potencia de emisión*. Todos los medios emiten radiación electromagnética de forma continua y aleatoria en todas direcciones, a una razón que depende de la temperatura local y de las propiedades del material. El flujo de calor por radiación emitido por una superficie se llama *potencia de emisión*. Pero, aunque esta magnitud parezca ser la elección natural para describir el flujo térmico por radiación que despiende una superficie, no es adecuado para describir la dependencia direccional del campo de radiación, especialmente en un medio absorbente/emisor, donde es posible que los fotones no se hayan originado en la superficie. Por tanto, se define la intensidad de radiación I , como el flujo de energía radiativa por unidad de ángulo sólido y área normal a los rayos.

Características de la radiación en materiales opacos

Al realizar un balance de energía para un punto en el espacio, deben considerarse los fotones que llegan a dicho punto, sin importar desde qué tan lejos vengan. Por tanto, se debe realizar un balance de energía en un volumen cerrado cubierto por paredes opacas. Para un medio de espesor finito, si existe radiación térmica incidente sobre él, una parte de esa radiación será reflejada, una fracción será absorbida dentro de la capa de material, y el resto será transmitido a través de él. En esta situación se definen, respectivamente, tres propiedades radiativas fundamentales: la reflectancia, la absorptancia y la transmitancia. La suma de las tres debe ser igual a 1, o a 100%, debido a la conservación de energía por radiación. Para un material opaco, la transmitancia debe ser igual a 0.

Características de la radiación en sólidos y líquidos

Existe un número de sustancias líquidas y sólidas que sólo pueden absorber energía de radiación gradualmente, de forma que estos materiales no pueden considerarse superficies opacas, sino semitransparentes. Los ejemplos típicos para la parte visible del espectro radiativo son el agua, el vidrio, el cuarzo, etc. La absorción y emisión de fotones en los líquidos se debe a las interacciones con electrones libres, así como por la excitación por la vibración de las redes de átomos. Por tanto, los materiales semitransparentes siempre tienen baja conductividad eléctrica. (Modest 2003).

Características de la radiación en gases

Al igual que un medio sólido, los gases pueden absorber y emitir energía de radiación. Todos los átomos y moléculas de un gas acarrean una cierta cantidad de energía, compuesta de energía cinética (energía traslacional de una molécula) y energía interna. La energía interna de una molécula, a su vez, está formada por varias contribuciones, principalmente de los niveles de estados de energía electrónica, vibracional y rotacional. Por tanto, un fotón que pase por un gas puede ser absorbido por una molécula, lo que aumenta el nivel de uno de los estados de energía interna. Por otro lado, una molécula puede emitir espontáneamente un fotón para disminuir uno de sus estados de energía interna (Modest, 2003).

Características de la radiación en materiales semitransparentes

Los medios semitransparentes forman parte del tipo de medios conocidos como *materiales radiativamente participativos*, donde estos materiales absorben y emiten energía, y cuya

distribución de temperatura, por tanto, se ve afectada fuertemente por la radiación térmica. Sin embargo, existen aplicaciones importantes donde la radiación térmica entra en un espacio a través de un medio semitransparente, cuya distribución de temperatura no se ve afectada por la radiación incidente. Las aplicaciones de este tipo incluyen las placas que cubren los colectores solares, las ventanas en espacios interiores, etc.

Para una placa de vidrio con un espesor substancialmente mayor que la longitud de onda de la luz incidente, las propiedades radiativas se determinan fácilmente por medio de la óptica geométrica y la luz incidente. Por ejemplo, puede suponerse que la placa se encuentra entre dos materiales dieléctricos A y B (con conductividad eléctrica baja) distintos, y que los tres elementos tienen índices de refracción diferentes. Cuando la radiación proveniente del material B incide en su interfaz con el vidrio, una fracción se refleja de vuelta al material, y la porción restante se refracta en el vidrio, de acuerdo con la ley de Snell. Después de viajar una distancia a través del vidrio con una nueva dirección, una nueva radiación atenuada llega a la interfaz con el material B. Aquí, una porción de la radiación se refleja de vuelta a la interfaz del vidrio con el material A, y la fracción restante abandona la placa de vidrio y penetra en el material B con un nuevo ángulo de incidencia. La radiación reflejada internamente en el vidrio continúa “rebotando” de ida y vuelta entre las interfaces, hasta que toda la energía se agota por reflexión hacia el material A, por absorción dentro del vidrio, y por transmisión hacia el material B.

En este proyecto, la cubierta de vidrio de los destiladores solares cumple con las características de un medio semitransparente, en el que incide la radiación térmica solar. Además, también se encuentra entre dos materiales con índices de refracción distintos: el aire y la mezcla de vapor de agua y agua condensada en forma de gotas.

3.1.4 Transferencia de calor en un destilador solar tipo caseta

La primera aplicación conocida de la destilación solar sucedió en 1872 en Las Salinas, en el desierto del norte de Chile, operando por tres décadas para proveer agua potable a los animales, usada originalmente en la minería del nitrato (Duffie, 2013). Dentro de los muchos tipos de destiladores solares que existen, se encuentra el de tipo cuenca. Estos destiladores pueden tener una o dos vertientes. En la figura 3.4 se muestra un destilador de una vertiente, también conocido como *destilador tipo caseta*. La cubierta usualmente es de vidrio, o de película de plástico.

Figura 3.4. Esquema de la sección transversal de un destilador solar tipo caseta

En condiciones de operación, la radiación solar se transmite a través de la cubierta y es absorbida por el agua que está en la charola. La sustancia se calienta, el agua se evapora y el vapor asciende a la cubierta por convección, donde se condensa en la cara inferior de la cubierta. El condensado fluye por gravedad hacia las canaletas ubicadas en los extremos inferiores de la cubierta. Es importante mencionar que la cubierta debe tener una pendiente lo suficientemente grande para que la tensión superficial del agua le permita fluir a las canaletas sin caer de vuelta a la charola.

En la figura 3.5 se muestran los principales flujos de energía en un destilador en condiciones de operación. Los subíndices r , c y e significan, respectivamente, radiación, convección y evaporación. El objetivo al diseñar un destilador es maximizar Q_e , es decir el transporte de radiación solar hacia la cubierta por el vapor de agua, dado que es directamente proporcional a la productividad del destilador (Duffie, 2013).

Figura 3.5. Principales mecanismos de transferencia de energía en un destilador solar tipo caseta

Al hacer un balance de energía para el agua líquida y la charola (Duffie, 2013), por unidad de área, se obtiene la relación

$$G\tau_c\alpha = q_e + q_{r,b-g} + q_{c,b-g} + q_k + (mC_p)_b \frac{dT_b}{dt} \quad (3.1)$$

donde G representa la radiación solar, α representa la absortancia del medio, τ_c es la transmitancia conjunta de la cubierta y la película o las gotas de agua en la cara inferior. Además, q representa el flujo de calor por unidad de área, m es la masa del cuerpo, C_p es la capacidad calorífica del material (agua), T_b es la temperatura de la charola y t es el tiempo. Después, los subíndices e , r , c y k significan evaporación, radiación, convección y conducción, respectivamente. Finalmente, los subíndices b y g hacen referencia a la charola (del inglés *basin*) y la cubierta (del inglés *glazing*).

Al realizar posteriormente un balance de energía en la cubierta, al ignorar su capacitancia (y por tanto el aumento de su energía interna) y la energía solar absorbida por ella, se tiene la expresión

$$q_e + q_{r,b-g} + q_{c,b-g} = q_{c,g-a} + q_{r,g-a} \quad (3.2)$$

En la literatura pueden hallarse diferentes expresiones para estimar los términos de estas ecuaciones. Por ejemplo, el flujo de calor por radiación entre la charola y la cubierta (Duffie, 2013) puede calcularse con la expresión

$$q_{r,b-g} = 0.9\sigma(T_b^4 - T_g^4) \quad (3.3)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann. Para estimar la transferencia de energía por convección de la charola hacia la cubierta, se sugiere modificar el número de Rayleigh (Ra) para considerar los efectos de la flotabilidad debido al hecho de que la transferencia de calor y de masa ocurre simultáneamente (Duffie, 2013). Por tanto, el término de flotabilidad en el número de Grashof (Gr) se modifica por el gradiente de densidad causado por el gradiente de composición. Para una banda horizontal de aire encerrado, la relación entre el número de Nusselt (Nu) y el de Rayleigh es

$$Nu = 0.075(Ra)^{\frac{1}{3}} \quad (3.4)$$

En este caso, la diferencia de temperatura para el número de Rayleigh, $\Delta T'$, es una diferencia equivalente de temperatura que toma en cuenta las diferencias de densidad debidas a las diferencias de concentración de vapor de agua. Para el aire y el agua,

$$\Delta T' = (T_b - T_g) + \left(\frac{p_{wb} - p_{wg}}{2016 - p_{wb}} \right) T_b \quad (3.5)$$

donde p_{wb} y p_{wg} son las presiones de vapor para el agua (en unidades mmHg) en la charola a la temperatura T_b y del agua a la temperatura de la cubierta T_g , respectivamente.

De las dos ecuaciones anteriores es posible calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección (h'_c) del destilador, dado por

$$h'_c = 0.884 \left[(T_b - T_g) + \left(\frac{p_{wb} - p_{wg}}{2016 - p_{wb}} \right) T_b \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3.6)$$

De esta forma, la transferencia de calor por convección entre la charola y la cubierta es

$$q_{c,b-g} = h'_c(T_b - T_g) \quad (3.7)$$

Por una analogía entre las transferencias de calor y de masa, la razón de transferencia de masa (m_D) puede expresarse como

$$m_D = 9.15 \times 10^{-7} h'_c(p_{wb} - p_{wg}) \quad (3.8)$$

y la transferencia por evaporación-condensación (q_e) se escribe como

$$q_e = 9.15 \times 10^{-7} h'_c(p_{wb} - p_{wg}) h_{fg} \quad (3.9)$$

donde h_{fg} es el calor latente de vaporización del agua.

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN NUMÉRICA

4.1 Simulación numérica

4.1.1 Método de elementos finitos

El método de elementos finitos es un procedimiento numérico que puede aplicarse para obtener soluciones en una amplia variedad de problemas de ingeniería (Moaveni, 1999). Los problemas lineales o no lineales, en estado estacionario o transitorio de análisis de esfuerzos, transferencia de calor, flujo de fluido y electromagnetismo pueden analizarse con métodos de elementos finitos. El origen del método moderno de elementos finitos puede rastrearse a los inicios de la década de 1900, cuando algunos investigadores aproximaron y modelaron medios continuos elásticos usando barras elásticas discretas equivalentes. Sin embargo, Courant ha sido reconocido como la primera persona en desarrollar el método del elemento finito. En un artículo publicado en la década de 1940, Courant utilizó una interpolación polinomial por partes aplicada en subregiones triangulares para estudiar problemas de torsión.

