



**VICERECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA DE
TECNOLOGÍA**

CENTRO DE POSGRADOS

MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE MAGISTER EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**TEMA: “ANÁLISIS Y MODELACIÓN DE LA ESTRATIFICACIÓN DE
TEMPERATURAS EN UN ACUMULADOR VERTICAL PARA AGUA
CALIENTE SANITARIA”**

AUTOR: CARRIÓN GALARZA, DIEGO FRANCISCO

DIRECTOR: ARCOS AVILÉS, DIEGO GUSTAVO

SANGOLQUÍ

2019



VICERECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *"ANÁLISIS Y MODELACIÓN DE LA ESTRATIFICACIÓN DE TEMPERATURAS EN UN ACUMULADOR VERTICAL PARA AGUA CALIENTE SANITARIA"* fue realizado por el señor *Carrión Galarza, Diego Francisco* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, Diciembre de 2019

.....
Diego Gustavo Arcos Avilés

C.C.: 1710879444



VICERECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Carrión Galarza, Diego Francisco*, con cédula de ciudadanía n° 1713703062, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *“Análisis y modelación de la estratificación de temperaturas en un acumulador vertical para agua caliente sanitaria”* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciado las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, Diciembre de 2019

Diego Francisco Carrión Galarza

C.C.: 1713703062



VICERECTORADO DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y
TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA
CENTRO DE POSGRADOS
AUTORIZACIÓN

Yo, *Carrión Galarza, Diego Francisco* autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “*Análisis y modelación de la estratificación de temperaturas en un acumulador vertical para agua caliente sanitaria*” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, Diciembre de 2019

Diego Francisco Carrión Galarza

C.C.: 1713703062

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi amada esposa Anabel, quien ha sido mi fuente de inspiración y soporte en los más duros momentos. A mi pequeña hija Paula, que me ha contagiado de ese espíritu aventurero que me ha llevado por el camino de la investigación. Para mis padres quienes sabiamente sembraron en mí las semillas del conocimiento y siempre me inculcaron en buscar nuevos caminos y metas.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a la Universidad Politécnica Salesiana quien a través de sus representantes brindaron todo el apoyo y soporte para la culminación de esta meta, especialmente al **Ph. D. Esteban Inga**, quien ha sido mentor y amigo. De la misma manera al **Ph. D. Diego Arcos** que gracias a su colaboración y conocimientos se pudo lograr el presente trabajo. Finalmente quiero agradecer a todos mis maestros quienes a lo largo de los años han aportado con el conocimiento que tengo a la fecha.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	i
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRAC.....	xi
CAPÍTULO 1.....	1
GENERALIDADES	1
Antecedentes.....	1
Definición del problema	2
Objetivos.....	2
Alcance.....	3
Justificación e Importancia	3
CAPÍTULO 2.....	5
MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Energía Solar.....	5
2.1.1 Constante solar	6
2.1.2 Radiación Solar Terrestre.....	9
2.1.3 Conceptos geométricos Sol – Tierra	10
2.1.4 Cuantificación de la radiación solar	11
2.2 Sistemas de agua caliente sanitaria (ACS).....	14
2.2.1 Sistemas de circulación natural.....	15
2.2.2 Sistemas de circulación forzada.....	16
2.2.3 Componentes de un sistema ACS	16
2.3 Análisis termodinámico en cilindros verticales para ACS	18
2.3.1 Primera ley de la termodinámica	18
2.3.2 Segunda ley de la termodinámica	18

2.3.3	Conducción	19
2.3.4	Convección.....	20
2.3.5	Radiación	20
2.4	Almacenamiento de energía en sistemas solares	21
2.4.1	Almacenamiento por calor sensible.....	22
2.4.2	Almacenamiento por calor latente	23
2.4.3	Almacenamiento de energía termo-química.....	24
2.5	Efecto termosifón.....	24
CAPÍTULO 3.....		26
MODELOS DE ESTRATIFICACIÓN		26
3.1	Análisis de pérdidas en los tanques de almacenamiento	26
3.1.1	Tanque de almacenamiento ideal	27
3.1.2	Tanque de almacenamiento real	27
3.1.3	Modelo matemático	29
3.2	Estratificación de temperatura	32
3.2.1	Número de Biot	33
3.3	Modelo ideal	34
3.4	Modelo multinodal.....	36
CAPÍTULO 4.....		38
DESARROLLO EXPERIMENTAL		38
4.1.	Modelo matemático colector solar plano	39
4.2.	Heurística.....	42
CAPÍTULO 5.....		44
ANÁLISIS DE RESULTADOS		44
CAPÍTULO 6.....		49
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		49
REFERENCIAS		50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Comportamiento del lésimo día de cada mes.</i>	8
Tabla 2 <i>Constante climáticas a' y b' basadas en el modelo de Löff.</i>	13
Tabla 3 <i>Factor de ajuste de aislamientos comerciales.</i>	29
Tabla 4 <i>Temperatura en el interior del tanque vertical dividida por nodos</i>	39
Tabla 5 <i>Temperatura real y modelada en el interior de un tanque vertical</i>	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Características físicas del Sol en relación la Tierra.	6
Figura 2. Espectro de radiación solar extraterrestre.	7
Figura 3. Variación de la radiación solar extraterrestre durante un año.	8
Figura 4. Conceptos geométricos entre el Sol y la Tierra.	10
Figura 5. Irradiación solar para el cantón de Sangolquí con inclinación de 10°.	14
Figura 6. Esquema de un sistema de ACS.	17
Figura 7. Estructura de un tanque de almacenamiento	28
Figura 8. Esquema de sistema de calentamiento solar.	29
Figura 9. Estratificación de temperatura en un reservorio natural de agua.	33
Figura 10. Modelo de tanque de almacenamiento ideal (No estratificado).	35
Figura 11. Modelo de tanque de almacenamiento multinodal (Estratificado).	36
Figura 12. Estratificación de temperatura medidas.....	38
Figura 13. Comparación entre las medidas reales y el modelo propuesto	40
Figura 14. Optimización de la energía en cada nodo	42
Figura 15. Temperatura en función del cambio de radiación solar	44
Figura 16. Estratificación de temperatura considerando ingreso y salida de ACS.....	45
Figura 17. Estratificación con ingreso y salida de agua en el centro	46
Figura 18. Estratificación con aislamiento de fibra mineral.....	47
Figura 19. Estratificación con aislamiento de fibra de vidrio	47
Figura 20. Estratificación sin aislamiento.....	48

RESUMEN

En la actualidad los sistemas que aprovechan los recursos naturales renovables no convencionales son más frecuentes de encontrar en todo tipo de aplicación, de allí que el aprovechamiento de la energía solar para el calentamiento de agua caliente sanitaria requiere un modelo matemático que explique el comportamiento, tanto de los colectores solares planos como del tanque de almacenamiento. En el presente trabajo de grado se plantea un modelo heurístico con el que se logra cuantificar la temperatura estratificada en el interior del tanque de almacenamiento vertical, el cual depende de la radiación solar, temperatura del agua de la red pública, posición del ingreso y salida del agua, tipo de aislamiento de las paredes del tanque y la temperatura ambiente. Como resultados del modelo heurístico se pudo apreciar que luego de optimizar el tamaño de los nodos y considerando el cambio energético del agua que ingresa al tanque de almacenamiento por efectos de la energía solar existente en el sitio se logró tener una respuesta bidimensional de la temperatura y en comparación de la literatura existente se comprueba que la temperatura no se estratifica únicamente de manera horizontal, sino que también se estratifica de manera vertical. Una ventaja adicional del modelo es que permite analizar diferentes posiciones para el ingreso y salida del agua en el tanque de almacenamiento, determinando que la mejor posición para los mismos es el centro del acumulador vertical.

PALABRAS CLAVES:

- **ESTRATIFICACIÓN DE TEMPERATURA**
- **ENERGÍA SOLAR**
- **COLECTOR SOLAR PLANO**

ABSTRAC

At present, systems that take advantage of unconventional renewable natural resources are more frequent to find in all types of applications, hence the use of solar energy for heating domestic hot water requires a mathematical model that explains the behavior, both of flat solar collectors as of the storage tank. In the present grade work a heuristic model is proposed with which it is possible to quantify the stratified temperature inside the vertical storage tank, which depends on the solar radiation, water temperature of the public network, position of entry and exit of water, type of insulation of tank walls and ambient temperature. As a result of the heuristic model, it was seen that after optimizing the size of the nodes and considering the energy change of the water entering the storage tank due to the effects of the existing solar energy on the site, a two-dimensional temperature response was achieved and in comparison to the existing literature it is found that the temperature is not only stratified horizontally, but also stratified vertically. An additional advantage of the model is that it allows analyzing different positions for the entry and exit of water in the storage tank, determining that the best position for them is the center of the vertical accumulator.

KEY WORDS:

- **TEMPERATURE STRATIFICATION**
- **SOLAR ENERGY**
- **FLAT SOLAR COLECTOR**

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

Antecedentes

La Subsecretaría de Energía Renovable y Eficiencia Energética del Ecuador como uno de sus proyectos tiene el aprovechamiento de la energía solar térmica para el calentamiento de agua (ACS), para lo cual el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables promueve la sustitución de 20 mil calefones anuales y establecer una normativa para que los nuevos proyectos residenciales incluyan diseños para cubrir el 100 % de la necesidad de ACS [1].

Las diferentes políticas gubernamentales que el Ecuador ha empezado a tomar buscan la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y un mayor aprovechamiento de las energías limpias, por ello los diferentes gobiernos locales apoyan diversas iniciativas para lograr el objetivo global. Por esta razón un número significativo de empresas han empezado a comercializar sistemas para calentamiento de ACS teniendo diferentes características, sin embargo todos ellos presentan elementos comunes como son los paneles solares planos y el tanque de almacenamiento.

Los sistemas de almacenamiento son diseñados para que cumplan dos funciones específicas, la primera es almacenar el volumen de agua caliente para su consumo y la segunda es la acumulación de calor de una forma sencilla [2]. Dado a que los diseños no toman en cuenta las pérdidas tanto por radiación y conducción [3], [4]; y a que el agua caliente sanitaria dentro de los reservorios tiende a estratificarse, los sistemas comúnmente son sobredimensionados y los costos de instalación son mayores en relación a los que realmente se necesitan.

Definición del problema

En el Ecuador una de las energías renovables de mayor aprovechamiento es la energía solar; el uso frecuente de ella es para el calentamiento de agua sanitaria (ACS) en lugar de los calentadores a base de combustibles fósiles.

En este contexto, al no conocer cómo se distribuye el campo de temperaturas en el interior de los tanques de almacenamiento es un inconveniente, ya que la variación de temperatura a su salida va a depender de la temperatura promedio dentro del tanque reservorio, es decir, es necesario conocer cómo se estratifica el ACS dentro del tanque de almacenamiento para que el agua de consumo no sufra variaciones considerables.

Las pérdidas que se tienen en el interior del tanque de almacenamiento producen una convección natural al generar una estratificación del agua caliente dentro del reservorio, debido a esta estratificación la temperatura a la salida del tanque no permanece constante durante el transcurso del tiempo y por ello es casi imposible tener ACS a temperatura constante por periodos largos de tiempo.

Objetivos

1.3.1 General

Realizar el modelamiento matemático y el análisis de la estratificación de temperaturas en el interior de un acumulador vertical para agua caliente sanitaria.

1.3.2 Específico

- Elaborar un estudio de campo y toma de datos de la estratificación de temperatura en tanques de almacenamiento de agua caliente sanitaria.
- Desarrollar un modelo matemático que describa la estratificación de la temperatura del agua en el interior del tanque de almacenamiento de ACS.

- Describir el comportamiento de variables como densidad, altura y calor específico en la estratificación de temperatura.
- Cuantificar las pérdidas que se generan en el tanque de almacenamiento de ACS.

Alcance

Se analizará el estado del arte de los diferentes modelos matemáticos empleados para la estratificación de temperaturas en reservorios para ACS.

Se cuantificará las pérdidas por conducción, convección y radiación; y se examinará como éstas intervienen en la estratificación de temperatura de tanques de ACS mediante la ayuda de ensayos experimentales.

Mediante la ayuda de un modelo matemático se realizará una simulación del comportamiento de la estratificación de temperatura de agua caliente sanitaria dentro de tanques de almacenamiento verticales.

Justificación e Importancia

El uso de energías limpias como es la energía solar para el calentamiento de ACS se ha convertido en una solución para lograr la reducción de gases de efecto invernadero, este tipo de energía a diferencia de las que son a base de combustibles fósiles es una fuente periódica y aleatoria, en otras palabras, no es constante y por ello la temperatura que se transmite desde los colectores solares planos hacia el tanque de almacenamiento también es variable.

