

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ENERGÍA SOLAR FOTOTÉRMICA APLICADA A LA
ACUICULTURA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

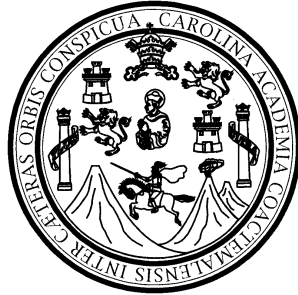
LUIS FERNANDO DE LA ROCA MENDOZA
ASESORADO POR LIC. CÉSAR ANTONIO IZQUIERDO MERLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

Licenciado en Física Aplicada

Guatemala Octubre del 2003

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

Decano: Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
Vocal I: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Vocal II: Lic. Amahán Sánchez Alvarez
Vocal III: Ing. Julio David Galicia Celada
Vocal IV: Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
Vocal V: Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
Secretario: Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

Decano: Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
Examinador: Lic. Edgar Aníbal Cifuentes
Examinador: Lic. César Antonio Izquierdo Merlo
Examinador: Lic. Ricardo Contreras Folgar
Secretario: Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ENERGÍA SOLAR FOTOTÉRMICA APLICADA A LA ACUICULTURA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ciencias con fecha 22 de febrero de 1999.

LUIS FERNANDO DE LA ROCA MENDOZA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de San Carlos de Guatemala, especialmente a la Facultad de Ingeniería y al Centro de Estudios del Mar y Acuicultura.

Al licenciado César A. Izquierdo Merlo por la asesoría prestada en la realización del presente trabajo de graduación.

Al ingeniero Juan Merck Cos, por la orientación y apoyo prestado en los aspectos metodológicos y administrativos durante la realización de mi Ejercicio Profesional Supervisado, así como en el proceso de elaboración del presente trabajo de graduación.

Al personal docente y administrativo del Centro de Estudios del Mar y Acuicultura de la Universidad de San Carlos de Guatemala, especialmente al Lic. Luis Franco, por su apoyo y orientación durante la realización de mi Ejercicio Profesional Supervisado.

ACTO QUE DEDICO A

MI PADRE Miguel Angel de la Roca Franco

MIS PADRES Roberto y Eugenia

MI ESPOSA María de los Angeles

MIS HIJOS José Miguel
María de los Angeles

MIS HERMANOS Ana Lucrecia
Estuardo Federico

FAMILIA DE LA ROCA FRANCO

FAMILIA ARGUETA HERNÁNDEZ

FAMILIA SOMMERKAMP STEIGER

FAMILIA CASTILLO STEIGER

DOCENTES Y ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y
AMIGOS EN GENERAL.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IV
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIV
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	XV
INTRODUCCIÓN	XVI
1. TEORÍA DE LOS ESTANQUES SOLARES	
1.1 Estanques solares de gradiente salino	1
1.2 Transmisión de la radiación solar	4
1.3 Termodinámica del estanque solar	5
1.3.1 Zona convectiva superior (UCZ)	6
1.3.2 Zona convectiva inferior (LCZ)	8
1.3.3 Zona no convectiva (NCZ)	8
1.3.4 Fronteras de la zona no convectiva	9
1.4 Diseño de la configuración del estanque	9
1.4.1 Área superficial del estanque	10
1.4.2 Profundidad de la zona del gradiente	10
1.4.3 Concentración de sal	11
1.5 Construcción del gradiente de salinidad	12
1.5.1 Masa de sal y volumen inicial de la solución salina	13
1.5.2 Tasa de flujo de agua de inyección	14
1.5.3 Procedimiento de inyección	16
1.6 Estabilidad interna del estanque	19