4.1.2 Fundamentos

El método de elementos finitos es una técnica numérica para resolver problemas que están descritos por ecuaciones diferenciales parciales, o que pueden formularse como la minimización de funciones (Nikishkov, 2004). Un dominio de interés se representa como un ensamble de elementos finitos. Las funciones aproximadas en elementos finitos se determinan en términos de valores nodales del campo físico de interés. Un problema físico continuo se transforma en un problema de elementos finitos discretizados con valores nodales desconocidos. Para un problema lineal debe resolverse un sistema de ecuaciones lineales algebraicas. Los valores dentro de los elementos finitos pueden obtenerse usando los valores en los nodos.

Dos características de este método deben mencionarse (Nikishkov, 2004):

1. La aproximación por partes de campos físicos para los elementos finitos proporciona una buena precisión incluso en funciones con aproximación simple.
2. Las aproximaciones locales llevan a sistemas con pocas ecuaciones para un problema discretizado. Esto ayuda a resolver problemas con un número muy grande de incógnitas nodales.

4.1.3 Descripción del método del elemento finito

El método del elemento finito puede describirse con una lista de pasos (Nikishkov, 2004):

1. **Discretizar el medio continuo.** El primer paso es dividir la región de solución en elementos finitos. Típicamente, la malla de elementos finitos se genera en un programa de preprocesamiento. La descripción de la malla consiste en varias matrices, donde las principales son las matrices de coordenadas nodales y de conectividades de elementos.
2. **Seleccionar las funciones de interpolación.** Estas funciones se usan para interpolar las variables del campo físico a lo largo del elemento. Comúnmente, se eligen polinomios como funciones de interpolación. El grado del polinomio depende del número de nodos asignados a cada elemento.
3. **Hallar las propiedades del elemento.** La ecuación matricial para el elemento finito debe establecerse de manera que relacione los valores de la incógnita en los nodos con otros parámetros. Para esta tarea pueden utilizarse diferentes enfoques; los más convenientes son el método de Galerkin y la aproximación variacional.
4. **Ensamblar las ecuaciones de los elementos.** Para hallar el sistema global de ecuaciones para toda la región de solución se deben ensamblar las ecuaciones de los elementos. Es decir que deben combinarse las ecuaciones locales para todos los elementos usados en la discretización. Las conectividades de los elementos se usan en el proceso de ensamble. Antes de resolver el sistema, deben aplicarse las condiciones de frontera, dado que no se incluyen en las ecuaciones de los elementos.
5. **Resolver el sistema global de ecuaciones.** Típicamente, el sistema global de ecuaciones es pequeño, simétrico y definido. Para resolverse pueden utilizarse métodos directos e iterativos. El resultado de la solución son los valores nodales de la función de interés.
6. **Calcular resultados adicionales.** En muchos casos se necesita calcular parámetros adicionales.

4.1.4 Nodos

Un nodo es un punto en el espacio, definido por sus coordenadas, en el que se definen los grados de libertad. En el método del elemento finito, un grado de libertad puede definirse de distintas maneras, pero depende del tipo de análisis que se lleva a cabo. Por ejemplo, en un análisis

estructural los grados de libertad son los desplazamientos, mientras que en un análisis térmico el grado de libertad es la temperatura (Dean y Nicolescu, s.f.).

4.1.5 Discretización de elementos

Los modelos de elemento finito aplicados a problemas prácticos pueden contener decenas o cientos de miles de grados de libertad. No es posible crear manualmente mallas con estas características. Un generador de malla (que genera los elementos discretizados) es una herramienta computacional que divide el dominio de solución en muchos subdominios, es decir en elementos finitos. Existen muchos tipos de generadores de malla. Para problemas dimensionales existen, por ejemplo, los generadores de malla de bloques y de malla triangular (Nikishkov, 2004).

En los softwares de uso comerciales existe una amplia variedad de elementos que pueden usarse, con geometría distinta, dependiendo de las características del problema a estudiar. En la Figura 4.1 se muestran algunos de los elementos más comunes.

Figura 4.1. Tipos de elementos comunes en el método del elemento finito (Dean y Nicolescu, s.f.)

Es importante resaltar que la exactitud de una solución obtenida por CFD está influenciada fuertemente por el tipo y número de elementos que conforman la malla. Mientras que, en general, aumentar el número de elementos mejora la exactitud de la solución, ésta también se ve afectada por muchos otros factores, como el tipo de malla, el orden de exactitud del método numérico y qué tan apropiadas son las técnicas elegidas para representar los fenómenos físicos del problema (Tu

et al., 2012). Además, es necesario considerar las restricciones de capacidad de cálculo del equipo computacional utilizado, y el periodo de tiempo disponible para resolver el problema en cuestión.

Una vez que se han determinado las características de los nodos y los elementos en el problema, el software generará una malla. Un ejemplo de malla para un problema de simulación por el método de elemento finito puede visualizarse en la Figura 4.2.

Figura 4.2. Ejemplo de malla generada por el método de elementos finitos (Dean y Nicolescu, s.f.)

4.1.6 Pasos esenciales para un Análisis de Elemento Finito (FEA)

El proceso de análisis de elemento finito (FEA, del inglés “Finite Element Analysis”) consta de tres fases: preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento (Moaveni, 1999). A continuación, se enlistan las actividades o pasos que comprende cada una de las fases:

Fase de preprocesamiento

1. Crear y discretizar el dominio de solución en elementos finitos, es decir subdividir el problema en nodos y elementos.
2. Asumir una función de forma para representar el comportamiento físico de un elemento, es decir que se asume una función continua aproximada para representar la solución de un elemento.
3. Desarrollar ecuaciones para un elemento.
4. Ensamblar los elementos para presentar el problema completo. Construir la matriz global de rigidez.
5. Aplicar condiciones de frontera, iniciales y sistemas de cargas.

Fase de procesamiento

6. Resolver simultáneamente un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales o no lineales para obtener resultados en los nodos, tales como valores de desplazamiento en diferentes nodos, o valores de temperatura en diferentes nodos en un problema de transferencia de calor.

Fase de postprocesamiento

7. Obtener otra información relevante. En este punto, pueden ser de interés los valores de esfuerzos principales, flujo de calor, etc.

4.2 Formulación en diferencias finitas de ecuaciones diferenciales

Los métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales se basan en el reemplazo de las ecuaciones diferenciales por ecuaciones algebraicas (Cengel, 2011). En el caso del método de las diferencias finitas, las derivadas se reemplazan por diferencias.

Para ejemplificar este método, se puede considerar el problema de conducción de calor unidimensional en estado estacionario en una pared plana de espesor L , con generación de calor. Se debe suponer que la pared se divide en un número M de secciones, con igual espesor, dado por $\Delta x = L/M$, en la dirección x , separadas por planos que pasan por los $M+1$ puntos $0, 1, 2, \dots, m-1, m, m+1, \dots, M$, llamados **nodos**. La coordenada x de cualquier punto m es simplemente $x_m = m \Delta x$ y la temperatura en ese punto es simplemente $T(x_m) = T_m$.

La ecuación de conducción de calor comprende las segundas derivadas de la temperatura con respecto a las variables espaciales, tales como d^2T/dx^2 , y la formulación en diferencias finitas se basa en reemplazar las segundas derivadas por diferencias apropiadas. Pero es necesario comenzar el proceso a partir de las primeras derivadas. Mediante de la ecuación en diferencias finitas de la derivada de una función $\left(\frac{df(x)}{dx} \cong \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x}\right)$, la primera derivada de la temperatura respecto de la posición para los puntos medios $m-1/2$ y $m+1/2$ de las secciones que están a ambos lados del nodo m se puede expresar como

$$\begin{cases} \left. \frac{dT}{dx} \right|_{m-\frac{1}{2}} \cong \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x} \\ \left. \frac{dT}{dx} \right|_{m+\frac{1}{2}} \cong \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} \end{cases} \quad (4.1)$$

Dado que la segunda derivada es la derivada de la primera derivada, la segunda derivada para el nodo m está dada por

$$\left. \frac{d^2T}{dx^2} \right|_m \cong \frac{\left. \frac{dT}{dx} \right|_{m+\frac{1}{2}} - \left. \frac{dT}{dx} \right|_{m-\frac{1}{2}}}{\Delta x} = \frac{\frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} - \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1}}{\Delta x^2} \quad (4.2)$$

Esta expresión es la representación en diferencias finitas de la segunda derivada en un nodo interno general m . Por tanto, la ecuación diferencial

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{\dot{e}}{k} = 0 \quad (4.3)$$

que rige la transferencia de calor unidimensional en estado estacionario en una pared plana, con conducción de calor y conductividad térmica constante, se puede expresar en diferencias finitas como

$$\frac{T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1}}{\Delta x^2} + \frac{\dot{e}_m}{k} = 0 \quad (4.4)$$

donde $\dot{e}_m$ es la razón de generación de calor por unidad de volumen en el nodo m . Además, se debe cumplir que $m=1, 2, 3, \dots, M-1$.

4.3 Conducción unidimensional de calor en estado estacionario

Otra forma de resolver mediante métodos numéricos el problema de la conducción unidimensional de calor en estado estacionario es el método del balance de energía. Este método se basa en subdividir el medio en un número suficiente de elementos de volumen, y a continuación, aplicar un balance de energía en cada elemento (Cengel, 2011). Esto se realiza al seleccionar al principio los puntos nodales en los cuales se van a determinar las temperaturas, y a continuación, para formar

elementos sobre los nodos y trazar rectas que pasen por los puntos medios de los nodos. De esta manera, los nodos interiores se mantienen a la mitad de los elementos, y las propiedades en el nodo, como la temperatura y la velocidad de generación de calor, representan las propiedades promedio del elemento.

Para ejemplificar el método, se puede considerar el problema descrito en la sección 4.2. Ahora, los elementos se forman al trazar rectas verticales que pasen por los puntos medios entre los nodos. Para obtener una ecuación en diferencias general para todos los nodos interiores, se considera el elemento representado por el nodo m y los dos nodos vecinos $m-1$ y $m+1$. Al suponer que la conducción de calor se lleva a cabo hacia los elementos sobre todas las superficies, el balance de energía en el elemento se puede expresar como

$$\dot{Q}_{cond,izq} + \dot{Q}_{cond,der} + \dot{E}_{gen,elem} = \frac{\Delta E_{elem}}{\Delta t} \quad (4.5)$$

donde $\dot{Q}_{cond,izq}$ es la razón de conducción de calor en la superficie izquierda, $\dot{Q}_{cond,der}$ es la razón de conducción de calor en la superficie derecha, $\dot{E}_{gen,elem}$ es la razón de generación de calor dentro del elemento y $\frac{\Delta E_{elem}}{\Delta t}$ es la razón de cambio del contenido de energía del elemento. Como se asume una situación en estado estacionario, $\Delta E_{elem} = 0$. Por otro lado, la razón de generación de calor en el elemento está dada por

$$\dot{E}_{gen,elem} = \dot{e}_m V_{elem} = \dot{e}_m A \Delta x \quad (4.6)$$

donde $\dot{e}_m$ es la razón de generación de calor por unidad de volumen, evaluada en el nodo m y considerada como constante en todo el elemento, y A es el área de transferencia de calor.