La temperatura del agua dentro del tanque de almacenamiento no tiene un comportamiento constante, se estratifica por lo que se encuentra diferencias entre la parte superior y la parte inferior, siendo mayor en la parte superior.

Con una predicción de la temperatura en cada punto dentro del tanque de almacenamiento se logra tener un mejor control y uso del agua caliente sanitaria.

Otra ventaja adicional que conlleva el conocer como es el comportamiento de la temperatura dentro sus reservorios es poder tener un sistema adicional de calentamiento para que entre en funcionamiento cuando la temperatura en el reservorio descienda de los valores esperados por el usuario final, y lograr de esta manera una mayor satisfacción por parte del usuario.

La estratificación de la temperatura dentro del reservorio suele causar por lo general un sobredimensionamiento de los sistemas de calentamiento de agua a base de energía solar y por ello es importante tener un modelo y una simulación de la estratificación para que los diseñadores puedan reducir sus costos de implementación.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

Desde la antigüedad la necesidad humana ha buscado la manera de usar diferentes recursos para realizar sus diversas actividades, como por ejemplo, el uso de viento para mover embarcaciones. Dado a ello el hombre, propio por su naturaleza investigadora, ha inquirido la manera de cuantificar y poder predecir ciertos comportamientos de los recursos naturales, como son el viento y la radiación solar [1].

Sin embargo, la humanidad en la actualidad se ha volcado por el uso indiscriminado de energías fósiles, tal como, el carbón natural, petróleo y gas natural; lo que ha afectado al ecosistema por sus altas emisiones de gases de efecto invernadero. Por otra parte se sabe que casi toda la energía que llega a la Tierra proviene del sol, al que se lo puede considerar como el origen de todas las energías renovables ya que su calor provoca en la Tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos, que son la fuente de la energía eólica; también el sol ordena el ciclo del agua, causa la evaporación que predispone la formación de nubes y, por tanto, las lluvias y por ello se puede considerar que del sol procede la energía hidráulica. Así mismo las plantas se nutren del sol para realizar la fotosíntesis, vivir y crecer; y todo ello es la base de la biomasa. Por último, el sol se aprovecha directamente en las energías solares, tanto la térmica como la fotovoltaica [2].

2.1 Energía Solar

Es la energía que proviene del sol, que puede ser considerado un cuerpo negro ya que su temperatura promedio es de aproximadamente 5777 °K. aproximadamente [3],

toda esta cantidad de temperatura es generada por los procesos de fusión nuclear que se producen en el interior de esta gran esfera gaseosa.

El sol se encuentra aproximadamente a $1,495 \times 10^{11}$ m de distancia de la Tierra y tiene un diámetro aproximado de 1.39×10^9 m, tal como se muestra en la figura 2.1 [2][3].

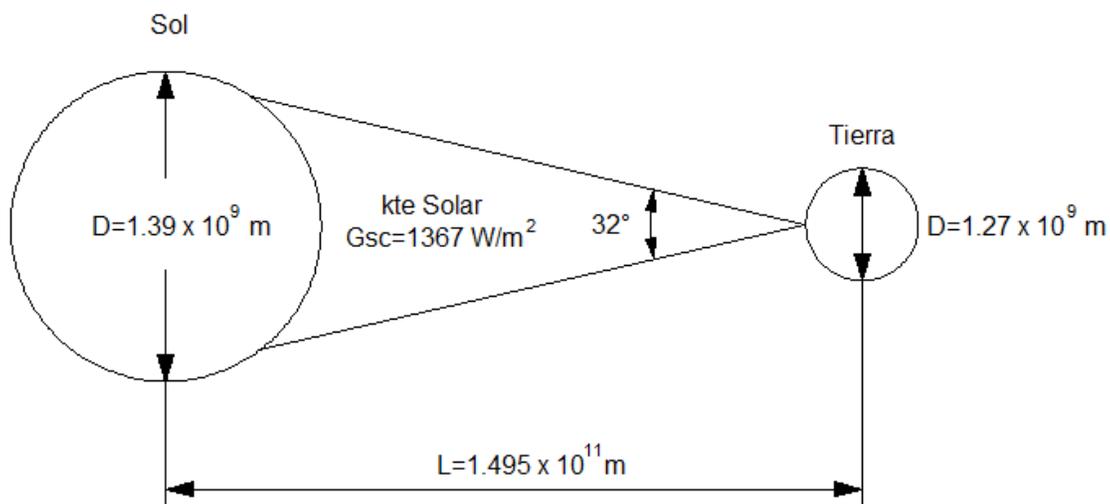


Figura 1. Características físicas del Sol en relación la Tierra.

Toda la energía que proviene del Sol en su viaje hasta la tierra se atenúa, y llega en menor proporción que planetas y objetos ubicados a menores distancias que la Tierra.

2.1.1 Constante solar

La constante solar (G_{sc}) es la cantidad de energía proveniente del Sol por unidad de tiempo medido sobre una unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, con un valor de 1367 W/m^2 [3], en los exteriores de la atmósfera terrestre.

Toda esta energía está compuesta por tres componentes principales, luz ultravioleta, luz visible y luz infrarroja; cada uno en distintos porcentajes y cantidades de irradiancia (Ver figura 2.2) [1].

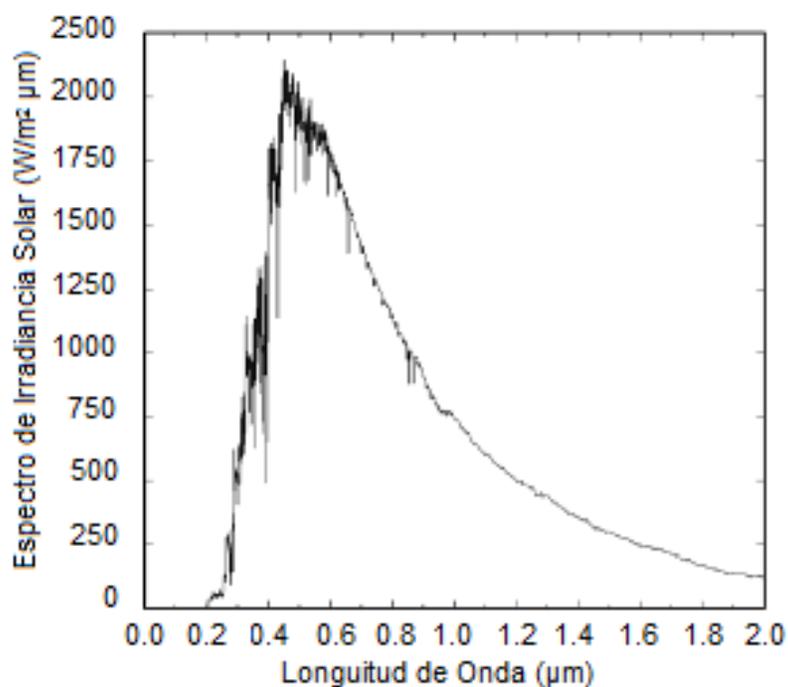


Figura 2. Espectro de radiación solar extraterrestre.

Fuente: (J. Duffie, 2006)

Si la trayectoria de la Tierra alrededor del Sol fuese circular la constante solar durante todo el año terrestre fuese la misma, pero dado a que la Tierra tiene una trayectoria elíptica de pequeña excentricidad este valor cambia día a día. Por lo expuesto anteriormente, la radiación solar extraterrestre sobre el plano horizontal en el transcurso del tiempo se puede predecir mediante (2.1) (Ver figura 2.3) [3].

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 * \cos \left(\frac{360 * n}{365} \right) \right) \quad (2.1)$$

Dónde:

G_{on} ; es la irradiancia solar extraterrestre,

G_{sc} ; es la constante solar, y;

n ; es el enésimo día del mes.

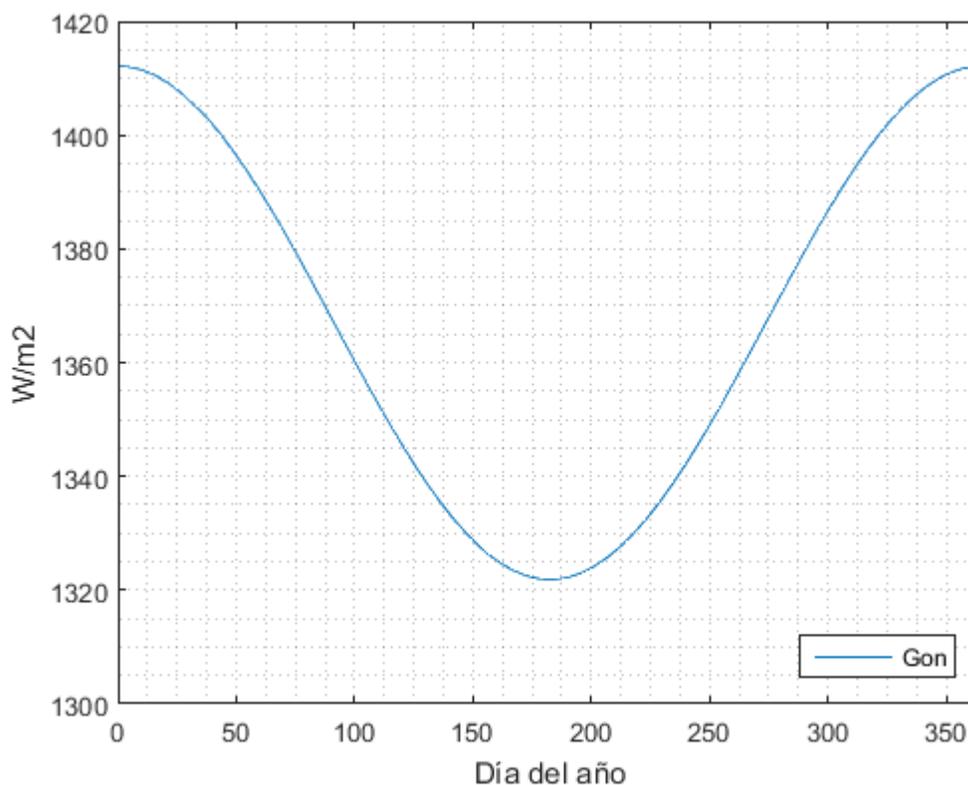


Figura 3. Variación de la radiación solar extraterrestre durante un año.

Fuente: (J. Duffie, 2006)

Tabla 1

Comportamiento del lésimo día de cada mes.

Mes	lésimo día del mes	Valores promedio del lésimo día del mes		
		Fecha	Día del año	Declinación
Enero	i	17	17	-20,9
Febrero	31 + i	16	47	-13,0
Marzo	59 + i	16	75	-2,4
Abril	90 + i	15	105	9,4
Mayo	120 + i	15	135	18,8
Junio	151 + i	11	162	23,1
Julio	181 + i	17	198	21,2
Agosto	212 + i	16	228	13,5
Septiembre	243 + i	15	258	2,2
Octubre	273 + i	15	288	-9,6
Noviembre	304 + i	14	318	-18,9
Diciembre	334 + i	10	344	-23,0

Fuente: (J. Duffie, 2006)

Como se puede apreciar en la figura 2.3 cada día del año tiene fluctuación en cuanto al comportamiento del recurso solar, pero también es válido considerar un

comportamiento medio de cada mes para lo cual se considera el valor de la irradiancia del día representativo, la determinación del día representativo también conocido como iésimo día (i) está expresado en la tabla 2.1 [3].

2.1.2 Radiación Solar Terrestre

Al ingresar la radiación solar a la atmósfera terrestre se ve reducida en su cantidad, este efecto se produce al atravesar las diferentes partículas contenidas en el aire, por lo que su magnitud disminuye en la superficie terrestre. La reducción de la radiación solar es de alrededor del 26,1 % lo que produce una radiación solar promedio sobre la superficie terrestre de 1000 W/m^2 [4], conocida como media mundial.

La radiación solar, al atravesar las nubes presentes en la atmósfera terrestre, se difumina y se divide en directa, difusa y albedo [5].

La radiación solar directa es aquella que proviene de manera directa desde Sol sin ningún cambio de dirección e incide sobre la superficie terrestre. Este tipo de radiación es la más representativa de la energía solar [6].

La radiación solar difusa es aquella que cambia de dirección al atravesar la atmósfera terrestre debido al choque con diferentes partículas presentes allí [7].