Otra suposición que se hace es que la temperatura varía linealmente en el elemento. Por tanto, la razón estacionaria de conducción de calor a través de una pared plana de espesor L se puede determinar por

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{\Delta T}{L} \quad (4.7)$$

Donde ΔT es el cambio de temperatura a través de la pared y la dirección de transferencia de calor va del lado con mayor temperatura hacia el de menor. Ya que se supone que la dirección de la transferencia de calor en ambas superficies del elemento es hacia el nodo m , la razón de la conducción de calor en las superficies izquierda y derecha se puede expresar como

$$\begin{cases} \dot{Q}_{cond,izq} = kA \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} \\ \dot{Q}_{cond,der} = kA \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} \end{cases} \quad (4.8)$$

Al sustituir las ecuaciones de generación de transferencia de calor y de generación de energía del elemento en la ecuación del balance de energía, se obtiene la expresión

$$kA \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + kA \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} + \dot{e}_m A \Delta x = 0 \quad (4.9)$$

Después de realizar manipulaciones algebraicas, la expresión anterior se reduce a

$$\frac{T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1}}{\Delta x^2} + \frac{\dot{e}_m}{k} = 0 \quad (4.10)$$

con $m=1, 2, 3, \dots, M-1$.

4.4 Conducción bidimensional de calor en estado estacionario

En ocasiones la variación de temperatura en un problema depende de más de una dimensión espacial, y no pueden despreciarse sus efectos. Por ejemplo, en un problema bidimensional.

Para ilustrar la situación, puede considerarse una región rectangular, donde la conducción de calor es significativa en las direcciones x y y . Posteriormente se divide el plano x - y de esa región en una malla rectangular de nodos con espacios Δx y Δy en las direcciones x y y , respectivamente, con una profundidad unitaria $\Delta z=1$ en la dirección z , por lo que los efectos en esta dirección pueden despreciarse. El propósito de esta situación es determinar las temperaturas en los nodos. Una notación para numerar los nodos es la que se denomina “notación de subíndice doble (m, n) ”, donde $m=0, 1, 2, \dots, M$ es el conteo de los nodos en la dirección x , y $n=1, 2, \dots, N$ es el conteo de los

mismos en la dirección y . Las coordenadas del nodo (m, n) son simplemente $x=m\Delta x$ y $y=n \Delta y$, y la temperatura en el nodo (m, n) se denota por $T_{m, n}$.

Después se considera un elemento de volumen de dimensiones $\Delta x \times \Delta y \times 1$, cuyo centro es un nodo interior general (m, n) , en una región en la que el calor se genera a una razón $\dot{e}$ y con conductividad térmica k constante. De manera similar que en el caso de conducción unidimensional de calor (sección 4.3), se debe suponer que la dirección de la conducción de calor es hacia el nodo que se está considerando, en todas las superficies el balance de energía sobre el elemento de volumen está dado por

$$\dot{Q}_{cond,izq} + \dot{Q}_{cond,der} + \dot{Q}_{cond,sup} + \dot{Q}_{cond,inf} + \dot{E}_{gen,elem} = \frac{\Delta E_{elem}}{\Delta t} \quad (4.11)$$

que, para el caso estacionario, $\Delta E_{elem} = 0$, y donde, además, $\dot{Q}_{cond,sup}$ y $\dot{Q}_{cond,inf}$ son las razones de conducción de calor en las superficies superior e inferior, respectivamente. De nueva cuenta, si se supone que la temperatura entre cualquier par de nodos adyacentes varía linealmente, y se nota que el área de transferencia de calor es $A_x = \Delta y \times 1 = \Delta y$ en la dirección x , y $A_y = \Delta x \times 1 = \Delta x$ en la dirección y , la relación para el balance de energía toma la siguiente forma:

$$k\Delta y \frac{T_{m-1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} + k\Delta x \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y} + k\Delta y \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} + k\Delta x \frac{T_{m,n-1} - T_{m,n}}{\Delta y} + \dot{e}_{m,n}\Delta x\Delta y = 0 \quad (4.12)$$

Después de dividir cada término entre $\Delta x\Delta y$ y k y simplificar, la expresión es

$$\frac{T_{m-1,n} - 2T_{m,n} + T_{m+1,n}}{\Delta x^2} + \frac{T_{m,n-1} - 2T_{m,n} + T_{m,n+1}}{\Delta y^2} + \frac{\dot{e}_{m,n}}{k} = 0 \quad (4.13)$$

para $m=1, 2, 3, \dots, M-1$ y $n=1, 2, 3, \dots, N-1$.

4.5 Introducción al software ANSYS

ANSYS es un programa computacional de elemento finito de propósito general, que contiene más de 100,000 líneas de código (Moaveni, 1999). Este programa puede llevar a cabo análisis de

transferencia de calor, flujo de fluidos, y de estructuras mecánicas, tanto bajo cargas estáticas como dinámicas. Uno de los programas disponibles en ANSYS es FLUENT.

ANSYS FLUENT

FLUENT es un programa computacional moderno para modelar el flujo de fluido y la transferencia de calor en geometrías complejas (FLUENT Inc, 2003). Este software soporta mallas de tipo 2D (triangular y cuadrilateral), 3D (tetraédrica, hexaédrica, piramidal y tipo cuña) y mixta (híbrida). FLUENT también permite aumentar o disminuir el refinamiento de la malla dependiendo de la solución del flujo. Además, FLUENT está escrito en el lenguaje de programación C, por lo que permite asignar memoria de forma dinámica, crear estructuras eficientes de datos y controlar el solucionador de manera flexible.

4.5.1 Modelo multifase

En muchas situaciones de la naturaleza y creadas por el hombre se presentan flujos con más de una fase. En el flujo multifase, una fase puede definirse como una clase identificable de material que tiene una respuesta inercial particular y que interactúa con el flujo y el campo de potencial en que está inmerso (FLUENT Inc, 2003).

Dependiendo del par de fases (sólido, líquido o gas) que interactúen entre sí, es posible clasificar el régimen de flujo. Por ejemplo, en flujos gas-líquido o líquido-líquido pueden existir flujos de burbujas, de gotas o de fluidos estratificados.

Un modelo multifase para situaciones donde se presentan fluidos estratificados es el modelo de volumen de fluido (VOF, del inglés “Volume of Fluid”). Está diseñado para dos o más fluidos inmiscibles donde la posición de la interfase entre los fluidos es un objeto de interés. En este modelo todos los fluidos comparten un único conjunto de ecuaciones de momentum, y la fracción de volumen de cada fluido en un elemento se rastrea a través del dominio.

La formulación del modelo VOF reside en el hecho de que dos o más fluidos (o fases) no están interpenetradas. Para cada fase que se agrega al modelo, se crea una variable: la fracción de volumen de la fase en la celda computacional. En cada volumen de control (elemento), la suma de las fracciones de volumen de todas las fases debe ser igual a 1. Todas las fases comparten los campos para todas las variables y propiedades, y representan valores medios ponderados respecto

del volumen, siempre y cuando se conozca la fracción de volumen de cada fase en todas las locaciones. Por tanto, las variables y propiedades en una celda particular son puramente representativas de una de las fases, o son representativas de la mezcla de las fases, dependiendo de los valores de las fracciones de volumen.

El rastreo de la(s) interfase(s) entre cada par de fases se logra al resolver una ecuación de continuidad para la fracción de volumen de una o más de las fases. Por ejemplo, para la q -ésima fase, dicha ecuación tiene la forma

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} \quad (4.14)$$

donde t es el tiempo, α_q es la fracción volumétrica de la fase q , $\vec{v}$ es la velocidad del fluido, ρ_q es la densidad de la fase, S_{α_q} es un término de masa, y $\nabla \alpha_q$ es el gradiente de la fracción de volumen de la fase.

Sin embargo, debe notarse que la ecuación de fracción de volumen no se resolverá para la fase primaria. En cambio, la fracción de volumen de la fase primaria se calculará a partir de la siguiente restricción:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (4.15)$$

Ahora bien, las propiedades que aparecen en las ecuaciones de transporte se determinan por la presencia de las fases constituyentes en cada volumen de control (elemento). En general, para un sistema con una cantidad q de fases, la densidad, por ejemplo, promedio en función de la fracción de volumen tiene la forma

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (4.16)$$

Todas las demás propiedades se calculan de esta manera.

Como se mencionó más arriba, en el modelo VOF se resuelve sólo una ecuación de momentum en todo el dominio, y el campo de velocidades resultante se comparte entre las fases. La ecuación de momentum depende de las fracciones volumétricas de todas las fases, mediante las propiedades de densidad ρ y de viscosidad μ . La expresión es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.17)$$

donde t es el tiempo, $\vec{v}$ es la velocidad del fluido, ∇p es el gradiente de presión en el fluido, $\nabla \vec{v}$ es el gradiente de velocidad, $\vec{g}$ es el vector de aceleración gravitacional y $\vec{F}$ es el vector de las fuerzas externas aplicadas en el fluido.

De manera similar, la ecuación de energía también se comparte entre las fases. La ecuación es

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot [k_{eff} \nabla T] + S_h \quad (4.18)$$

donde ρ es la densidad del fluido, E es la energía, $\vec{v}$ es la velocidad del fluido, p es su presión, k_{eff} es la conductividad térmica efectiva, ∇T es el gradiente de temperatura en el fluido, y S_h es un término que contiene contribuciones de radiación y fuentes volumétricas de energía.

En el modelo VOF la energía y la temperatura se tratan como variables promediadas respecto de la masa. Por ejemplo, para la energía, se cumple la expresión

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \quad (4.19)$$

4.5.2 Modelo de turbulencia

Los flujos turbulentos se caracterizan por la presencia de campos de velocidad fluctuantes (FLUENT Inc, 2003). Estas fluctuaciones mezclan cantidades transportadas, como el momentum y la energía, y provoca que dichas magnitudes también fluctúen. Dado que estas variaciones pueden ser a escala pequeña con frecuencias altas, necesitan muchos recursos computacionales para simularse directamente. En FLUENT las ecuaciones se modifican para promediarse respecto del tiempo o del ensamble, para remover las perturbaciones de pequeña escala, y volverlas

computacionalmente menos costosas. Sin embargo, las ecuaciones modificadas contienen incógnitas adicionales, y se requieren modelos de turbulencia para determinar estas variables en términos de cantidades conocidas.