Albedo es el efecto que se obtiene al reflejarse la radiación solar sobre la superficie terrestre o cualquier objeto sobre ella, es decir, es una radiación reflejada sobre los objetos en la superficie terrestre [8].

2.1.3 Conceptos geométricos Sol – Tierra

Las relaciones geométricas entre el sol y la Tierra ayudan a tener una mejor comprensión de cómo es la incidencia de la radiación solar sobre la superficie terrestre (Ver figura 2.4) [9].

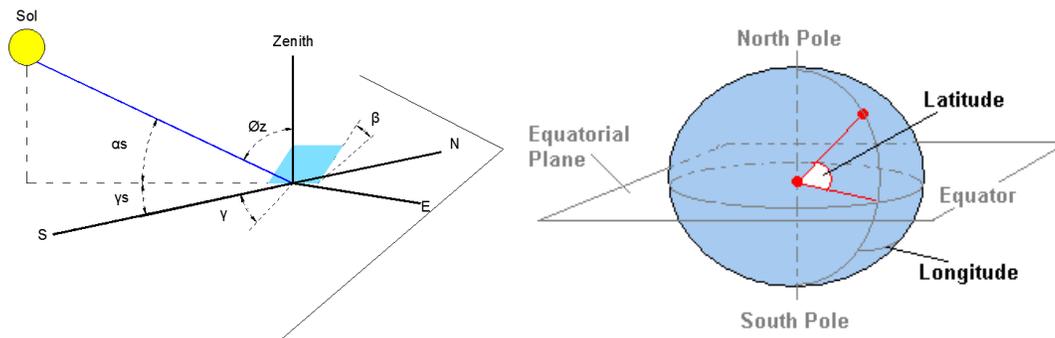


Figura 4. Conceptos geométricos entre el Sol y la Tierra.

Fuente: (J. Duffie, 2006)

Donde:

\varnothing ; Representa la latitud, que es la localización angular entre la línea ecuatorial y un punto determinado de la superficie terrestre, su valor puede estar entre -90° en el polo sur y 90° en el polo norte.

δ ; Representa la declinación, que es la posición angular del sol al medio día con respecto al plano formado por la línea ecuatorial, su valor es $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$.

ω ; Representa el ángulo horario, que es el desplazamiento angular del sol con respecto al meridiano local por la rotación de la tierra.

Θ ; Representa el ángulo de incidencia, que no es más que ángulo entre la radiación directa y la superficie.

Θ_z ; Representa el ángulo de zenith, que es ángulo entre la recta vertical o normal y la línea del sol a la tierra.

α ; Representa el ángulo de altitud solar, que es el ángulo entre la línea horizontal y la línea del sol a la tierra.

γ ; Representa el ángulo azimuth, que es la desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie del meridiano local. $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$.

2.1.4 Cuantificación de la radiación solar

Debido a que la cantidad de radiación solar no permanece constante durante el transcurso de tiempo es necesario cuantificar la cantidad de energía proveniente del Sol, y se lo puede realizar por medio de dos metodologías; mediante el uso de modelos matemáticos y por medio de medición del recurso solar.

2.1.4.1 Instrumentos para medir el recurso solar

La medición del recurso solar es uno de los principales factores para poder caracterizar la energía solar disponible en cada región del planeta, para lo cual es necesario medir el tiempo en el cual se dispone el recurso y la magnitud del mismo. Para ello se dispone de diversos instrumentos como son:

- Piroheliómetro, que está diseñado para medir la radiación directa.
- Piranómetro radiación difusa, que mide la radiación difusa.
- Piranómetro radiación global, que mide la sumatoria de la radiación directa y difusa.
- Heliógrafo, registra la cantidad de luz solar en un lugar determinado [3].

2.1.4.2 Análisis numérico del recurso solar

El término radiación se utiliza habitualmente en un sentido genérico. La energía incidente sobre una superficie, por unidad de tiempo y de área, se denomina irradiancia (G) y se mide normalmente en Watios por metro cuadrado (W/m²). La energía incidente sobre esa misma superficie, por unidad de área, durante un determinado período de tiempo, se denomina irradiación, H, y se obtiene de la anterior (2.2).

$$H = \int_{t_1}^{t_2} G(t)dt \quad (2.2)$$

Para cuantificar numéricamente el recurso solar se han desarrollado varios modelos matemáticos que representan el comportamiento de la radiación solar en el transcurso del tiempo, considerando la posición geográfica en donde se necesite los datos de la radiación solar.

Mediante la ecuación de regresión de Ångström (2.3) [3] se puede cuantificar la radiación solar en días despejados, obteniendo el promedio diario.

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_c} = a' + b' \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \quad (2.3)$$

Dónde:

\bar{H} ; es la irradiación solar promedio diaria sobre una superficie horizontal,

\bar{H}_c ; es la irradiación solar promedio diaria para una ubicación y mes bajo estudio,

a' , b' ; son constantes empíricas obtenidas mediante el modelo de Löff [10], que

para el caso del Ecuador se muestra en la tabla 2.2,

\bar{n} ; son las horas sol pico promedio diarias, y;

\bar{N} ; es el promedio de las horas sol pico máximo del mes.

Tabla 2

Constante climáticas a' y b' basadas en el modelo de Löff.

Región	a'	b'
Sierra	0.25	0.45
Costa y Amazonía	0.28	0.54

El promedio de las horas sol pico máximo de un mes se lo puede calcular por medio de (2.4) [3].

$$\bar{N} = \left(\frac{12}{5}\right) * \text{Cos}[-\text{Tan}(\phi) * \text{Tan}(\delta)] \quad (2.4)$$

Dónde:

ϕ ; es la latitud del lugar, y;

δ ; es la declinación solar, que es la posición del sol al medio día con respecto al paralelo 0.

Dado que el modelo presentado por Ångström es válido para superficies horizontales es necesario realizar una corrección para poder analizar el valor de la irradiación solar en planos inclinados para lo cual se usa (2.5) [10].

$$H(\beta) = A * \bar{H} + B * \bar{H}^2 \quad (2.5)$$

Donde;

$H(\beta)$; es la irradiación solar sobre una superficie inclinada,

β ; es el ángulo de inclinación de la superficie con respecto al plano horizontal, y;

A y B, son coeficientes que dependen de la inclinación del panel, coeficiente de reflexión del suelo, latitud del emplazamiento y mes del año (ver anexo A).

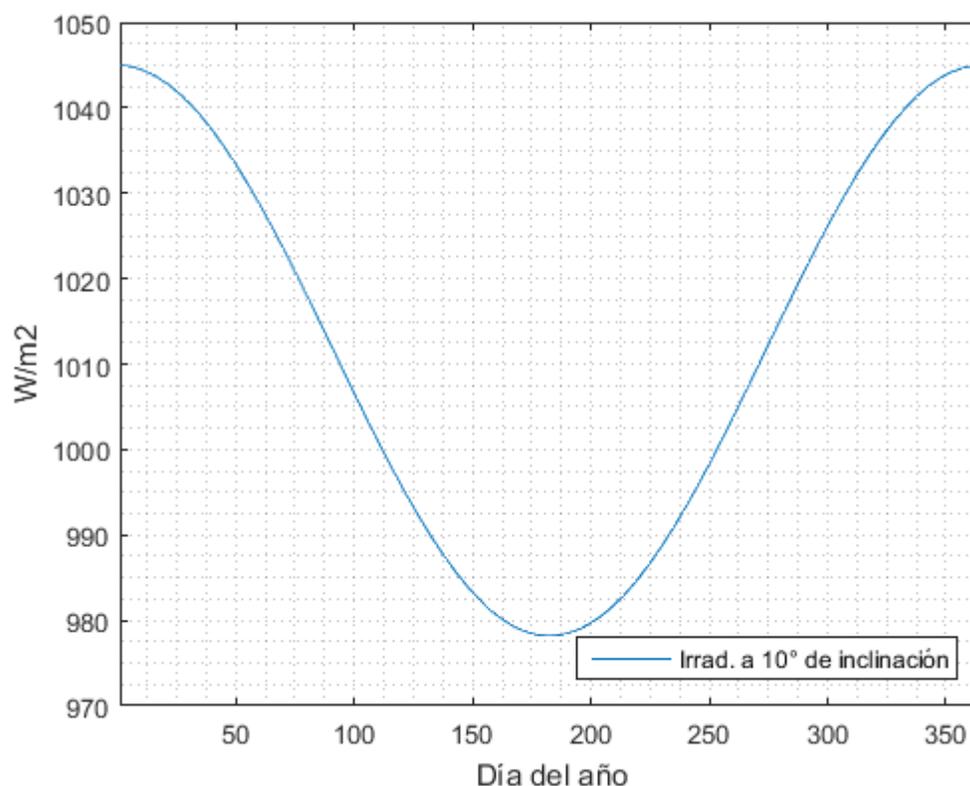


Figura 5. Irradiación solar para el cantón de Sangolquí con inclinación de 10° .

Mediante el modelo planteado por Ångström y luego de corregir el ángulo de inclinación para los colectores se puede obtener una media mensual de la irradiación incidente sobre el plano inclinado, como se puede apreciar en la figura 2.5 para la ciudad de Sangolquí.

2.2 Sistemas de agua caliente sanitaria (ACS)

Los seres humanos para sus actividades de limpieza diaria usan agua caliente, la manera más usual para calentar el agua es por medio del uso de combustibles fósiles o electricidad; sin embargo, una alternativa aun poca usada en el Ecuador es realizar este proceso por medio de colectores solares [11]. Todo sistema que permita obtener agua

caliente sanitaria tiene dos elementos comunes; el tanque de almacenamiento y el sistema de calentamiento de agua.

Los sistemas solares para calentamiento de agua aprovechan la radiación solar en una superficie absorbadora, la cual puede ser un panel solar plano y tubos al vacío, una vez que esta energía es transformada en calor mediante procesos de transferencia de calor y termodinámicos el agua que circula por la superficie absorbadora cambia su estado térmico; incrementando su energía. Toda el agua que ha incrementado su temperatura es almacenada en tanques de almacenamiento y está lista para su uso [3][12].

Los sistemas para calentamiento de agua caliente sanitaria representan en la actualidad la aplicación más frecuente para la energía solar, siendo los pequeños sistemas los más usados para calentar agua en residencias.

Existen dos tipos de sistemas [5]:

- Sistemas de circulación natural.
- Sistema de circulación forzada.

2.2.1 Sistemas de circulación natural

Los sistemas de circulación natural o sistemas solares pasivos son recomendados para ubicaciones en las cuales no hay posibilidad de congelamiento del agua, es decir, donde la temperatura no llega a los 0 °C; estos sistemas se basan en el efecto termosifón [13], [14].

El efecto termosifón utiliza los principios de la convección natural de los fluidos, en la cual los fluidos con mayor temperatura se ubican en la parte superior del reservorio y los de menor temperatura se ubican en la parte inferior.

2.2.2 Sistemas de circulación forzada

Los sistemas de circulación forzada o sistemas solares activos son usados en climas en los cuales se puede tener congelación del agua y para procesos de calefacción industriales comerciales. En estos sistemas mediante el uso de bombas se hace circular el fluido y por medio de esta circulación la temperatura dentro del reservorio se mantiene.

2.2.3 Componentes de un sistema ACS

Un sistema ACS es un conjunto de componentes que tienen como objetivo cambiar el estado térmico del agua para su uso sanitario; es decir, el agua que proviene de la red pública es calentada para que la misma pueda ser usada, los principales componentes de los sistemas ACS se muestran en la figura 2.6 [3], [10].

El captador solar es el elemento que absorbe la energía solar y estos pueden ser paneles solares planos o tubos al vacío, como propiedad propia de los captadores se tiene que deben tener una baja emisividad y una alta absorción.

El acumulador es el elemento en el cual se almacena toda el ACS luego de que cambia su estado térmico en los sistemas de captación solar.

La tubería es por donde circula el agua, la cual está separada en dos etapas, una para agua fría y otra para agua caliente. El agua fría es la que alimenta a todo el proceso mientras que el agua caliente es la que se usa para las actividades humanas limpieza.

En toda instalación para ACS es necesario tener un sistema de respaldo, esto se debe a que los sistemas de captación por diferentes situaciones meteorológicas no van a tener la suficiente energía primaria para llevar el agua a temperatura de confort. Los sistemas de respaldo pueden ser sistemas eléctricos o sistemas a base de combustibles fósiles.

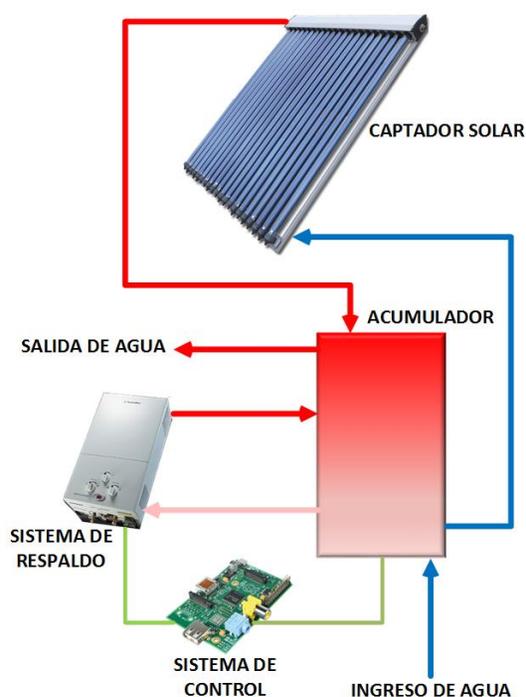


Figura 6. Esquema de un sistema de ACS.

Los equipos de control son los encargados de mantener el sistema de ACS a una temperatura estable y lista para su uso, efectúan un control sobre la temperatura en el acumulador, mediante el uso del sistema de respaldo para compensar la diferencia de temperatura que existe en el acumulador.

2.3 Análisis termodinámico en cilindros verticales para ACS

Para poder realizar los cambios térmicos en un sistema de ACS es fundamental conocer ciertos criterios termodinámicos como la primera y segunda ley de la termodinámica, conducción, convección y radiación entre otros.

2.3.1 Primera ley de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica establece “... *la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; solo puede cambiar de forma*”¹, esta es la ley de conservación de la energía y se la puede considerar como una de las más importantes y fundamentales en ámbito de la termodinámica y la transferencia de calor [15].

La primera ley postula que durante un proceso la energía puede cambiar de una forma a otra permaneciendo constante su cantidad, la primera ley de la termodinámica se puede expresar mediante (2.6) [15].

$$\Delta U = Q + W \quad (2.6)$$

Donde:

ΔU ; es la variación de la energía interna del sistema,

Q; es la cantidad de calor que se aporta al sistema, y;

W; es el trabajo efectuado por el sistema.

2.3.2 Segunda ley de la termodinámica

En la segunda ley de la termodinámica se considera que todo proceso ocurre en una dirección, tiene calidad y cantidad. Afirma que todo proceso térmico ocurre desde un

¹ Y. Cengel and M. Boles, Termodinámica, Séptima Ed. México: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2012.

cuerpo con mayor temperatura a uno con menor temperatura, es decir, ocurren hacia donde se decrecienta la calidad de la energía.

Dado a que un proceso solo ocurre en una sola dirección según esta ley se puede decir que los procesos son irreversibles.

2.3.3 Conducción

La conducción es la transferencia de energía desde un objeto de mayor energía a otro objeto de menor energía [15][16]. La conducción puede ocurrir entre objetos sólidos, líquidos o gaseosos, en estos últimos se produce la conducción cuando sus moléculas chocan entre si durante su movimiento aleatorio.

El principio que rige la conducción de calor es la Ley Fourier (2.7) [15], la cual indica que la conducción de calor en una dirección es proporcional a la gradiente de temperatura en esa misma dirección.

$$Q_{\text{Cond}} = -k_t A \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

Donde:

Q_{Cond} ; es la cantidad de energía transmitida por conducción, en (W);

k_t ; es la conductividad térmica del material, en $\left(\frac{W}{m} * ^\circ K\right)$;

A; es el área normal a la dirección de transferencia de calor, en (m²); y,

$\frac{dT}{dx}$; es la gradiente de temperatura, en (°K).

2.3.4 Convección

La convección es la transferencia de energía entre una sustancia sólida a una líquida adyacente que se encuentra en movimiento [15][16], la convección es la combinación de los efectos de la conducción y de movimiento del fluido, mientras más rápido sea el movimiento del fluido mayor será la energía transferida por convección.

La tasa de transferencia de calor por convección se determina por la Ley de Enfriamiento de Newton (2.8) [15].

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_f) \quad (2.8)$$

Donde:

Q_{conv} ; es la cantidad de energía transmitida por convección, en (W);

h ; es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en $\left(\frac{W}{m^2} * ^\circ K\right)$;

A ; es la superficie en la cual se produce la transferencia de calor, en (m²);

T_s ; es la temperatura de la superficie, en (°K); y,

T_f ; es la temperatura del fluido lejos de la superficie, en (°K).

2.3.5 Radiación

La radiación es la energía que emite un objeto en forma de ondas electromagnéticas, también conocidos como fotones, como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas, a diferencia de la conducción y de la convección en la radiación no es necesario la existencia de un medio físico [15][16].

La tasa máxima de radiación que se puede emitir desde una superficie está determinada por la Ley de Stefan-Boltzmann (2.9) [15], la cual es aplicable a cuerpos negros, un cuerpo negro emite una tasa máxima de radiación y no todos los objetos llegan

a emitir una tasa máxima de radiación, por ello se debe tomar en cuenta la emisividad de cada objeto (2.10).

$$Q_{emitida\ max} = \sigma AT_s^4 \quad (2.9)$$

$$Q_{emitida} = \varepsilon \sigma AT_s^4 \quad (2.10)$$

Donde:

$Q_{emitida\ max}$; es la cantidad máxima de energía transmitida por radiación de un objeto negro, en (W);

$Q_{emitida}$; es la cantidad de energía transferida por radiación por un objeto real, en (W);

ε ; es la emisividad del objeto, es un parámetro adimensional; y,

σ ; es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} * ^\circ K^4$).

De la ley anterior se puede determinar que la tasa de energía transferida por radiación entre dos superficies se determina mediante (2.11).

$$Q_{emitida} = \varepsilon \sigma A(T_s^4 - T_{alrededores}^4) \quad (2.11)$$

Donde:

$T_{alrededores}$, es la temperatura en los alrededores del objeto radiante, en ($^\circ K$).

2.4 Almacenamiento de energía en sistemas solares

Debido a la periodicidad de la energía solar sobre la superficie terrestre es necesario almacenar la energía una vez transformada, para que sea utilizada en los instantes en los cuales no exista radiación solar.

En el caso de que se le haya transformado la radiación solar a energía eléctrica mediante la utilización de paneles fotovoltaicos, la manera como se almacena la dicha

energía sería mediante su conversión en energía química por medio del uso de un banco de baterías.

Por otra parte, sí se utilizó la radiación solar para realizar el calentamiento fluidos, se requerirían tanques de almacenamiento, los cuales deben estar correctamente aislados para evitar que las pérdidas por convección y radiación sean muy altas en relación a la cantidad de energía almacenada.

En este contexto, el almacenamiento de energía es un proceso indispensable y necesario para cualquier aplicación de energía solar. Es pertinente recalcar que todo proceso de transformación de energía produce un decremento en la eficiencia del sistema global [5].

El almacenamiento de energía térmica en sistemas solares se los puede clasificar en: almacenamiento por calor sensible, por calor latente y de energía termo-química.

2.4.1 Almacenamiento por calor sensible

El calor sensible es aquel que no modifica la estructura ni estado de un objeto al cambiar de estado térmico el mismo, en otras palabras, mediante el almacenamiento por calor sensible, se logra al transferir la temperatura de un objeto a otro que cumplirá las veces de acumulador sin que éste cambie sus propiedades físicas [3][16].

Los materiales que se usan con mayor frecuencia para éste tipo de almacenamiento son: agua, aceites orgánicos, rocas y sales fundidas.

El calor sensible se lo puede cuantificar por medio de (2.12):

$$Q_s = \int_{T_1}^{T_2} mC_p dT \quad (2.12)$$

Dónde:

Q_s ; es el calor sensible, en (kJ),

m ; es la masa del material, en (kg),

C_p ; es el calor específico del material, en $\left(\frac{kJ}{kg} * ^\circ C\right)$;

dT ; es la diferencial de temperatura, en ($^\circ C$).

El almacenamiento por calor sensible se lo utiliza por lo general en sistemas de baja entalpía y es el más recomendado para sistemas residenciales [15].

2.4.2 Almacenamiento por calor latente

El calor latente representa la energía necesaria para modificar la estructura o fase de un objeto como consecuencia de un cambio en su de estado térmico, la energía térmica del proceso se la usa para el cambio de estado mas no para un cambio de temperatura [3], [5], [16].

La fase de un objeto representa el estado de agregación del mismo, las fases de un objeto pueden ser cuatro: sólido, líquido, gaseoso y plasmático; mientras que los cambios de fase son tres: sólido a líquido y viceversa, sólido a vapor y viceversa y líquido a vapor y viceversa.

El calor latente se lo puede cuantificar por medio de (2.13).

$$Q_L = \int_{T_1}^{T_m} mC_p dT + m\lambda + \int_{T_m}^{T_2} mC_p dT \quad (2.13)$$

Dónde:

Q_L ; es el calor latente, en $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$;

λ ; es el calor para cambio de estado, en $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$.

Los materiales más comunes usados para este tipo de almacenamiento son: ceras de parafinas, sales inorgánicas y mezclas de compuestos orgánicos e inorgánicos [16].

2.4.3 Almacenamiento de energía termo-química

Se basa en las reacciones químicas reversibles que producen calor. En esta forma de almacenamiento, dado a que las reacciones son reversibles, se producen dos tipos de reacción, endotérmica cuando se almacena calor y exotérmica cuando se libera calor [3][5].

Las reacciones químicas son procesos de muy alta energía por lo que grandes cantidades de energía se puede almacenar en pequeñas cantidades de material. El calor que se produce en una reacción química se lo se lo puede cuantificar por medio de (2.14).

$$Q_{tq} = a_r m \Delta H \quad (2.14)$$

Dónde:

Q_{tq} ; es el calor almacenado en la reacción química,

a_r ; es la fracción de la reacción, y;

ΔH ; es la variación de calor de la reacción por unidad de masa.

2.5 Efecto termosifón

Los sistemas de calentamiento de agua basados en la circulación natural o también conocidos como sistemas solares pasivos utilizan el efecto termosifón, el cual es un efecto que se produce al calentar el fluido [17][18].

Se sabe que una sustancia al ser calentada cambia de densidad y tienen una dilatación volumétrica, este cambio de densidad produce una ubicación de las moléculas que tengan más temperatura sobre las moléculas con menor temperatura.

El cambio de temperatura produce un movimiento del fluido en el interior del tanque de almacenamiento, lo cual se debe al efecto de la convección natural que se produce en el interior del tanque. El efecto termosifón forma un lazo continuo de circulación del fluido desde los colectores hasta el tanque de almacenamiento.

La velocidad de movimiento del fluido debido al efecto termosifón se puede deducir de la expresión (2.15) y (2.16) [5][19].

$$\Delta P_{Fluido} = \oint_{lazo} \rho dh_L \quad (2.15)$$

$$h_L = KV^2 \quad (2.16)$$

Dónde:

ΔP_{Fluido} ; es la presión de arrastre del fluido,

ρ ; es la densidad del fluido,

d ; es la distancia en la cual se realiza el análisis,

K ; es la suma de los factores de pérdidas de velocidad en los componentes, y;

V ; es la velocidad del flujo.

CAPÍTULO 3

MODELOS DE ESTRATIFICACIÓN

Todo proceso en el que se almacene volúmenes de fluidos tiende a crear capas horizontales de diferentes temperaturas, es así que la atmósfera terrestre estratifica el aire contenida en ella, el aire caliente tiende a ubicarse en la parte superior de la misma y el aire frío se coloca en la parte inferior. Este fenómeno fue observado y aprovechado por las primeras personas en usar globos aerostáticos.

El mismo fenómeno ocurre en el interior de los tanques de almacenamiento de ACS en los cuales se sabe que el agua con mayor temperatura se ubica en la parte superior del mismo [20].

Por la complejidad del análisis numérico de la estratificación de temperatura en los tanques de almacenamiento se hace imposible efectuarla de manera manual y por ello es necesario el uso de métodos informáticos para su desarrollo, los modelos de estratificación más usuales son los siguientes: Modelo Ideal, Modelo Multinodo y Modelo de Flujo de pistón.

En todos los modelos antes mencionados hay que tomar en cuenta las características propias del tanque acumulador, características como: Tamaño, Ubicación de la entrada y salidas de agua, tanto fría como caliente y Caudales de ingreso y salida de agua.

3.1 Análisis de pérdidas en los tanques de almacenamiento

Todo proceso en el que incurren cambios de temperatura se debe analizar todas las variables del proceso, eso quiere decir; que se deben tomar en cuenta las pérdidas.