En FLUENT existen varios modelos de turbulencia, como el modelo Spalart-Allmaras, el de $k-\varepsilon$, el de $k-\omega$, el de v^2-f , el modelo de tensión de Reynolds (RSM, del inglés “Reynolds Stress Model”) y el de simulación de remolinos grandes (LES, del inglés “Large Eddy Simulation”). En el presente proyecto se utilizará el modelo $k-\varepsilon$ con renormalización de grupo (RNG, del inglés “Renormalization Group”), que se explicará a continuación.

El modelo RNG $k-\varepsilon$ cuenta con dos ecuaciones, donde la solución tiene a su vez dos ecuaciones de transporte separadas, que permite que la velocidad turbulenta y las escalas de longitud puedan determinarse independientemente (FLUENT Inc, 2003). Es un modelo basado en las ecuaciones de transporte (ecuaciones de Navier-Stokes) del modelo para la energía cinética de turbulencia k y su razón de disipación ε . La ecuación del modelo para k se deriva de la ecuación exacta, mientras que la ecuación del modelo de ε se obtuvo usando un razonamiento físico. Las principales suposiciones en este modelo son que el flujo es completamente turbulento y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables.

En este modelo se usó una técnica estadística rigurosa, llamada “teoría de grupos con renormalización”, para mejorarlo. El modelo cuenta con un término adicional en la ecuación de ε que mejora significativamente la exactitud para flujos con una alta rapidez de deformación. Además, se incluye el efecto de la presencia de remolinos en la turbulencia, lo que mejora la exactitud para flujos con estas condiciones. Finalmente, la teoría RNG proporciona una fórmula analítica para los números de Prandtl turbulentos, y una ecuación diferencial analítica para la viscosidad efectiva que representa los efectos de un flujo con número de Reynolds pequeño.

Las expresiones del modelo RNG $k-\varepsilon$ (FLUENT Inc, 2003) son

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (4.20)$$

y

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (4.21)$$

En estas expresiones, t representa el tiempo, x es la coordenada de posición, u es la velocidad del fluido, i y j son los subíndices para numerar los elementos generados en el mallado de la geometría, ρ es la densidad del fluido, μ_{eff} es la viscosidad efectiva, G_k es la generación de energía cinética de turbulencia debida a los gradientes promedio de velocidad, G_b es la generación de energía cinética de turbulencia debida a la flotabilidad, Y_M es la contribución de la dilatación fluctuante bajo turbulencia compresible a la razón global de disipación. Las variables α_k y α_ε son los inversos efectivos de los números de Prandtl para k y ε , respectivamente. S_k y S_ε son términos definidos por el usuario, y R_ε es el término que toma en cuenta los efectos para flujos rápidamente deformables. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ y $C_{3\varepsilon}$ son constantes derivadas de la teoría RNG.

4.5.3 Modelo de radiación

FLUENT proporciona varios modelos de radiación, que permiten incluir este fenómeno, con o sin un medio participante, en las simulaciones de transferencia de calor. Los modelos son:

- Modelo de radiación de transferencia discreta (DTRM, por sus siglas en inglés)
- Modelo P-1
- Modelo de Rosseland
- Modelo Superficie-a-Superficie (abreviado como S2S)
- Modelo de ordenadas discretas (DO, por sus siglas en inglés)

En este proyecto se decidió utilizar el modelo de radiación de ordenadas discretas, que se describirá en el siguiente apartado.

En la mayoría de estos modelos se utiliza la ecuación de transferencia radiativa para un medio con propiedades de absorción, emisión y dispersión con posición $\vec{r}$ en la dirección $\vec{s}$ (FLUENT Inc, 2003). La ecuación tiene la forma

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (4.22)$$

donde $\vec{r}$ es el vector de posición, $\vec{s}$ es el vector de dirección, $\vec{s}'$ es el vector de la dirección de dispersión, s es la longitud de la trayectoria, a es el coeficiente de absorción, n es el índice de refracción, σ_s es el coeficiente de dispersión, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, I es la intensidad de radiación (que depende de la posición y la dirección), T es la temperatura local, Φ es la función de fase y Ω' es el ángulo sólido. La suma $a + \sigma_s$ representa el espesor óptico o la opacidad del medio.

Modelo de Ordenadas Discretas (DO)

Este modelo resuelve la ecuación de transferencia radiativa para un número finito de ángulos sólidos discretos (FLUENT Inc, 2003), donde cada ángulo está asociado a un vector de dirección $\vec{s}$ fijado en el sistema global de coordenadas cartesianas (x, y, z) . El refinamiento de la discretización angular es determinado por el usuario.

La principal característica de este modelo es que considera la ecuación de transferencia radiativa en la dirección $\vec{s}$ como una ecuación de campo escalar. Por tanto, tiene la forma

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (4.23)$$

donde $\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s})$ es la divergencia del campo vectorial de intensidad radiación en la dirección $\vec{s}$. Además, el modelo DO resuelve una ecuación de radiación para cada dirección $\vec{s}$.

CAPÍTULO 5. DESARROLLO DEL PROYECTO

5.1 Datos experimentales

Se realizaron 5 pruebas experimentales en el destilador solar mostrado en la Figura 1.2, con un ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio $\gamma = 40^\circ$. Se emplearon 4 L de agua líquida, y este volumen se mantuvo constante para todas las pruebas. Todas las pruebas se realizaron en la Ciudad de México, considerando sus coordenadas geográficas de latitud y longitud.

Durante la experimentación se obtuvieron las temperaturas características del destilador solar, empleando termopares tipo K, los cuales se colocaron principalmente en la superficie exterior de la cubierta de vidrio, el líquido, la superficie superior de la charola y el medio ambiente. Además, se midió la radiación solar incidente en el dispositivo mediante un piranómetro Eppley modelo 8-48. El registro de los datos se hizo mediante módulos ADAMs y el software LabVIEW, cada 15 minutos en un intervalo de tiempo de las 10:00 hrs hasta las 18:00 hrs.

En la Tabla 5.1 se muestran los datos obtenidos a partir de la experimentación, donde T_∞ es la temperatura promedio del medio ambiente, $T_{cubierta}$ de vidrio es la temperatura promedio en la superficie interior de la cubierta de vidrio, $T_{charola}$ es la temperatura promedio en la superficie superior de la charola y T_{agua} es la temperatura promedio del volumen de agua líquida en la charola, todas medidas en grados Celsius. Además, I_{solar} es el valor promedio de la radiación solar incidente, medida en W/m^2 .

Tabla 5.1. Datos iniciales de temperatura y radiación solar en función del tiempo

HORA	I_{solar} [W/m²]	T_∞ [°C]	T_{cubierta de vidrio} [°C]	T_{charola} [°C]	T_{agua} [°C]
10:00	558.2	25.3	26.7	28.0	26.8
10:15	645.4	25.3	30.4	35.4	34.4
10:30	710.3	25.9	31.8	39.8	37.5
10:45	761.9	26.8	34.8	43.9	41.3
11:00	803.5	27.9	37.3	46.9	43.1
11:15	845.0	28.5	40.9	51.2	45.4
11:30	881.6	28.7	42.8	54.1	48.1
11:45	919.9	30.0	45.5	56.6	50.1
12:00	956.5	31.3	45.3	58.6	52.8
12:15	986.4	31.0	47.6	58.8	55.3
12:30	1008.1	32.5	51.4	59.6	56.0
12:45	1024.7	33.1	51.8	60.1	57.6
13:00	1044.7	33.3	52.1	61.1	58.7
13:15	1046.3	33.4	52.9	61.1	58.3
13:30	1044.7	34.0	53.6	62.2	60.9
13:45	1061.3	35.0	53.9	62.9	60.7
14:00	1046.3	35.8	53.9	63.1	61.4
14:15	1049.6	35.6	54.5	63.4	60.2
14:30	1048.0	35.7	54.1	63.1	61.8
14:45	1024.7	34.8	54.0	63.5	60.2
15:00	1013.1	34.1	54.9	63.4	60.7
15:15	969.8	33.9	54.9	63.4	60.8
15:30	951.5	32.4	53.9	62.6	60.3
15:45	923.2	32.2	53.0	61.6	60.1
16:00	896.6	31.6	52.7	61.4	59.3
16:15	861.7	31.1	51.3	60.7	58.8
16:30	813.4	29.3	50.9	59.8	57.9
16:45	755.2	28.5	50.0	59.0	57.7
17:00	721.9	27.6	49.1	57.8	56.9
17:15	655.4	27.0	45.8	56.3	54.7
17:30	600.5	26.1	44.4	54.9	52.6
17:45	542.3	25.4	43.5	54.0	52.3
18:00	480.5	25.1	41.0	53.1	52.3

5.2 Modelado del destilador solar en ANSYS

En primer lugar, se asumió que el volumen de fluido dentro de las paredes del destilador (cubierta de vidrio y charola) tendría una sección transversal de trapecio rectangular. En esta geometría se

definieron dos dimensiones con valor constante, de 516 mm y 60 mm, tomadas del destilador físico del proyecto *Diseño, Construcción y Evaluación Experimental y Exergética de un Destilador Solar* (Chávez, 2015).

Además, a la dimensión de interés (el ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio) se le designó con el símbolo γ , con unidades de grados. Cabe recalcar que esta dimensión puede tomar los valores de 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° y 40° . La magnitud de las dos dimensiones restantes del trapecio, designadas con a y b , dependerían del valor de γ , y podrían obtenerse por medio de relaciones trigonométricas simples. El diagrama general se muestra en la Figura 5.1.

Figura 5.1. Dimensiones de la sección transversal del destilador solar

Después de definir las características de la sección transversal del volumen, se decidió que éste tendría una profundidad de 836 mm, de acuerdo también con las dimensiones del destilador físico. De esta forma, se tendría un volumen prismático con base trapezoidal rectangular. Finalmente, en un software de CAD se generó un cuerpo volumétrico para cada sección transversal con diferente valor de γ . Todos los archivos de creados se exportaron a ANSYS.

5.3 Discretización de elementos en el destilador solar

Una vez en el software Workbench de ANSYS, se abrió el software encargado de generar la malla de los modelos a simular. Se dejaron los valores y características predeterminadas en el programa,

de manera que, por ejemplo, el tipo de orden de los elementos es lineal. Sólo se modificaron dos parámetros:

1. El valor del tamaño de elemento es de 2 cm.
2. La calidad de la malla tiene una suavidad alta.

Como información adicional, en la Tabla 5.2 se muestra el número de nodos y de elementos que tiene cada destilador.