Por ello en los sistemas de acumulación para sistemas de ACS se deben considerar las pérdidas que existen a través de las paredes del tanque.

3.1.1 Tanque de almacenamiento ideal

Un tanque de almacenamiento ideal es aquel en el cual las pérdidas en la transferencia de calor o las causadas por la fricción del fluido son nulas [21], es decir, el calor a través de las paredes del tanque es cero, lo cual podemos verificar mediante (3.1) [22], en la cual si asumimos que el valor de la tasa de calor perdido es cero, se tiene un calor a través de las paredes también igual a cero.

$$Q_T = A_T * Q_p * k * \Delta T \quad (3.1)$$

Donde:

Q_T ; es el calor a través de las paredes del tanque de almacenamiento;

A_T ; es la superficie total del cuerpo del tanque;

Q_p ; es la tasa de calor perdido;

k ; es el factor de corrección por efecto del aislamiento; y,

ΔT ; es la variación de temperatura a mantener dentro del tanque de almacenamiento.

3.1.2 Tanque de almacenamiento real

Un tanque de almacenamiento en sus procesos de transferencia de calor puede producir los siguientes tipos de pérdidas: Pérdidas termodinámicas debidas a la irreversibilidad de la transferencia de calor, Pérdidas a la salida y/o ingreso del fluido, Pérdidas en el almacenamiento debido a la gradiente térmica durante el periodo de carga y descarga del fluido y Pérdidas por presión debido a la fricción del fluido.

Hay que considerar que las principales pérdidas que se produce en un tanque de almacenamiento se las tiene en las paredes del mismo [22], [23].

En la figura 3.1 se puede apreciar la estructura de un tanque de almacenamiento, en donde entre las paredes internas y las externas se tiene un material aislante el cual ayuda a reducir las pérdidas térmicas y el calor residual en el interior se puede calcular mediante (3.2) [15], [16].

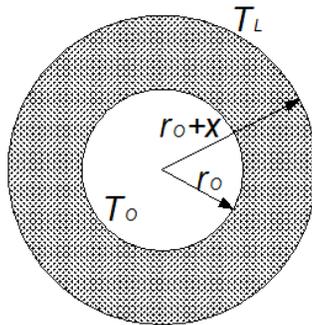


Figura 7. Estructura de un tanque de almacenamiento

$$Q = \frac{2*\pi*L}{\ln\left(\frac{r_o+x}{r_o}\right)} * k * (T_o - T_L) \quad (3.2)$$

Donde:

Q ; es el calor en el interior del tanque de almacenamiento;

L ; es la longitud del tanque de almacenamiento;

r_o ; es el radio interno del tanque de almacenamiento;

x ; es el espesor del aislamiento;

k ; es el factor de corrección por efecto del aislamiento;

T_o ; es la temperatura en el interior del tanque de almacenamiento; y,

T_L ; es la temperatura en el exterior del tanque de almacenamiento.

El aislamiento entre las paredes puede ser de diferentes materiales, el cual va a afectar directamente al calor existente en las paredes del tanque de almacenamiento, el valor del factor de corrección de (3.1) se puede apreciar en la tabla 3.1.

Tabla 3

Factor de ajuste de aislamientos comerciales

Material	k
Fibra de vidrio (ASTM C547)	1,00
Silicato de calcio (ASTM C533)	1,48
Vidrio celular (ASTM C552)	1,48
Uretano celular rígido (ASTM C591)	0,64
Espuma de elastómero (ASTM C534)	1,16
Fibra mineral (ASTM C553)	1,16
Perlita expandida (ASTM C610)	1,90

3.1.3 Modelo matemático

Para poder modelar matemáticamente el comportamiento del tanque de almacenamiento considerando las pérdidas térmicas se debe partir del análisis de todo el sistema de ACS, como se puede apreciar en la figura 3.2 [18], [24].

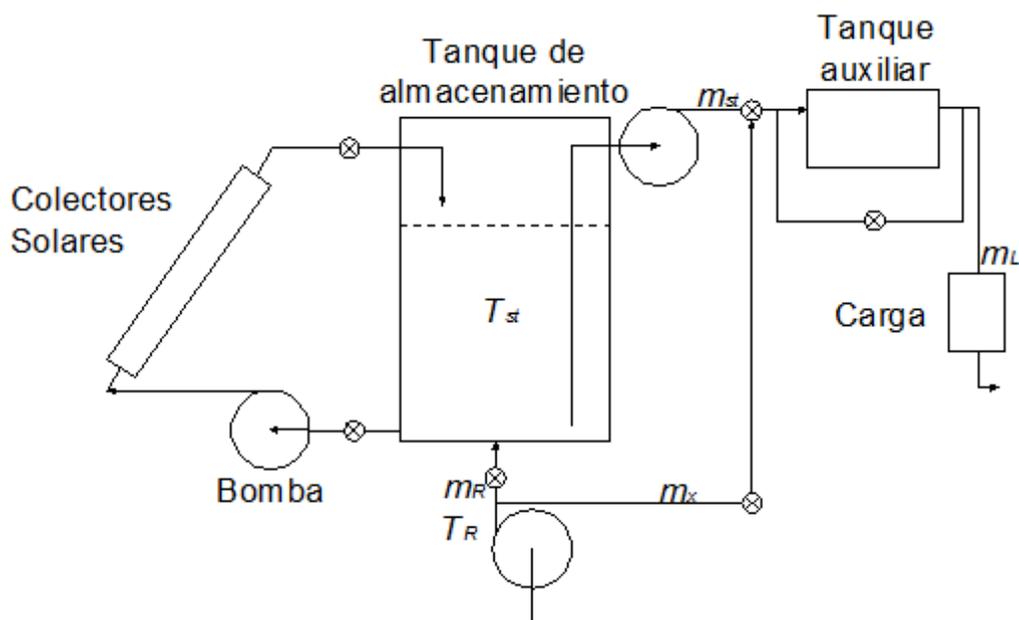


Figura 8. Esquema de sistema de calentamiento solar.

El análisis inicia considerando temperatura en el interior del tanque de almacenamiento, la cual influye directamente en su tamaño y desempeño, nos ayuda en encontrar el balance energético en el interior; el cual puede ser expresado por (3.3).

$$(\rho * C_p * V) \frac{dT_{st}}{dt} = q_s - q_{Ls} - q_{stl} \quad (3.3)$$

Donde:

ρ ; es la densidad del fluido;

C_p ; es el calor específico del fluido;

V ; es el volumen del tanque de almacenamiento;

$\frac{dT_{st}}{dt}$; es el cambio de temperatura en el interior del tanque en el transcurso del tiempo;

q_s ; es la ganancia de calor útil;

q_{Ls} ; la energía solar inyectada cuando la demanda supera al almacenamiento; y,

q_{stl} ; es la pérdida de calor del tanque de almacenamiento.

La pérdida de calor del tanque de almacenamiento puede ser expresada mediante (3.4) [24].

$$q_{stl} = U_{st} * A_{st} * (T_{st} - T_a) \quad (3.4)$$

Donde;

U_{st} ; es el coeficiente de pérdida de calor en $\frac{W}{m^2 * ^\circ C}$;

A_{st} ; es el área de la superficie del tanque de almacenamiento;

T_{st} ; es la temperatura en el interior del tanque de almacenamiento; y,

T_a ; es la temperatura ambiente.

La ganancia de calor solar útil es expresada mediante (3.5) [18], [3]; que no es más que la ecuación de Hottel-Whillier-Bliss.

$$q_s = A_c * [H * F_R * (\tau * \alpha) - F_R * U_L * (T_{st} * T_a)] \quad (3.5)$$

Donde;

A_c ; es el área de los colectores solares;

H ; es la irradiación solar;

U_L ; es el coeficiente de pérdida de calor en los colectores en $\frac{W}{m^2 * ^\circ C}$;

τ ; es la transmitancia de los colectores;

α ; es la absortancia de los colectores; y,

F_R ; es el factor de eliminación del calor de los colectores.

Para cuantificar la energía solar inyectada cuando la demanda supera al almacenamiento se puede usar (3.6) y la energía añadida al tanque de almacenamiento durante la recarga de agua se la puede encontrar mediante (3.7).

$$q_{LS} = m_{st} * C_p * T_{sti} \quad (3.6)$$

$$q_R = m_R * C_p * T_R \quad (3.7)$$

Donde;

m_{st} ; es la masa de agua en el tanque de almacenamiento;

T_{sti} ; es la temperatura inicial en el tanque de almacenamiento;

m_R ; es la masa de agua que ingresa al tanque de almacenamiento; y,

T_R ; es la temperatura del agua que ingresa al tanque de almacenamiento.

Debido a la existencia de pérdidas en el proceso de almacenamiento de calor desde los colectores solares hasta el tanque de almacenamiento se debe considerar la diferencia entre el volumen inicial y el final en intervalos de tiempo reducidos, esto se puede analizar mediante (3.8).

$$V_{stf} = V_{sti} + \frac{1}{\rho} * (m_R * \Delta t - m_{st} * \Delta t) \quad (3.8)$$

Donde;

V_{stf} ; es el volumen final;

V_{sti} ; es el volumen inicial; y,

Δt ; es el intervalo de tiempo.

Una vez que se conoce todos los parámetros que intervienen en el almacenamiento de agua se puede determinar una temperatura promedio de salida del agua hacia la carga, ella se la puede cuantificar mediante (3.9) [24].

$$T_{stf} = \frac{\rho * V_{sti} * T_{sti} + \frac{\Delta t}{C_p} [q_s - q_{LS} - m_{st} * C_p * T_{sti} + m_R * C_p * T_R]}{\rho * V_{sti} + (m_R * \Delta t - m_{st} * \Delta t)} \quad (3.9)$$

3.2 Estratificación de temperatura

La estratificación de temperatura es el proceso en la cual las masas de los fluidos se ubican en diferente posición en función de la temperatura y por ende de la densidad del fluido, los fluidos con menor densidad van a la parte superior y los de mayor densidad en la parte inferior. Teniendo así al fluido con mayor temperatura en la parte superior y el de menor en la parte inferior del reservorio.

En la naturaleza las principales aplicaciones de la estratificación de temperatura se encuentran en la generación de vientos y en la generación de las corrientes marinas. Esto se logra por la generación de tres (3) capas llamadas (ver figura 3.3):

- Epilimnion: La zona superior de temperatura más elevada.
- Metalimnion: La zona intermedia de transición entre la zona superior más caliente y la inferior más fría.

- Hipolimnion: La zona profunda de temperatura más fría.

La estructura térmica de un reservorio es controlado por diversos procesos, en los cuales se puede incluir la radiación solar, el viento y las corrientes formadas por la convección natural [25].

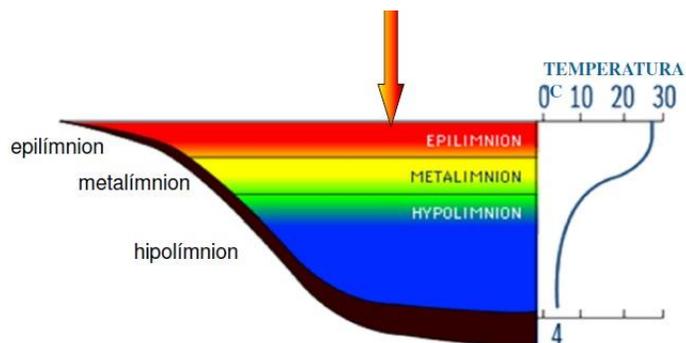


Figura 9. Estratificación de temperatura en un reservorio natural de agua.

El efecto de la estratificación ha sido observado y aprovechado para los sistemas de ACS [26], en especial en las aplicaciones solares.

Es importante saber diferenciar entre tanques completamente estratificados y tanques completamente mezclados en las consideraciones de los sistemas solares para ACS, con lo que se puede mejorar la eficiencia de del sistema de almacenamiento.

3.2.1 Número de Biot

Es una constante adimensional que es usada en los análisis de transferencia de calor. El número de Biot relaciona la transferencia de calor por conducción y convección de un cuerpo y se la puede encontrar mediante (3.10) [27].

$$Bi = \frac{h*L}{k} \quad (3.10)$$

Donde;

Bi ; es el número de Biot;

h , es el coeficiente de transferencia de calor superficial (coeficiente de película);

L ; es la longitud característica; y,

k ; es la conductividad térmica del cuerpo.

Mediante el uso de número de Biot se puede determinar la estratificación de temperatura de un reservorio, a mayor nivel de estratificación mayor será el número de Biot; esto se puede encontrar mediante.