Tabla 5.2. Número de nodos y elementos para cada destilador

Ángulo de la cubierta, γ [°]	Nodos	Elementos
5	5805	4368
10	6966	5460
15	8428	6804
20	9632	7938
25	12470	10584
30	13717	11760
35	16770	14616
40	19995	17640

De la Figura 5.2 a la Figura 5.9 se muestran las geometrías y mallados para cada destilador generado.

Figura 5.2. Geometría y malla del destilador con $\gamma=5^\circ$

Figura 5.3. Geometría y malla del destilador con $\gamma=10^\circ$

Figura 5.4. Geometría y malla del destilador con $\gamma=15^\circ$

Figura 5.5. Geometría y malla del destilador con $\gamma=20^\circ$

Figura 5.6. Geometría y malla del destilador con $\gamma=25^\circ$

Figura 5.7. Geometría y malla del destilador con $\gamma=30^\circ$

Figura 5.8. Geometría y malla del destilador con $\gamma=35^\circ$

Figura 5.9. Geometría y malla del destilador con $\gamma=40^\circ$

5.4 Aplicación de las condiciones de frontera

El primer paso consistió en crear 5 superficies para representar la cubierta de vidrio, y una superficie en la parte inferior para representar la charola de aluminio. Considerando que las paredes de la cubierta de vidrio tienen un espesor de 3 mm, y la charola de aluminio, de 2 mm.

Al comenzar a preparar simulación, se decidió realizarla con el enfoque de estado estacionario, como lo han hecho algunos investigadores en otros trabajos (Panchal y Shah, 2011). Una de las principales razones para realizar esto, es que, en caso de utilizar un modelo transitorio debería hacerse una simulación de 8 horas. Este enfoque presentaría algunas dificultades, como el costo computacional de los cálculos, encontrar los ajustes óptimos de los *time-steps* en el software, etc. Lo anterior podría afectar la precisión y exactitud de los resultados. Por otro lado, en el caso del estado estacionario, se considera que después de cada hora de operación, el destilador solar alcanza condiciones estacionarias, por lo que se asume que las temperaturas y la radiación solar son constantes en un periodo corto de tiempo.

Posteriormente, se agregaron los modelos descritos en la sección 4.5, de manera que la simulación numérica sea más exacta en el desempeño real del destilador. Por tanto, en primer lugar se crearon 3 fases en el volumen de fluido: aire, agua líquida y vapor de agua. Se consideró que el vapor era un gas ideal incompresible, y la densidad del agua líquida disminuía en función de la temperatura, aplicando una función lineal definida por partes.

Después se activaron los modelos de *VOF* para simular la presencia de fases en el modelo, y se activó el modelo de ecuación de energía. A continuación, se activó el modelo de turbulencia *k-ε* tipo RNG, y se mantuvieron los valores predeterminados propuestos por el programa. También se activó el modelo de transferencia de masa, para simular el cambio de fase evaporación-condensación en el agua y se consideró la temperatura de saturación predeterminada por el software ($T_{sat}=373.15$ K).

Posteriormente, se activó un modelo de tensión superficial y adhesión a las paredes para los fluidos; esto se hizo con el propósito de simular la formación de gotas o de una película de líquido en la superficie interna de las paredes de vidrio en el momento de la condensación del vapor de agua.

Otro modelo de suma importancia para el proyecto es el de radiación solar. Dicho fenómeno se aplicó en las superficies de vidrio con el modelo *DO* de radiación. Para cada uno de los destiladores se realizó una simulación con cada valor de radiación de la Tabla 5.1 Tabla 5.3. Además, se modificó la orientación predeterminada del destilador, de manera que el norte tuviera las coordenadas (1,0,0) y el este las coordenadas (0,0,1). También se asignaron las coordenadas de latitud, longitud y la zona horaria correspondiente a la Ciudad de México (19.4978° N, 99.1269°

O). Se consideraron condiciones climáticas promedio para el día 21 de junio, es decir para el solsticio de verano.

Es necesario resaltar que las temperaturas de la Tabla 5.1 se convirtieron a unidades de Kelvin, dado que estas son las unidades aceptadas por el software. Posteriormente, estos valores se agregaron como condiciones de temperatura en las superficies de vidrio y en la charola, asignando los valores respectivos de la Tabla 5.3. De igual forma, se agregó una condición de frontera de radiación, de manera que las paredes de la cubierta de vidrio se consideraran superficies semi-transparentes, y la pared de aluminio se considerara como superficie opaca. Se mantuvieron los valores predeterminados de absorptividad, transmisividad, emisividad, reflectividad y el coeficiente de dispersión propuestos por el programa, cuyos valores dependían del tipo de material.

Tabla 5.3. Condiciones de frontera del destilador

HORA	T_{cubierta de vidrio} [K]	T_{charola} [K]	T_{agua} [K]	I_{solar} [W/m²]
10:00	299.9	301.15	300.0	558.2
11:00	310.4	320.07	316.2	803.5
12:00	318.4	331.77	326.0	956.5
13:00	325.3	334.23	331.8	1044.7
14:00	327.0	336.26	334.5	1046.3
15:00	328.1	336.50	333.8	1013.1
16:00	325.8	334.57	332.4	896.6
17:00	322.2	330.99	330.1	721.9
18:00	314.2	326.20	325.5	480.5

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

En la sección “APÉNDICE A. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS DIVERSOS CASOS DE APLICACIÓN” se muestran las distribuciones de temperatura, densidad y velocidad del volumen de fluido obtenidas después de realizar las simulaciones para cada destilador con cada conjunto de datos.

6.1 Distribución de temperatura

La primera variable de interés es la temperatura media del volumen de fluido en la región inmediatamente adyacente a las paredes de vidrio en el destilador. A esta variable se le designó como $T_{m,vidrio}$. Dicha variable se obtuvo para cada uno de los ocho destiladores en cada una de las nueve simulaciones realizadas. En la Tabla 6.1 se muestran los valores.

Tabla 6.1. Temperatura máxima del volumen de fluido en función del ángulo de la cubierta

Ángulo de la cubierta, γ [°]	Temperatura media del fluido en el vidrio, $T_{m,vidrio}$ [°C]								
	HORA [h]								
	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
5	26.88	38.62	47.06	53.38	55.11	56.06	53.87	50.27	42.70
10	26.85	38.44	46.80	53.18	54.96	55.88	53.68	50.12	42.38
15	26.83	38.20	46.64	53.04	54.81	55.76	53.53	49.93	42.21
20	26.81	38.06	46.36	52.91	54.70	55.62	53.42	49.81	41.99
25	26.80	38.12	46.55	52.86	54.62	55.57	53.37	49.78	42.16
30	26.79	37.85	46.11	52.75	54.51	55.46	53.26	49.66	41.76
35	26.78	37.82	46.05	52.67	54.42	55.39	53.18	49.58	41.70
40	26.78	37.81	46.03	52.66	54.42	55.38	53.18	49.57	41.69

Dichos valores de la temperatura media del fluido en contacto con la cubierta se graficaron para ilustrar su variación en función de γ , para cada hora, de las 10:00 h a las 18:00 h. La Gráfica 6.1 muestra la información mencionada.

Gráfica 6.1. Temperatura media del fluido en el vidrio en función del ángulo de la cubierta

Para mostrar con más detalles el comportamiento de la temperatura del fluido en el vidrio, se graficó sólo un conjunto de datos, de las 13:00 a las 16:00 horas. En la Gráfica 6.2 se muestran estas curvas detalladas.

Gráfica 6.2. Temperatura media del fluido en el vidrio en función del ángulo de la cubierta para las 13 h, 14 h, 15 h y 16 h

Otra variable de interés es la temperatura media del volumen de fluido en la región inmediatamente adyacente a la superficie de la charola de aluminio. A esta variable se le designó como $T_{m, charola}$. Dicha variable se obtuvo para cada uno de los ocho destiladores en cada una de las nueve simulaciones realizadas. En la Tabla 6.2 se muestran los valores.

Tabla 6.2. Temperatura media del fluido en la charola en función del ángulo de la cubierta

Ángulo de la cubierta, γ [°]	Temperatura media del fluido en la charola, $T_{m, \text{charola}}$ [°C]								
	HORA [h]								
	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
5	27.74	44.87	55.86	59.20	61.23	61.56	59.58	55.99	50.47
10	27.75	44.96	55.88	59.29	61.26	61.65	59.67	56.05	50.59
15	27.76	44.96	55.87	59.30	61.28	61.67	59.70	56.10	50.59
20	27.77	45.00	55.89	59.32	61.35	61.69	59.71	56.11	50.64
25	27.79	45.10	55.95	59.47	61.45	61.84	59.85	56.25	50.65
30	27.78	45.07	55.99	59.41	61.38	61.78	59.78	56.20	50.70
35	27.78	45.19	56.20	59.46	61.44	61.82	59.84	56.26	50.87
40	27.76	45.07	56.03	59.34	61.31	61.70	59.71	56.13	50.73

Dichos valores de la temperatura media del fluido en contacto con la charola se graficaron para ilustrar su variación en función de γ , para cada hora, de las 10:00 h a las 18:00 h. La Gráfica 6.3 muestra la información mencionada.

Gráfica 6.3. Temperatura media del fluido en la charola en función del ángulo de la cubierta

Para mostrar con más detalles el comportamiento de la temperatura del fluido en el recipiente, se graficó sólo un conjunto de datos, de las 13:00 a las 16:00 horas. En la Gráfica 6.4 se muestran estas curvas detalladas.

Gráfica 6.4. Temperatura media del fluido en la charola en función del ángulo de la cubierta para las 13 h, 14 h, 15 h y 16 h

6.2 Distribución de densidad del agua líquida

Otra variable de interés es la densidad media del agua líquida en la región inmediatamente adyacente a las paredes de vidrio en el destilador. A esta variable se le designó como $\rho_{l,vidrio}$. Dicha variable se obtuvo para cada uno de los ocho destiladores en cada una de las nueve simulaciones realizadas. En la Tabla 6.3 se muestran los valores.

Tabla 6.3. Densidad máxima del agua líquida en función del ángulo de la cubierta

Ángulo de la cubierta, γ [°]	Densidad media del agua líquida en el vidrio, $\rho_{l, \text{vidrio}}$ [kg/m ³]								
	HORA [h]								
	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
5	995.89	992.35	989.10	986.24	985.37	984.89	985.99	987.78	990.86
10	995.90	992.40	989.21	986.33	985.45	984.99	986.08	987.85	990.99
15	995.91	992.48	989.27	986.41	985.52	985.05	986.16	987.93	991.06
20	995.91	992.53	989.39	986.47	985.57	985.11	986.21	987.98	991.14
25	995.92	992.50	989.30	986.50	985.61	985.14	986.24	988.00	991.08
30	995.92	992.59	989.49	986.55	985.67	985.19	986.29	988.05	991.24
35	995.92	992.60	989.52	986.59	985.71	985.23	986.33	988.09	991.26
40	995.92	992.61	989.52	986.59	985.72	985.23	986.34	988.09	991.26

Dichos valores de la densidad media del agua líquida en contacto con la cubierta se graficaron para ilustrar su variación en función de γ , para cada hora, de las 10:00 h a las 18:00 h. La Gráfica 6.5 muestra la información mencionada.