3.3 Modelo ideal

La estratificación de temperatura dentro un tanque reservorio parte de la idea de un tanque ideal, en el cual se considera que la temperatura en el interior del tanque es uniforme; es decir; se tiene una mezcla completa del agua sin estratificar su temperatura, cuyo comportamiento está definido por (3.11) [3].

$$Q_s = m * Cp * \Delta T_s \quad (3.11)$$

Donde:

Q_s ; es la capacidad de calor total en un ciclo de operación;

m ; es la masa de agua en el interior del tanque;

Cp ; es el poder calorífico del agua; y,

ΔT_s ; es rango de temperatura del tanque reservorio.

Todo sistema tiene un balance energético, para el caso de la figura 3.4; el cual muestra un modelo no estratificado de temperatura de un sistema de ACS, el balance energético está definido por (3.12).



Figura 10. Modelo de tanque de almacenamiento ideal (No estratificado).

$$m * Cp * \frac{dT_s}{dt} = Q_u - \dot{L}_s - U * A * (T_s - T'_a) \quad (3.12)$$

Donde:

Q_u ; es la adición o remoción de energía desde los colectores;

\dot{L}_s ; es la adición o remoción de energía por la carga;

T'_a ; es la temperatura ambiente;

U ; es el coeficiente de transferencia de calor del reservorio; y,

A ; es la superficie del tanque de almacenamiento.

Resolviendo la ecuación diferencial indicada en (3.12) se obtiene (3.13), en la cual se tiene la tasa de cambio de temperatura en el transcurso del tiempo.

$$T_{sf} = T_{si} + \frac{\Delta t}{m * Cp} * [Q_u - \dot{L}_s - U * A * (T_s - T'_a)] \quad (3.13)$$

Donde:

T_{si} ; es la temperatura inicial en el interior del reservorio antes de considerar las pérdidas;

T_{sf} ; es la temperatura final en el interior del reservorio luego de un intervalo de tiempo y considerando las pérdidas; y,

Δt , es el intervalo de tiempo en el cual se efectúa el análisis.

3.4 Modelo multinodal

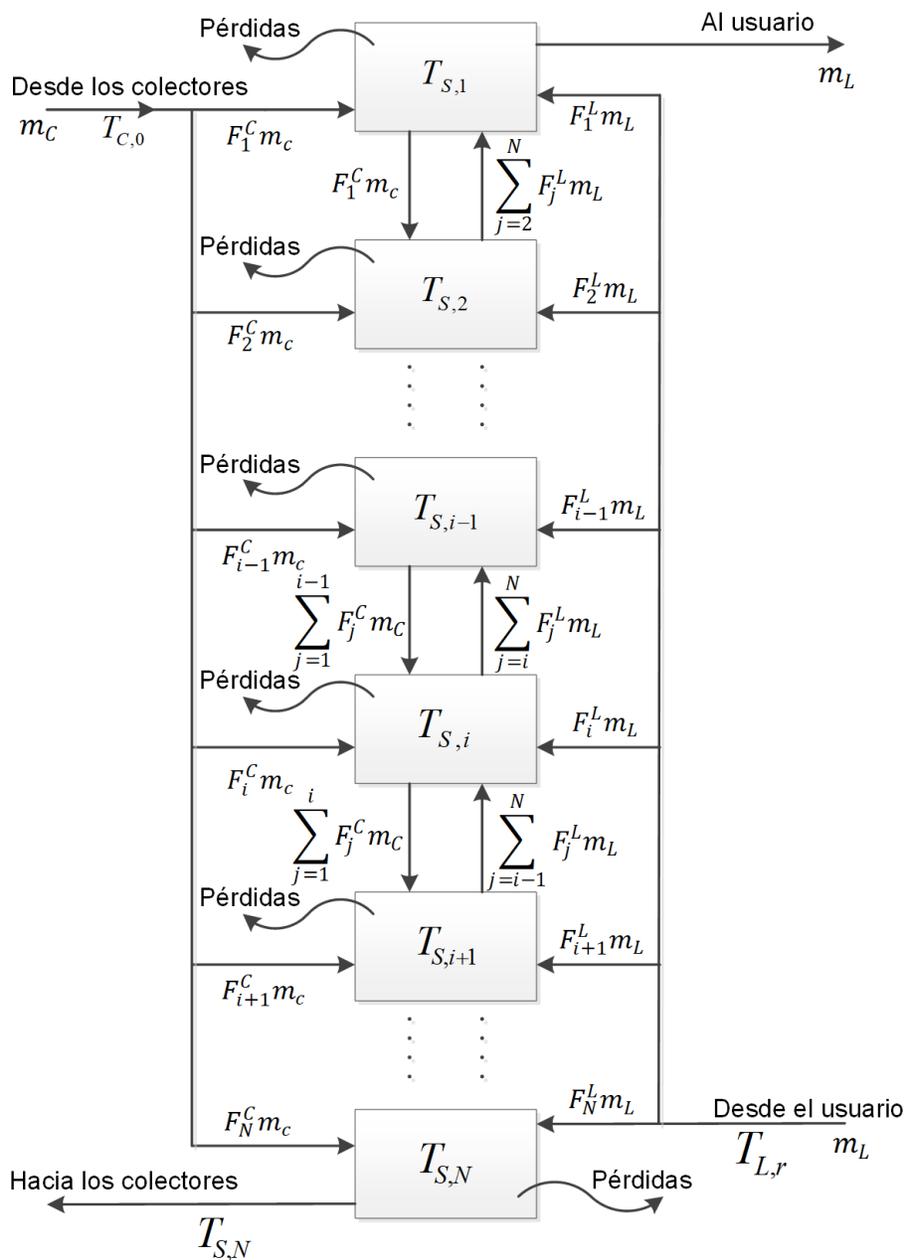


Figura 11. Modelo de tanque de almacenamiento multinodal (Estratificado).

El modelo multinodal supone que el tanque de almacenamiento se divide en n partes de igual dimensión, llamadas nodos; donde cada nodo tiene un balance de energía

propio de su ubicación, es decir; cada nodo tiene una temperatura diferente a sus nodos predecesor y consecuente [28].

Para poder realizar la formulación matemática de un modelo multinodal es necesario realizar ciertas presunciones tales como la posición y diseño del ingreso y salida de agua, tamaño y ubicación del tanque; y el flujo de entrada y salida. Así como la distribución del ingreso del agua a cada uno de los nodos y también es importante considerar las necesidades de la carga, es decir; su uso final.

Por ejemplo, si en la carga se requiere únicamente conservar la eficiencia sin tener en cuenta la temperatura, la mejor estratificación para este caso se lo encuentra en el fondo del tanque en la cual la temperatura es la baja.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Como caso de estudio se analiza el tanque de almacenamiento que se dispone en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas, cuyas dimensiones son de 50 cm de alto y un diámetro de 50 cm, cuyo volumen es de 0.01 m³ y sus paredes no poseen aislamiento,

Como primera instancia se parte de la verificación de datos experimentales para lo cual se requiere tener los datos de radiación solar, temperatura de ingreso de agua al colector solar plano, temperatura de ingreso al tanque de almacenamiento y temperatura ambiente.

Como supuesto inicial se considera o presume que el tamaño de todos los nodos es de 5 [cm], es decir, se tiene una simetría en cuanto a los nodos a ser verificados en el experimento y con ello se realiza un diagrama del comportamiento de la temperatura a lo largo del tanque vertical.

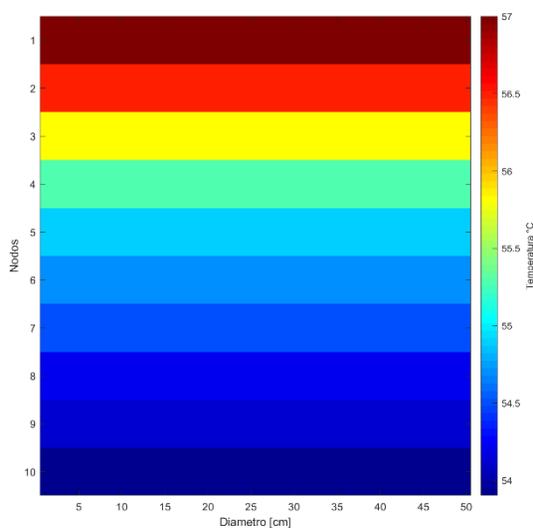


Figura 12. Estratificación de temperatura medidas

En la figura 4.1 y tabla 4.1 se puede observar que la temperatura en el interior del tanque se encuentra completamente estratificada pero la misma depende de la temperatura que los colectores solares tengan a su salida, es por ello que para poder aplicar la metodología propuesta lo primero que se realiza es la modelación de los colectores solares planos.

Tabla 4

Temperatura en el interior del tanque vertical dividida por nodos

Nodo	T °C
Nodo 1	57,0
Nodo 2	56,5
Nodo 3	55,8
Nodo 4	55,3
Nodo 5	54,9
Nodo 6	54,7
Nodo 7	54,5
Nodo 8	54,2
Nodo 9	54,1
Nodo 10	53,9

4.1. Modelo matemático colector solar plano

Se parte de las ecuaciones (3.3) a la (3.9) con las cuales se logra determinar las condiciones térmicas del proceso de conversión de energía solar a energía térmica; se parte de las condiciones de diseño de un colector solar plano especificado por los estándares cuyos valores de absortancia y reflectancia no superan el $\pm 5\%$ de tolerancia.

Considerando lo anteriormente expuesto el modelo matemático del colector solar se detalla por medio de las ecuaciones (4.1) a la (4.10) [29].

En la figura 4.2 se encuentra una comparación al aplicar el modelo propuesto vs las mediciones reales, cuyos valores se muestran en la tabla 4.2. Se puede apreciar que

el modelo propuesto tiene logra simular o emular casi de manera idéntica lo obtenido en la experimentación.

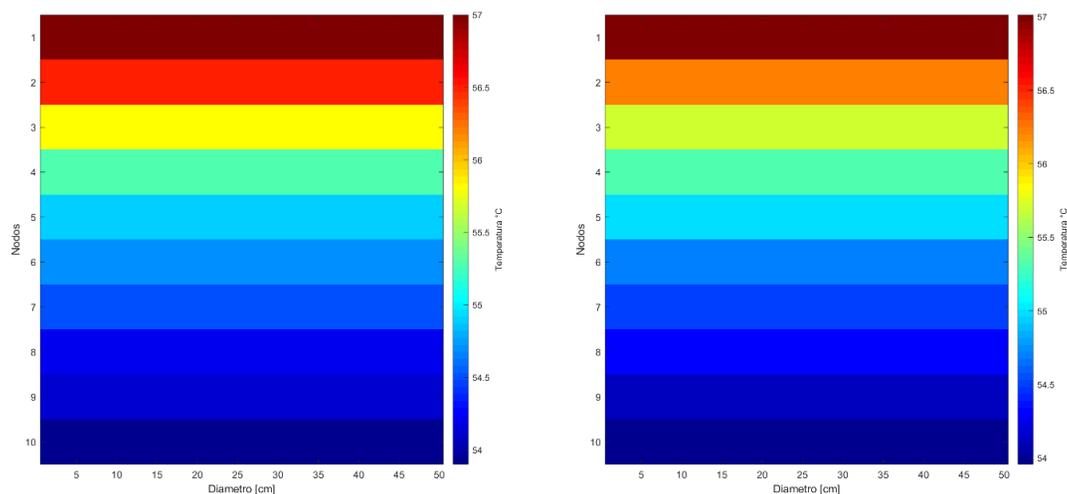


Figura 13. Comparación entre las medidas reales y el modelo propuesto

Tabla 5

Temperatura real y modelada en el interior de un tanque vertical

Nodo	Experimento	Modelo
	T °C	T °C
Nodo 1	57,0	57,0129
Nodo 2	56,5	56,2205
Nodo 3	55,8	55,6923
Nodo 4	55,3	55,2961
Nodo 5	54,9	54,9791
Nodo 6	54,7	54,715
Nodo 7	54,5	54,4886
Nodo 8	54,2	54,2905
Nodo 9	54,1	54,1144
Nodo 10	53,9	53,9559

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{G_s}{V} * \frac{y(1 - E_s)(1 - E_{cs})}{(1 - y * E_s) - (1 - y) * E_s * E_{cs}} (\theta - t_E) \quad (4.1)$$

$$t_E = \frac{\alpha\tau}{k_{CS}} * I + t_e \quad (4.2)$$

$$E_{CS} = e^{-\left(\frac{F*k_{CS}*S_{CS}}{G_p*\rho*c}\right)} \quad (4.3)$$

$$E_S = e^{-NTU_s(1-y)} \quad (4.4)$$

$$NTU_s = \frac{k_s * S}{G_p * \rho * c} \quad (4.5)$$

$$y = \frac{G_p}{G_s} \quad (4.6)$$

$$t_{TP} = \frac{(1 - E_S)E_{CS}}{(1 - y * E_S) - (1 - y) * E_S * E_{CS}} \theta + \frac{(1 - y * E_S)(1 - E_{CS})}{(1 - y * E_S) - (1 - y) * E_S * E_{CS}} t_E \quad (4.7)$$

$$t_{RP} = \frac{(1 - E_S)}{(1 - y * E_S) - (1 - y) * E_S * E_{CS}} \theta + \frac{(1 - y) + (1 - E_{CS})E_S}{(1 - y * E_S) - (1 - y) * E_S * E_{CS}} t_E \quad (4.8)$$

$$t_{TS} = \frac{(1 - y) + (1 - E_S)E_{CS}}{(1 - y * E_S) - (1 - y) * E_S * E_{CS}} \theta + \frac{(1 - E_S)(1 - E_{CS})y}{(1 - y * E_S) - (1 - y) * E_S * E_{CS}} t_E \quad (4.9)$$

$$Q(\tau) = G_s * \rho * c * (t_{TS} - \theta) \quad (4.10)$$

Una vez que se dispone de una modelo que permite determinar la temperatura se debe determinar la cantidad de nodos del sistema, para lo cual se plantea un función de optimización la cual se fundamente en la relación del cambio energético de Parseval de un nodo a otro, la relación de Parseval demuestra que la energía total de una señal

basado en sus armónicos. La función de optimización se encuentra detallada por las ecuaciones (4.11) a (4.13).

F.O.

$$\min D = \sum_{i=1}^n d_i * X_i \quad (4.11)$$

s.a.

$$0\% < X_i < 5\% \quad (4.12)$$

$$X = \frac{1}{X_i} \int f(X_i(t)) dt \quad (4.13)$$

En la figura 4.3 se puede apreciar el resultado de la optimización, y en vez de tener 10 nodos a lo largo del tanque se obtiene 48 nodos de diferente tamaño.

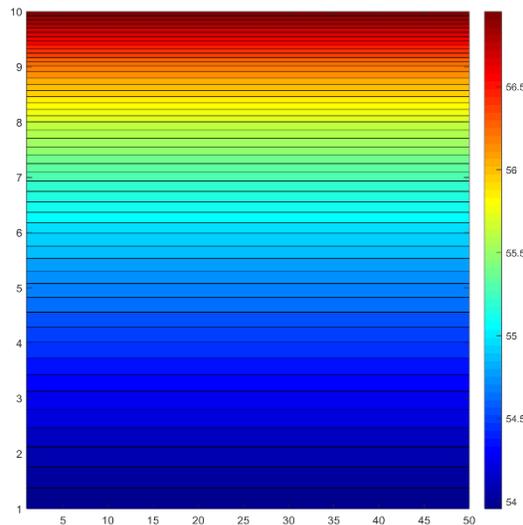


Figura 14. Optimización de la energía en cada nodo

4.2. Heurística

Todas las modelaciones hasta el momento han sido realizadas en estado estacionario, pero el comportamiento de la temperatura de un tanque de almacenamiento

depende del comportamiento dinámico; eso quiere decir que se debe considerar la variación de la radiación solar y la necesidad de agua caliente sanitaria por parte del usuario con lo cual se va a tener fluctuación de la temperatura a lo largo del día, para lograr este análisis se plantea el algoritmo 1, el cual representa a la heurística propuesta para determinar la estratificación de temperatura en tanques verticales de almacenamiento.

Algoritmo 1: Estratificación de temperatura en tanques de almacenamiento vertical

Paso 1: Ingreso de datos

Radiación solar

Temperaturas (Ambiente, ingreso de agua)

Paso 2: Optimización de los nodos

$$\min D = \sum_{i=1}^n d_i * X_i$$

Paso 3: Determinación de las necesidades de ACS

Paso 4: Determinación de la temperatura en el interior del tanque vertical

For: i=1:n; con n = horas del día

$$t_{TS} = \frac{(1 - y) + (1 - E_s)E_{cs}}{(1 - y * E_s) - (1 - y) * E_s * E_{cs}} \theta + \frac{(1 - E_s)(1 - E_{cs})y}{(1 - y * E_s) - (1 - y) * E_s * E_{cs}} t_E$$

$$Q(\tau) = G_s * \rho * c * (t_{TS} - \theta)$$

End

Paso 5: Mostrar resultados de la estratificación

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como primer caso de estudio se toma un día sin nubosidad y se aplica el algoritmo 1, con el cual se logra tener las fluctuaciones de temperatura de ingreso hacia el tanque de almacenamiento a lo largo del día como se lo puede apreciar en la figura 5.1.

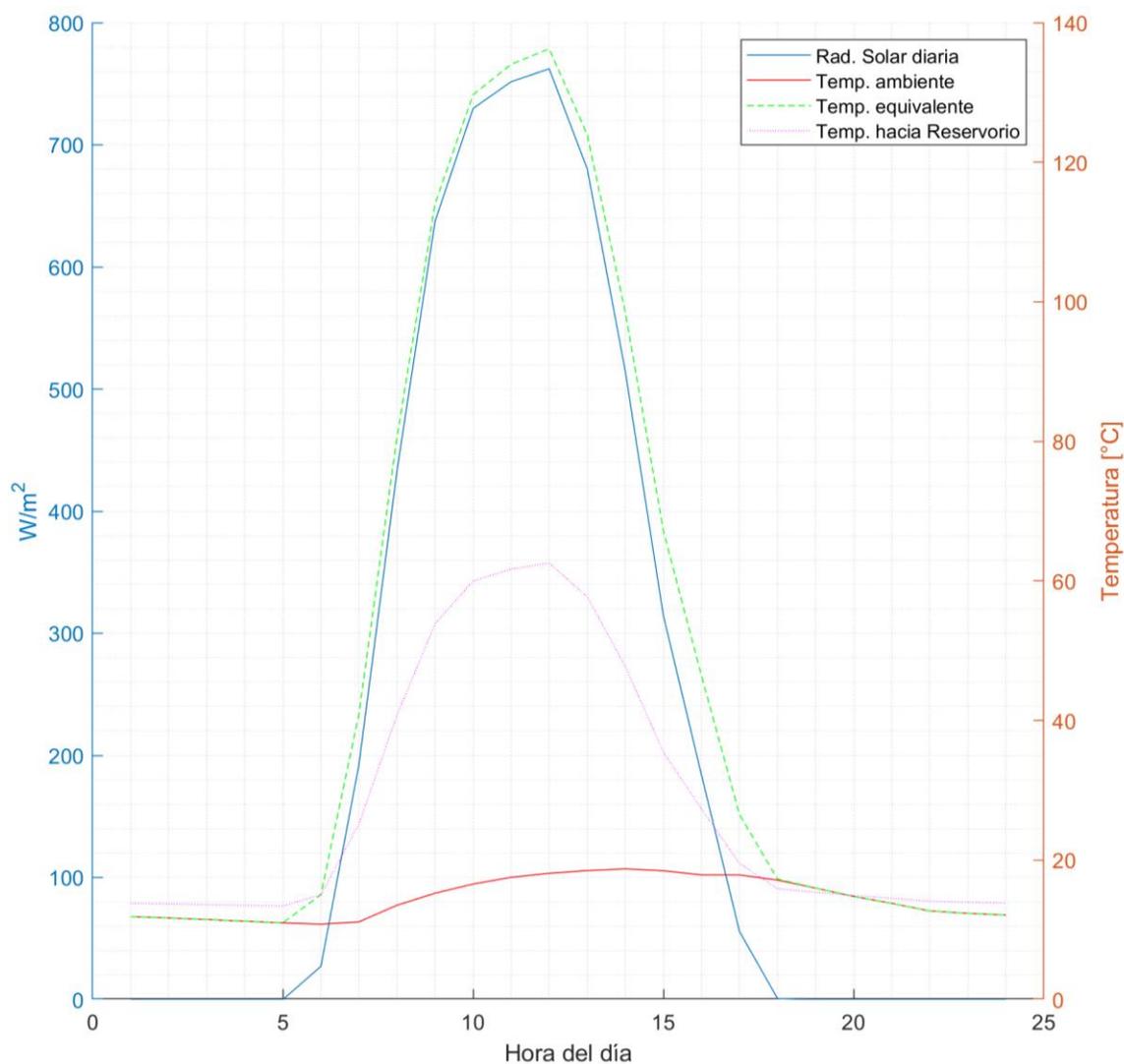


Figura 15. Temperatura en función del cambio de radiación solar

En la figura 5.1 se puede apreciar que la temperatura equivalente que es la que representa la conversión de energía solar a térmica tienen exactamente la misma forma, así mismo la temperatura que va hacia los tanques de almacenamiento tienen la misma forma; por lo que se puede decir que la temperatura hacia el reservorio es directamente proporcional a la radiación solar.

A continuación se modela que el ingreso de agua caliente se lo realiza por la esquina superior izquierda y la salida del mismo por esquina inferior derecha, con lo que se logra determinar que la estratificación de temperatura no solo es horizontal sino que también es vertical, esto se debe a que dentro del tanque de almacenamiento se produce una convección forzada y el movimiento del agua en el interior del reservorio genera una estratificación global dentro del tanque (Ver figura 5.2).

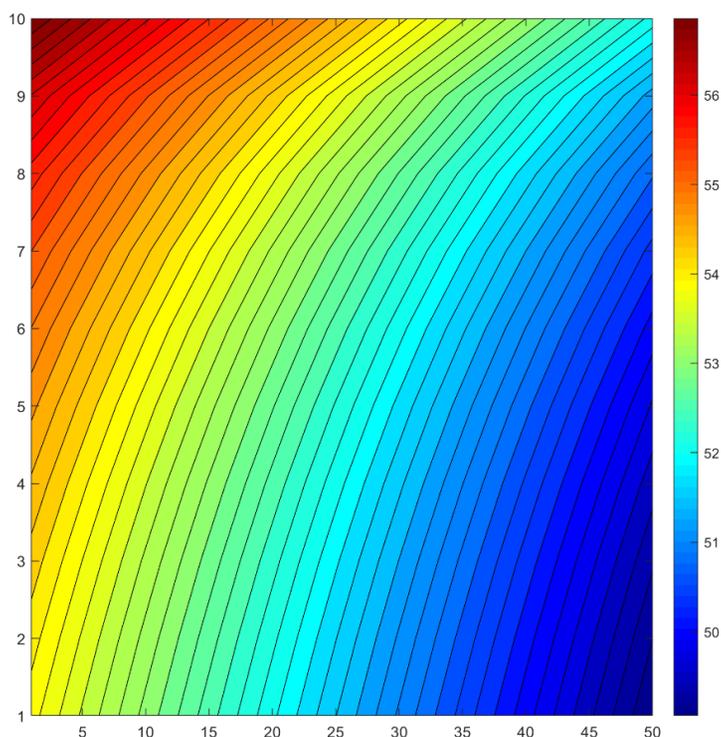


Figura 16. Estratificación de temperatura considerando ingreso y salida de ACS

Si se considera que el ingreso y salida de agua son por el centro de la parte superior e inferior respectivamente se puede observar que existe una mejora en cuanto a la función de conservación de temperatura, como se lo puede apreciar en la figura 5.3. La temperatura en el punto de salida es de aproximadamente 54 °C, que es mayor en comparación de la posición anterior que era de aproximadamente 50 °C.