Gráfica 6.5. Densidad media del agua líquida en la cubierta en función del ángulo de la cubierta

Para mostrar con más detalles el comportamiento de la densidad del agua en el vidrio, se graficó sólo un conjunto de datos, de las 13:00 a las 16:00 horas. En la Gráfica 6.6 se muestran estas curvas detalladas.

Gráfica 6.6. Densidad media del agua líquida en el vidrio en función del ángulo de la cubierta para las 13 h, 14 h, 15 h y 16 h

Otra variable de interés es la densidad media del agua líquida en la región inmediatamente adyacente a la superficie de la charola de aluminio. A esta variable se le designó como $\rho_{l,charola}$. Dicha variable se obtuvo para cada uno de los ocho destiladores en cada una de las nueve simulaciones realizadas. En la Tabla 6.4 se muestran los valores.

Tabla 6.4. Densidad media del agua líquida en la charola en función del ángulo de la cubierta

Ángulo de la cubierta, γ [°]	Densidad media del agua líquida en la charola, $\rho_{l, \text{charola}}$ [kg/m ³]								
	HORA [h]								
	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
5	995.63	989.99	984.99	983.32	982.31	982.14	983.13	984.93	987.65
10	995.63	989.96	984.98	983.28	982.30	982.10	983.09	984.90	987.59
15	995.63	989.96	984.99	983.27	982.29	982.09	983.07	984.87	987.59
20	995.62	989.94	984.98	983.27	982.27	982.08	983.07	984.87	987.56
25	995.62	989.90	984.95	983.19	982.20	982.01	983.00	984.80	987.57
30	995.62	989.91	984.93	983.22	982.24	982.04	983.03	984.83	987.53
35	995.62	989.86	984.82	983.19	982.20	982.01	983.01	984.80	987.45
40	995.63	989.91	984.91	983.26	982.27	982.08	983.07	984.86	987.52

Dichos valores de la densidad media del agua líquida en contacto con la charola se graficaron para ilustrar su variación en función de γ , para cada hora, de las 10:00 h a las 18:00 h. La Gráfica 6.7 muestra la información mencionada.

Gráfica 6.7. Densidad media del agua líquida en la charola en función del ángulo de la cubierta

Para mostrar con más detalles el comportamiento de la densidad del agua en la charola, se graficó sólo un conjunto de datos, de las 13:00 a las 16:00 horas. En la Gráfica 6.8 se muestran estas curvas detalladas.

Gráfica 6.8. Densidad media del agua líquida en la charola en función del ángulo de la cubierta para las 13 h, 14 h, 15 h y 16 h

6.3 Distribución de densidad del vapor de agua

Otra variable de interés es la densidad media del vapor de agua en la región inmediatamente adyacente a las paredes de vidrio en el destilador. A esta variable se le designó como $\rho_{v, \text{vidrio}}$. Dicha variable se obtuvo para cada uno de los ocho destiladores en cada una de las nueve simulaciones realizadas. En la Tabla 6.5 se muestran los valores.

Tabla 6.5. Densidad media del vapor de agua en el vidrio en función del ángulo de la cubierta

Ángulo de la cubierta, γ [°]	Densidad media del vapor de agua en el vidrio, $\rho_{v, \text{vidrio}}$ [kg/m ³]								
	HORA [h]								
	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
5	0.7317	0.7042	0.6856	0.6724	0.6688	0.6669	0.6714	0.6788	0.6951
10	0.7318	0.7046	0.6862	0.6728	0.6691	0.6673	0.6717	0.6791	0.6958
15	0.7319	0.7052	0.6865	0.6731	0.6694	0.6675	0.6721	0.6795	0.6962
20	0.7319	0.7055	0.6872	0.6733	0.6696	0.6678	0.6723	0.6798	0.6967
25	0.7319	0.7053	0.6867	0.6734	0.6698	0.6679	0.6724	0.6799	0.6963
30	0.7320	0.7059	0.6877	0.6737	0.6700	0.6681	0.6726	0.6801	0.6972
35	0.7320	0.7060	0.6878	0.6738	0.6702	0.6683	0.6728	0.6803	0.6973
40	0.7320	0.7060	0.6878	0.6738	0.6702	0.6683	0.6728	0.6806	0.6973

Dichos valores de la densidad media del vapor en contacto con la cubierta se graficaron para ilustrar su variación en función de γ , para cada hora, de las 10:00 h a las 18:00 h. La Gráfica 6.9 muestra la información mencionada.

Gráfica 6.9. Densidad media del vapor de agua en el vidrio en función del ángulo de la cubierta

Para mostrar con más detalles el comportamiento de la densidad del vapor en la cubierta, se graficó sólo un conjunto de datos, de las 13:00 a las 16:00 horas. En la Gráfica 6.10 se muestran estas curvas detalladas.

Gráfica 6.10. Densidad media del vapor de agua en el vidrio en función del ángulo de la cubierta para las 13 h, 14 h, 15 h y 16 h

Otra variable de interés es la densidad media del vapor de agua en la región inmediatamente adyacente a la superficie de la charola de aluminio del destilador. A esta variable se le designó como $\rho_{v,charola}$. Dicha variable se obtuvo para cada uno de los ocho destiladores en cada una de las nueve simulaciones realizadas. En la Tabla 6.6 se muestran los valores.

Tabla 6.6. Densidad media del vapor de agua en la charola función del ángulo de la cubierta

Ángulo de la cubierta, γ [°]	Densidad media del vapor de agua en la charola, $\rho_{v, \text{charola}}$ [kg/m ³]								
	HORA [h]								
	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
5	0.7297	0.6904	0.6673	0.6606	0.6566	0.6559	0.6598	0.6670	0.6784
10	0.7296	0.6902	0.6673	0.6604	0.6565	0.6558	0.6597	0.6669	0.6782
15	0.7296	0.6902	0.6673	0.6604	0.6565	0.6557	0.6596	0.6668	0.6782
20	0.7296	0.6901	0.6673	0.6604	0.6563	0.6557	0.6596	0.6668	0.6781
25	0.7295	0.6899	0.6671	0.6600	0.6562	0.6554	0.6593	0.6665	0.6780
30	0.7295	0.6899	0.6671	0.6602	0.6563	0.6555	0.6594	0.6666	0.6779
35	0.7296	0.6897	0.6666	0.6601	0.6562	0.6554	0.6593	0.6665	0.6776
40	0.7296	0.6899	0.6670	0.6603	0.6564	0.6557	0.6596	0.6663	0.6779

Dichos valores de la densidad media del vapor en contacto con el recipiente se graficaron para ilustrar su variación en función de γ , para cada hora, de las 10:00 h a las 18:00 h. La Gráfica 6.11 muestra la información mencionada.

Gráfica 6.11. Densidad media del vapor de agua en la charola función del ángulo de la cubierta

Para mostrar con más detalles el comportamiento de la densidad del vapor en el recipiente, se graficó sólo un conjunto de datos, de las 13:00 a las 16:00 horas. En la Gráfica 6.12 se muestran estas curvas detalladas.

Gráfica 6.12. Densidad media del vapor de agua en la charola función del ángulo de la cubierta para las 13 h, 14 h, 15 h y 16 h

6.4 Distribución de velocidad de la mezcla de fluidos

Otra variable de interés es la velocidad máxima del fluido en el volumen interior del destilador. A esta variable se le designó como $v_{m\acute{a}x}$. Dicha variable se obtuvo para cada uno de los ocho destiladores en cada una de las nueve simulaciones realizadas. En la Tabla 6.7 se muestran los valores.

Tabla 6.7. Velocidad máxima de la mezcla de fluidos en función del ángulo de la cubierta

Ángulo de la cubierta, γ [°]	Velocidad máxima del fluido, $v_{\max}$ [m/s]								
	HORA [h]								
	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
5	1.9E-04	1.6E-03	5.2E-04	9.5E-04	4.1E-04	1.2E-03	8.4E-04	9.3E-04	1.8E-03
10	3.9E-04	1.4E-03	1.3E-03	2.4E-03	2.5E-03	1.8E-03	1.9E-03	2.6E-03	1.2E-03
15	5.9E-04	9.4E-04	7.0E-04	1.5E-03	1.4E-03	1.5E-03	1.6E-03	1.3E-03	7.2E-04
20	6.5E-04	6.1E-04	1.9E-03	1.6E-03	1.2E-03	1.8E-03	1.9E-03	1.4E-03	6.2E-04
25	6.7E-04	4.3E-03	6.0E-03	2.9E-03	3.0E-03	2.8E-03	2.8E-03	3.1E-03	5.5E-03
30	9.3E-04	2.9E-03	3.8E-03	1.4E-03	1.4E-03	1.4E-03	1.4E-03	1.4E-03	3.5E-03
35	1.5E-03	2.2E-03	2.7E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.2E-03	2.2E-03	2.2E-03
40	4.3E-03	4.6E-03	5.0E-03	4.8E-03	4.8E-03	4.9E-03	4.8E-03	2.2E-03	4.7E-03

Dichos valores de la velocidad de la mezcla de fases se graficaron para ilustrar su variación en función de γ , para cada hora, de las 10:00 h a las 18:00 h. La Gráfica 6.13 muestra la información mencionada.

Gráfica 6.13. Velocidad máxima de la mezcla de fluidos en función del ángulo de la cubierta

Otra variable de interés es la velocidad mínima del fluido en el volumen interior del destilador. A esta variable se le designó como $v_{\min}$. Dicha variable se obtuvo para cada uno de los ocho destiladores en cada una de las nueve simulaciones realizadas. En la Tabla 6.8 se muestran los valores.

Tabla 6.8. Velocidad mínima de la mezcla de fluidos en función del ángulo de la cubierta

Ángulo de la cubierta, γ [°]	Velocidad mínima del fluido, $v_{\min}$ [m/s]								
	HORA [h]								
	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0

CAPÍTULO 7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 Distribución de temperatura en función de γ ($5^\circ \leq \gamma \leq 40^\circ$)

El método propuesto en este trabajo para analizar las distribuciones de temperatura en todos los destiladores consiste en utilizar la siguiente expresión:

$$\Delta T_f = T_{m,charola} - T_{m,vidrio} \quad (7.1)$$

donde ΔT_f es la diferencia de temperatura del fluido entre la charola y el vidrio. Se decidió utilizar este criterio, dado que, según los fenómenos de la transferencia de calor, un mayor gradiente de temperatura en un espacio provoca un mayor intercambio de calor. En la Tabla 7.1 se muestra el valor de ΔT_f para cada horario de simulación, y para cada destilador con diferente valor de γ .

Tabla 7.1. Diferencia de temperatura del fluido en función del ángulo de la cubierta

Ángulo de la cubierta, γ [°]	Diferencia de temperatura del fluido, ΔT_f [°C]								
	HORA [h]								
	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
5	0.86	6.25	8.80	5.82	6.12	5.50	5.71	5.72	7.78
10	0.90	6.51	9.08	6.10	6.30	5.77	5.98	5.93	8.21
15	0.93	6.76	9.22	6.26	6.47	5.91	6.17	6.17	8.39
20	0.96	6.95	9.53	6.41	6.65	6.07	6.29	6.30	8.65
25	1.00	6.98	9.39	6.62	6.83	6.26	6.48	6.47	8.50
30	0.99	7.22	9.88	6.66	6.87	6.32	6.52	6.54	8.94
35	0.99	7.37	10.15	6.80	7.02	6.43	6.65	6.68	9.16
40	0.98	7.27	10.00	6.68	6.89	6.31	6.53	6.56	9.03

Para visualizar mejor el comportamiento de esta nueva variable, en la Gráfica 7.1 se muestra la variación de ΔT_f en función del ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio, para las 13:00, 14:00, 15:00 y 16:00 horas. Cabe resaltar que ΔT_f sigue esta tendencia para todos los horarios simulados.

Gráfica 7.1. Diferencia de temperatura del fluido en función del ángulo de la cubierta

De las figuras del Apéndice A-1, es posible observar que las temperaturas más altas se localizan en la parte baja del dispositivo, cerca del recipiente absorbedor, mientras que las temperaturas más bajas en las regiones en contacto con la cubierta de vidrio. También se observan dos fenómenos conforme aumenta el ángulo de inclinación: las distribuciones presentan regiones menos uniformes, y en la región superior izquierda del destilador solar existe una porción cuya temperatura no se ve afectada por la temperatura de la charola. Este último fenómeno puede explicarse por la capa límite térmica.

Por otro lado, en la gráfica anterior se observa que ΔT_f sigue un comportamiento creciente conforme aumenta γ , hasta alcanzar lo que parece ser un valor máximo local en $\gamma=35^\circ$. También se observa que entre $\gamma=5^\circ$ y $\gamma=25^\circ$, la tendencia es lineal y estable, pero en el tramo siguiente comienza a verse inestabilidad entre un valor de ΔT_f y el siguiente.

7.2 Distribución de densidad del agua líquida en función de γ ($5^\circ \leq \gamma \leq 40^\circ$)

El método propuesto en este trabajo para analizar las distribuciones de temperatura en todos los destiladores consiste en utilizar la siguiente expresión:

$$\Delta\rho_l = \rho_{l,vidrio} - \rho_{l,charola} \quad (7.2)$$

donde $\Delta\rho_l$ es la diferencia de densidad del agua líquida entre la cubierta de vidrio y la charola. Se decidió utilizar este criterio, dado que, según los fenómenos de la transferencia de calor en líquidos, un valor muy grande de disminución de su densidad implica un valor grande de calor cedido del líquido hacia otro elemento, como el medio ambiente. En la Tabla 7.2 se muestra el valor de $\Delta\rho_l$ para cada horario de simulación, y para cada destilador con diferente valor de γ .

Tabla 7.2. Diferencia de densidad del agua líquida en función del ángulo de la cubierta

Ángulo de la cubierta, γ [°]	Diferencia de densidad del agua líquida, $\Delta\rho_l$ [kg/m ³]								
	HORA [h]								
	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
5	0.26	2.36	4.11	2.91	3.06	2.75	2.85	2.85	3.21
10	0.27	2.45	4.22	3.05	3.15	2.89	2.99	2.95	3.40
15	0.28	2.53	4.28	3.13	3.23	2.96	3.09	3.06	3.47
20	0.29	2.59	4.41	3.20	3.30	3.04	3.14	3.11	3.59
25	0.30	2.60	4.35	3.31	3.41	3.13	3.24	3.20	3.51
30	0.30	2.68	4.56	3.33	3.43	3.16	3.26	3.22	3.71
35	0.30	2.74	4.69	3.40	3.51	3.22	3.33	3.29	3.81
40	0.29	2.70	4.61	3.34	3.44	3.16	3.27	3.23	3.74

Con el objetivo de visualizar mejor el comportamiento de esta nueva variable, en la Gráfica 7.2 se muestra la variación de $\Delta\rho_l$ en función del ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio, para las 13:00, 14:00, 15:00 y 16:00 horas. Cabe resaltar que $\Delta\rho_l$ sigue esta tendencia para todos los horarios simulados.

Gráfica 7.2. Diferencia de densidad del agua líquida en función del ángulo de la cubierta

De las figuras del Apéndice A-2, es posible observar que los valores más altos de densidad se localizan en la parte alta del dispositivo, en contacto con la cubierta de vidrio, mientras que las densidades más bajas en la región dentro de la charola. Este resultado es de esperarse, dado que en general, la densidad de un fluido compresible es inversamente proporcional a su temperatura. También se observan dos fenómenos conforme aumenta el ángulo de inclinación: las distribuciones presentan regiones menos uniformes, y en la región superior izquierda del destilador solar existe una porción de agua líquida cuya densidad no se ve afectada por la temperatura de la charola. Este último fenómeno puede explicarse por la capa límite térmica, que a su vez afecta la densidad del fluido.

Además, en la gráfica anterior se observa que, de manera similar a la temperatura, $\Delta\rho_l$ sigue un comportamiento creciente conforme aumenta γ , hasta alcanzar lo que parece ser un valor máximo local en $\gamma=35^\circ$. También se observa que entre $\gamma=5^\circ$ y $\gamma=25^\circ$, la tendencia es lineal y estable, pero en el tramo siguiente comienza a verse inestabilidad entre un valor de $\Delta\rho_l$ y el siguiente.

7.3 Distribución de densidad del vapor de agua en función de γ ($5^\circ \leq \gamma \leq 40^\circ$)

El método propuesto en este trabajo para analizar las distribuciones de temperatura en todos los destiladores consiste en utilizar la siguiente expresión:

$$\Delta\rho_v = \rho_{v,vidrio} - \rho_{v,charola} \quad (7.3)$$

donde $\Delta\rho_v$ es la diferencia de densidad del vapor de agua entre la cubierta de vidrio y la charola. De manera semejante al caso del agua líquida, se decidió utilizar este criterio, dado que, según los fenómenos de la transferencia de calor en fluidos, un valor muy grande de cambio en su densidad de implica un valor grande de calor intercambiado entre el fluido (en este caso vapor) y otro elemento, como el medio ambiente. En la Tabla 7.3 se muestra el valor de $\Delta\rho_v$ para cada horario simulado, y para cada uno de los ocho destiladores diferentes.

Tabla 7.3. Diferencia de densidad del vapor de agua en función del ángulo de la cubierta

	Diferencia de densidad del vapor de agua, $\Delta\rho_v$ [kg/m ³]								
	HORA [h]								
Ángulo de la cubierta, γ [°]	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
5	0.0021	0.0138	0.0183	0.0118	0.0122	0.0110	0.0115	0.0118	0.0167
10	0.0022	0.0144	0.0189	0.0124	0.0126	0.0115	0.0121	0.0122	0.0176
15	0.0023	0.0150	0.0192	0.0127	0.0129	0.0118	0.0125	0.0127	0.0180
20	0.0023	0.0154	0.0199	0.0130	0.0133	0.0121	0.0127	0.0130	0.0186
25	0.0024	0.0155	0.0196	0.0134	0.0137	0.0125	0.0131	0.0134	0.0183
30	0.0024	0.0160	0.0206	0.0135	0.0138	0.0126	0.0132	0.0135	0.0192
35	0.0024	0.0163	0.0212	0.0138	0.0141	0.0128	0.0134	0.0138	0.0197
40	0.0024	0.0161	0.0209	0.0135	0.0138	0.0126	0.0132	0.0143	0.0194

Con el propósito de visualizar mejor el comportamiento de esta nueva variable, en la Gráfica 7.3 se muestra la variación de $\Delta\rho_v$ en función del ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio, para las 13:00, 14:00, 15:00 y 16:00 horas. Cabe resaltar que $\Delta\rho_v$ sigue esta tendencia para todos los horarios simulados.

Gráfica 7.3. Diferencia de densidad del vapor de agua en función del ángulo de la cubierta

De las figuras del Apéndice A-3, es posible observar que las densidades más altas del vapor se localizan en la parte alta del dispositivo, en contacto con la cubierta de vidrio, mientras que los valores más bajos de densidad están en la región dentro de la charola. Este resultado es de esperarse, dado que en general, la densidad de un fluido compresible es inversamente proporcional a su temperatura. También se observan dos fenómenos conforme aumenta el ángulo de inclinación: las distribuciones presentan regiones menos uniformes, y en la región superior izquierda del destilador solar existe una porción de agua líquida cuya densidad no se ve afectada por la temperatura de la charola. Este último fenómeno puede explicarse por la capa límite térmica, que a su vez afecta la densidad del vapor.

Además, en la gráfica anterior se observa que, de manera similar a la densidad del agua líquida, $\Delta\rho_v$ sigue un comportamiento creciente conforme aumenta γ , hasta alcanzar lo que parece ser un valor máximo local en $\gamma=35^\circ$. También se observa que entre $\gamma=5^\circ$ y $\gamma=25^\circ$, la tendencia es lineal y

estable, pero en el tramo siguiente comienza a verse inestabilidad entre un valor de $\Delta\rho_v$ y el siguiente.

7.4 Distribución de velocidad de la mezcla de fluidos en función de γ **$(5^\circ \leq \gamma \leq 40^\circ)$**

En las figuras del Apéndice A-4 se muestra la distribución de velocidad del volumen de fluido en los destiladores solares. Se observa que en general, para los valores de $\gamma=5^\circ$ hasta $\gamma=25^\circ$, el fluido se mueve en dirección vertical, siguiendo corrientes ordenadas. Pero conforme γ aumenta, las corrientes comienzan a dirigirse hacia las regiones laterales del destilador, y a partir de 30° , comienzan a formarse dos vórtices, con un comportamiento más turbulento, hasta alcanzar valores máximos de velocidad en el destilador solar con $\gamma=40^\circ$. Aunque también se observa en algunas simulaciones que la formación de corrientes con vórtices ocurre en valores de γ de 15° o 20° .