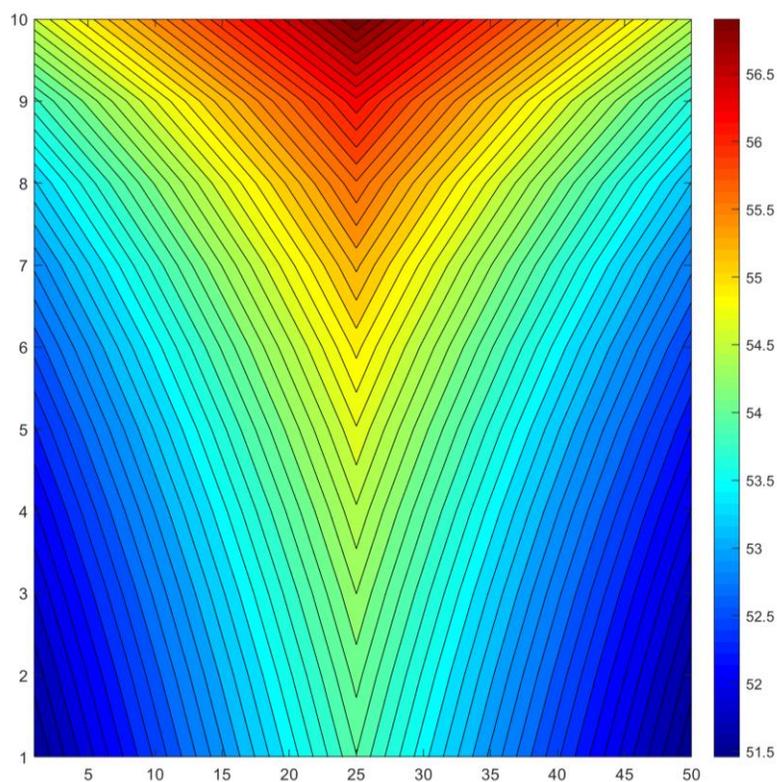


Figura 17. Estratificación con ingreso y salida de agua en el centro

Otra de las variables que es determinante en el desempeño de la estratificación de temperaturas en el interior de tanques de almacenamiento vertical es el tipo de aislamiento que se dispone en las paredes, que aunque que el modelo de Parseval limita a las pérdidas no superen el 5% se puede tener mayores pérdidas por malos aislamientos, en las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 se aprecia lo expuesto; verificando que cuando

un tanque no tiene aislamiento las pérdidas aumentan sustancialmente superando el 5% limitado en el modelo.

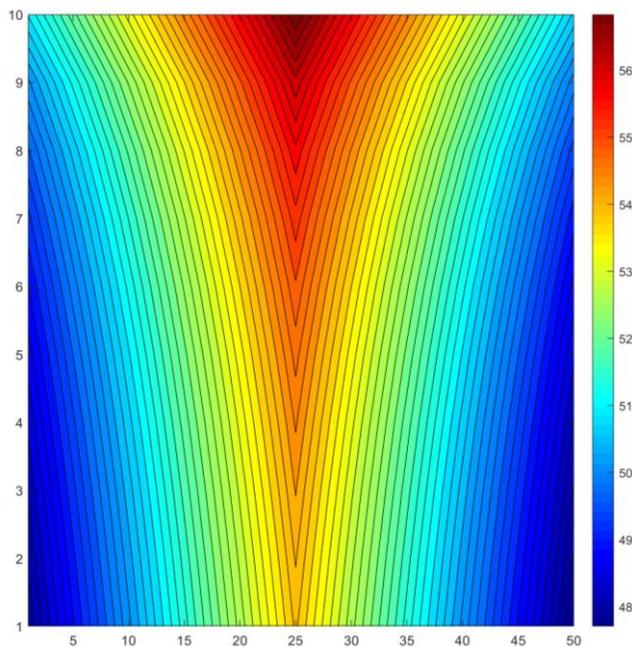


Figura 18. Estratificación con aislamiento de fibra mineral

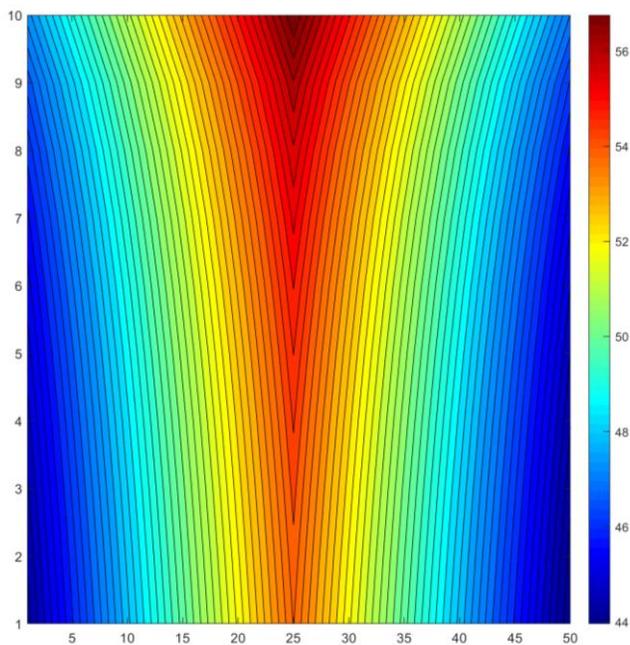


Figura 19. Estratificación con aislamiento de fibra de vidrio

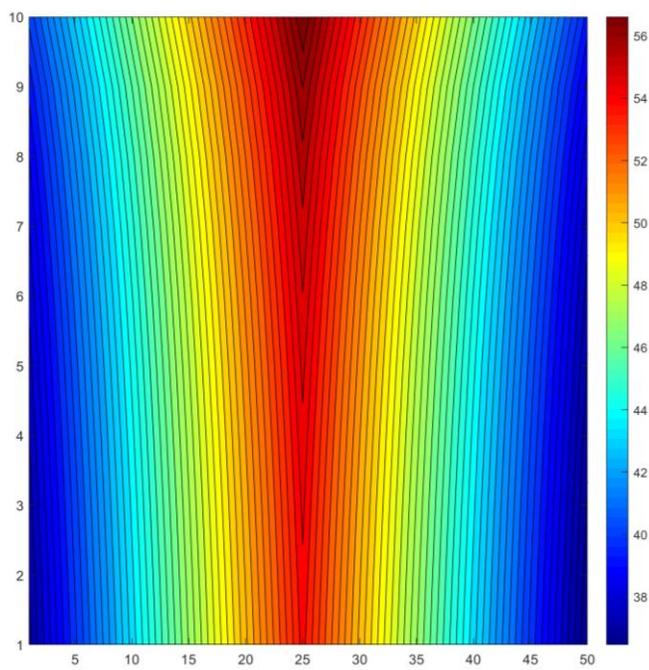


Figura 20. Estratificación sin aislamiento

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se puede apreciar que las pérdidas que se presentan en los acumuladores verticales para ACS son en las paredes del mismo y van depender del material aislante del cual estén elaborados; por ello lo óptimo basado en las simulaciones sería instalar la salida del agua del mismo en el centro del acumulador, con lo cual se minimiza el impacto de las pérdidas en la temperatura que requiere la carga.

Al realizar un análisis multinodal tanto vertical como horizontal se logra determinar la temperatura en cada punto interior del tanque del almacenamiento y por las características del fluido; en este caso el agua; se podría tener una visión en 3D de la temperatura extrapolando los datos bidimensionales.

Al analizar el comportamiento dinámico de la temperatura en el acumulador vertical, se puede observar como el mismo se comporta como una batería térmica y guarda su temperatura por largos intervalos de tiempo, con lo cual se verifica que la variación de temperatura en el agua entregada al usuario final no tiene mayores cambios en el transcurso del día.

Una de las principales ventajas del modelo propuesto es que su aplicación no solo queda limitada a sistemas solares, el modelo puede ser trasladado a otros tipos de energía primaria que proporcionen la temperatura inicial del proceso.

Se recomienda ampliar el estudio presentado y modificar la heurística para que se pueda analizar la estratificación de temperatura en tanques horizontales del tipo cilíndrico, en los cuales difiere los volúmenes de cada nodo de una manera no lineal.

REFERENCIAS

- [1] R. McMordie, M. Brown, and R. Stoughton, *Solar Energy Fundamentals*. Lilburn: The Fairmont Press, Inc., 2012.
- [2] L. Jutglar, *Energía Solar*. Barcelona: CEAC, 2004.
- [3] J. Duffie and W. Beckman, Eds., *Solar Engineering of Thermal Processes*, Tercera ed. New Jersey: Jhon Wley & Sons, Inc., 2006.
- [4] J. Wilson, *La Energía Solar*, Primera. Madrid: Alhambra S.A., 1982.
- [5] Y. Goswami, F. Kreit, and J. Kreider, *Principle of solar engineering*, Segunda Ed. New York: Taylor & Francis Group, 2000.
- [6] L. Wang and X. Qiu, “Distributed Modeling of Direct Solar Radiation of Rugged Terrain Based on GIS,” *2009 First Int. Conf. Inf. Sci. Eng.*, no. 1, pp. 2042–2045, 2009.
- [7] Y. Jiang, “Daily Diffuse Solar Radiation at Beijing,” pp. 9–12, 2009.
- [8] S. Wang, S. G. Leblanc, R. Fernandes, and J. Cihlar, “Diurnal Variation of Direct and Diffuse Radiation and Its Impact on Surface Albedo,” vol. 00, no. 5, pp. 3224–3226, 2002.
- [9] F. Vanek, L. Albright, and L. Angenent, *Energy Systems Engineering: Evaluation and Implementation*. McGraw Hill Professional, 2012.
- [10] J. Gutierrez, *Manual de energía solar fotovoltaica y cooperación al desarrollo*. Madrid: Instituto de Estudios Políticos para América Latina, 1999.
- [11] J. Calle, J. Fajardo, and L. Sánchez, “Agua Caliente Sanitaria de uso doméstico con energía solar, una alternativa para la ciudad de Cuenca,” *Ingenius*, pp. 57–65.
- [12] C. Kerkeni, F. Benjemaa, S. Kooli, A. Farhat, and A. Belghith, “Solar Domestic Hot Water : Numerical and Experimental Study of the Thermal Stratification in a Storage Tank,” vol. 00, no. C, pp. 195–199, 2001.
- [13] S. Alizadeh, “An experimental and numerical study of thermal stratification in a horizontal cylindrical solar storage tank,” *Sol. Energy*, vol. 66, no. 6, pp. 409–421, Sep. 1999.
- [14] E. Andersen, S. Furbo, and J. Fan, “Multilayer fabric stratification pipes for solar tanks,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 10, pp. 1219–1226, Oct. 2007.
- [15] Y. Cengel and M. Boles, *Termodinámica*, Séptima Ed. México: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2012.
- [16] F. Incropera and D. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. 2011.
- [17] F. H. Fahmy, D. M. Atia, N. M. A. El-, and H. T. Dorrah, “Optimal Sizing Of Solar

- Water Heating System Based On Genetic Algorithm For Aquaculture System,” no. Iccce, pp. 221–226, 2010.
- [18] G. N. Kulkarni, S. B. Kedare, and S. Bandyopadhyay, “Determination of design space and optimization of solar water heating systems,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 8, pp. 958–968, Aug. 2007.
- [19] D. Wang and Y. Liu, “Study on Heat Storage Tank of Solar Heating System,” *2010 Int. Conf. Digit. Manuf. Autom.*, pp. 493–497, Dec. 2010.
- [20] J. Nacif, “ACUMULACIÓN TÉRMICA PARA UN SISTEMA SOLAR DE CALEFACCIÓN ACTIVO,” Universidad de Chile, 2011.
- [21] A. White, J. McTigue, and C. Markides, “Wave propagation and thermodynamic losses in packed-bed thermal reservoirs for energy storage,” *Appl. Energy*, Mar. 2014.
- [22] D. Galatro and E. Verruschi, “Estimación de la pérdida de calor en tanques,” *Ingeniería Química N° 489*, Antonio José de Sucre, pp. 56–59, 2010.
- [23] A. J. White, “Loss analysis of thermal reservoirs for electrical energy storage schemes,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 11, pp. 4150–4159, Nov. 2011.
- [24] G. N. Kulkarni, S. B. Kedare, and S. Bandyopadhyay, “Optimization of solar water heating systems through water replenishment,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 3, pp. 837–846, Mar. 2009.
- [25] H. Lee, S. Chung, I. Ryu, and J. Choi, “Three-dimensional modeling of thermal stratification of a deep and dendritic reservoir using ELCOM model,” *J. Hydro-environment Res.*, vol. 7, no. 2, pp. 124–133, Jun. 2013.
- [26] W. Yaïci, M. Ghorab, E. Entchev, and S. Hayden, “Three-dimensional unsteady CFD simulations of a thermal storage tank performance for optimum design,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 60, no. 1–2, pp. 152–163, Oct. 2013.
- [27] B. Xu, P.-W. Li, and C. L. Chan, “Extending the validity of lumped capacitance method for large Biot number in thermal storage application,” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 6, pp. 1709–1724, Jun. 2012.
- [28] J. Fan and S. Furbo, “Thermal stratification in a hot water tank established by heat loss from the tank,” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 11, pp. 3460–3469, Nov. 2012.
- [29] M. Toropoc, C. Gavrilă, R. Frunzulica, and P. D. Toma, “Mathematical modeling and simulation of a thermal system,” no. 7, p. 100102G, 2016.