Por otro lado, de la Gráfica 6.13 es difícil determinar un comportamiento claro de la velocidad máxima del volumen de fluido en el destilador. Existe una alta variabilidad de datos para los diferentes horarios simulados, con un valor fijo del ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio. Y de manera semejante, se aprecia una alta variabilidad de los datos de velocidad para los diferentes valores de γ , para un horario de simulación fijo. Aunque puede hacerse una suposición conservadora de que la velocidad del fluido parece aumentar conforme aumenta el ángulo de inclinación de la cubierta.

CONCLUSIONES

La distribución de densidad de las fases se comporta de forma esperada, ya que debido a la convección natural, un aumento en la temperatura de un fluido, en este caso agua líquida o vapor, disminuye su densidad, y por el fenómeno de la flotabilidad, el fluido menos denso asciende y se acumula en la cubierta de vidrio, que está a menor temperatura, donde al enfriarse se condensa y vuelve a aumentar su densidad. En el caso del destilador solar, la temperatura más alta se concentra en el recipiente absorbedor, por lo que tiene a su vez la densidad más baja.

Acerca de la velocidad del fluido dentro del destilador, el comportamiento del movimiento es el esperado, porque a medida que aumenta el volumen dentro del destilador solar (que a su vez depende del valor del ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio), el fluido cuenta con más espacio para desplazarse y crear corrientes turbulentas. Para la transferencia de calor, este fenómeno es positivo, porque aumenta la advección en el fluido.

Sobre la radiación solar incidente en las paredes del dispositivo, las distribuciones de radiación y de temperatura demuestran que la cubierta de vidrio se comporta como un material semi-transparente. Esto se debe a que la variación en la radiación no afecta sensiblemente la uniformidad de la temperatura en la cubierta.

La diferencia de temperatura entre la cubierta de vidrio y el recipiente aumenta conforme aumenta el ángulo de inclinación en todos los horarios, hasta alcanzar un valor máximo local para $\gamma=35^\circ$. Dadas las condiciones de este trabajo, éste parece ser el ángulo óptimo, ya que se tiene una diferencia mayor de temperatura entre las dos regiones del volumen, por lo que se genera una mayor transferencia de calor entre ellas. Sin embargo, se recomienda ampliar el intervalo en el ángulo de inclinación para observar si la diferencia de temperatura sigue aumentando, y que en este caso, el valor de 35° es efectivamente un máximo global. En caso contrario, el valor $\gamma=40^\circ$ se convertiría en el ángulo de inclinación óptimo de la cubierta de vidrio.

ENTREGABLES COMPROMETIDOS EN LA PROPUESTA

Para este proyecto se contempló entregar una carpeta electrónica con los programas creados en el software ANSYS para cada destilador solar. Debido a que el tamaño de dichos archivos era relativamente grande, se decidió crear una carpeta en la nube para alojar los archivos. Además, se decidió redactar un manual electrónico con instrucciones detalladas para ejecutar cada paso de las simulaciones, adjuntando imágenes de los elementos utilizados de la interfaz gráfica del software.

APÉNDICE A. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS DIVERSOS CASOS DE APLICACIÓN

A-1. Distribución de temperatura

Figura A-1.1. Temperatura a las 10:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-1.2. Temperatura a las 10:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-1.3. Temperatura a las 11:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-1.4. Temperatura a las 11:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-1.5. Temperatura a las 12:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-1.6. Temperatura a las 12:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-1.7. Temperatura a las 13:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-1.8. Temperatura a las 13:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-1.9. Temperatura a las 14:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-1.10. Temperatura a las 14:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-1.11. Temperatura a las 15:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-1.12. Temperatura a las 15:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-1.13. Temperatura a las 16:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-1.14. Temperatura a las 16:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-1.15. Temperatura a las 17:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-1.16. Temperatura a las 17:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-1.17. Temperatura a las 18:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-1.18. Temperatura a las 18:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

A-2. Distribución de densidad del agua líquida

Figura A-2.1 Densidad del agua líquida a las 10:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-2.2 Densidad del agua líquida a las 10:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-2.3 Densidad del agua líquida a las 11:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-2.4. Densidad del agua líquida a las 11:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-2.5. Densidad del agua líquida a las 12:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-2.6. Densidad del agua líquida a las 12:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-2.7. Densidad del agua líquida a las 13:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-2.8. Densidad del agua líquida a las 13:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-2.9. Densidad del agua líquida a las 14:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-2.10. Densidad del agua líquida a las 14:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-2.11. Densidad del agua líquida a las 15:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-2.12. Densidad del agua líquida a las 15:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-2.13. Densidad del agua líquida a las 16:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-2.14. Densidad del agua líquida a las 16:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-2.15. Densidad del agua líquida a las 17:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-2.16. Densidad del agua líquida a las 17:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-2.17. Densidad del agua líquida a las 18:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-2.18. Densidad del agua líquida a las 18:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

A-3. Distribución de densidad del vapor de agua

Figura A-3.1. Densidad del vapor de agua a las 10:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-3.2. Densidad del vapor de agua a las 10:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-3.3. Densidad del vapor de agua a las 11:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-3.4. Densidad del vapor de agua a las 11:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-3.5. Densidad del vapor de agua a las 12:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-3.6. Densidad del vapor de agua a las 12:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-3.7. Densidad del vapor de agua a las 13:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-3.8. Densidad del vapor de agua a las 13:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-3.9. Densidad del vapor de agua a las 14:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-3.10. Densidad del vapor de agua a las 14:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-3.11. Densidad del vapor de agua a las 15:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-3.12. Densidad del vapor de agua a las 15:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-3.13. Densidad del vapor de agua a las 16:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-3.14. Densidad del vapor de agua a las 16:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-3.15. Densidad del vapor de agua a las 17:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-3.16. Densidad del vapor de agua a las 17:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-3.17. Densidad del vapor de agua a las 18:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-3.18. Densidad del vapor de agua a las 18:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

A-4. Distribución de velocidad de la mezcla de fluidos

Figura A-4.1. Velocidad del volumen de fluido a las 10:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-4.2. Velocidad del volumen de fluido a las 10:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-4.3. Velocidad del volumen de fluido a las 11:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-4.4. Velocidad del volumen de fluido a las 11:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-4.5. Velocidad del volumen de fluido a las 12:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-4.6. Velocidad del volumen de fluido a las 12:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-4.7. Velocidad del volumen de fluido a las 13:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-4.8. Velocidad del volumen de fluido a las 13:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-4.9. Velocidad del volumen de fluido a las 14:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-4.10. Velocidad del volumen de fluido a las 14:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-4.11. Velocidad del volumen de fluido a las 15:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-4.12. Velocidad del volumen de fluido a las 15:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-4.13. Velocidad del volumen de fluido a las 16:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-4.14. Velocidad del volumen de fluido a las 16:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-4.15. Velocidad del volumen de fluido a las 17:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-4.16. Velocidad del volumen de fluido a las 17:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-4.17. Velocidad del volumen de fluido a las 18:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-4.18. Velocidad del volumen de fluido a las 18:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

A-5. Distribución de radiación incidente

Figura A-5.1. Radiación incidente a las 10:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-5.2. Radiación incidente a las 10:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-5.3. Radiación incidente a las 11:00 para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-5.4. Radiación incidente a las 11:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-5.5. Radiación incidente a las 12:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-5.6. Radiación incidente a las 12:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-5.7. Radiación incidente a las 13:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-5.8. Radiación incidente a las 13:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-5.9. Radiación incidente a las 14:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-5.10. Radiación incidente a las 14:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-5.11. Radiación incidente a las 15:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-5.12. Radiación incidente a las 15:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-5.13. Radiación incidente a las 16:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-5.14. Radiación incidente a las 16:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-5.15. Radiación incidente a las 17:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-5.16. Radiación incidente a las 17:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

Figura A-5.17. Radiación incidente a las 18:00 h para el destilador con $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ y 20°

Figura A-5.18. Radiación incidente a las 18:00 h para el destilador con $\gamma = 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ y 40°

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aybar, H., & Assefi, H. (2009). Simulation of a Solar Still to Investigate Water Depth and Glass Angle. *Desalination and Water Treatment*, 7, 35-40.
- Azooz, A., & Younis, G. (2016). Effect of Glass Inclination Angle on Solar Still Performance. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 8.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa* (4a ed.). Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Chávez, S. (2015). *Diseño, Construcción y Evaluación Experimental y Exergética de un Destilador Solar*. Ciudad de México.
- Dean, J., & Nicolescu, R. (s.f.). *Nodes, elements, degrees of freedom and boundary conditions*. Recuperado el 17 de diciembre de 2020, de Finite Element Method: www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fem/node.php
- Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4a ed.). Nueva Jersey, U.S.A.: Wiley.
- FLUENT Inc. (Febrero de 2003). *FLUENT 6.1 Documentation*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2020, de <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node487.htm>
- Ghiaasiaan, M. (2011). *Convective Heat and Mass Transfer*. Nueva York: Cambridge University Press.
- Holman, J. (2010). *Heat Transfer* (10a ed.). Nueva York: McGraw-Hill.
- Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T., & Lavine, A. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6a ed.). Nueva Jersey, U.S.A.: Wiley.
- Khalifa, A. (2011). On the Effect of Cover Tilt Angle of the Simple Solar Still on its Productivity in Different Season and Latitudes. *Energy Conversion and Management*, 52, 431-436.
- Kozanoglu, B., & López, J. (2007). Thermal boundary layer and the characteristic length on natural convection over a horizontal plate. *Heat Mass Transfer*, 43, 333-339.

- Kreith, F., Manglik, R., & Bohn, M. (2011). *Principles of Heat Transfer* (7a ed.). Stamford, Connecticut, U.S.A.: CENGAGE.
- Mahmood, T., Naz, M., Sulaiman, S., Jamil, Y., Shukrullah, S., Zahid, M., & Inayat, M. (2017). CFD Modelling and Experimental Validation of a Solar Still. *MATEC Web of Conferences*, 131.
- Moaveni, S. (1999). *Finite element analysis. Theory and application with ANSYS*. Nueva Jersey: Prentice-Hall.
- Modest, M. (2003). *Radiative Heat Transfer* (2a ed.). San Diego, U.S.A.: Academic Press.
- Nikishkov, G. (2004). *Introduction to the Finite Element Method*. Universidad de Aizu, Aizu.
- Panchal, H., & Shah, P. (2011). Modelling and verification of single slope solar still using ANSYS-CFX. *International Journal of Energy and Environment*, 2(6), 985-998.
- Panchal, H., & Shah, P. (2013). Modeling and verification of hemispherical solar still using ANSYS-FLUENT. *International Journal of Energy and Environment*, 4(3), 427-440.
- Tiwari, G., Tiwari, A., & Shyam. (2016). *Handbook of Solar Energy*. Springer.
- Tu, J., Yeoh, G. H., & Liu, C. (2012). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach* (2a ed.). Butterworth-Heinemann.