1.7	Eficiencia de colección del estanque	22
2.	MÉTODOS Y MATERIALES	
2.1	Configuración del estanque experimental.	23
2.2	Plan de inyección de agua de baja concentración.	25
2.3	Medición de salinidad y temperatura. .	28
2.4	Modelo para predecir la temperatura de la LCZ	29
2.5	Modelo para la resistencia total a la transferencia de calor	32
2.6	Eficiencia de colección de energía	39
2.7	Construcción del estanque experimental	40
2.8	Estabilidad del gradiente	41
2.9	Turbiedad del agua	42
2.10	Material y equipo.	42
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1	Perfiles de salinidad	49
3.2	Perfiles de temperatura	51
3.3	Evolución de temperaturas en la LCZ	53
3.4	Eficiencia de acumulación	54
3.5	Estabilidad del gradiente de salinidad	57
3.6	Temperatura ambiente y velocidad del viento	60
3.7	Discusión	62
4.	SIMULACIÓN DE UN ESTANQUE SOLAR INDUSTRIAL	
4.1	Diseño conceptual	65
4.2	Estimación de la demanda y del área del estanque solar	70
4.3	Simulación con PONDFEAS	71
4.4	Parámetros del estanque	72
4.5	Aplicación de PONDFEAS	74

4.6	Análisis comparativo	83
	CONCLUSIONES	85
	RECOMENDACIONES	87
	REFERENCIAS	89
	BIBLIOGRAFÍA	92
	APÉNDICE	95

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Características típicas de un estanque solar no convectivo	3
2	Esquema del flujo de calor en el modelo de resistencias	33
3	Circuito de resistencias térmicas	37
4	Fotografía del estanque experimental y su ambiente	43
5	Difusor con flotadores y termómetro	44
6	Balanza analítica y muestras de agua del estanque	44
7	Ensayo de técnica de construcción de gradiente	45
8	Medición de temperaturas por la mañana	47
9	Ensayo de técnica de medición	47
10	Romana para pesar sal	48
11	Perfil de salinidad esperado y perfiles de salinidad medidos	50
12	Perfiles de temperatura del 3 al 16 de enero	51
13	Perfiles de temperatura del 23 de enero al 12 de febrero	52
14	Perfiles de temperatura del 19 al 27 de febrero	52
15	Perfiles de temperatura del 4 al 12 de marzo	53
16	Evolución de la temperatura de la LCZ	54
17	Eficiencia de acumulación de energía en la LCZ	55
18	Número de margen de estabilidad SMN, según la altura del estanque	58
19	Evolución de la temperatura de la zona de almacenamiento (LCZ)	60
20	Velocidad promedio del viento y velocidad máxima durante los días de observación	61

21	Otras variables meteorológicas: grados de enfriamiento (°C), punto de rocío (°C) y visibilidad (km)	61
22	Esquema del diseño conceptual para un estanque solar aplicado a la acuicultura	69
23	Indicadores económicos PB, LCE y SIR como función del área para una carga de 12,000 GJ/año	77
24	Indicadores económicos PB, LCE y SIR como función del área para una LCZ = 0.50 m y carga anual variable	80
25	Comparación de curvas de PB y área óptima, para tres situaciones diferentes	81
26	Comparación de curvas de LCE vs área óptima, para tres tipos de situaciones	82
27	Comparación de curvas de SIR vs área óptima, para tres tipos de situaciones	82
28	Vista del sitio de experimentación desde el noreste	106
29	Vista del sitio de experimentación desde el oeste	106
30	Depósitos del primer ensayo de medición de temperaturas	107
31	Vista del sitio de experimentación desde el sureste	107
32	Ensayo con estanques cubiertos	108
33	Vista de la transparencia de los estanques	108
34	Vistas del horno solar tipo caja con reflector en operación	109
35	Evolución de la temperatura del medio ambiente, del aire del interior y de la placa absorbente del horno solar tipo caja	110
36	Altitud y acimut durante el 10 de diciembre, 6:30 a.m. a 17:30 p.m, tiempo solar	111
37	Evolución de la temperatura de 2 kg de agua en un recipiente dentro del horno solar, de 10:00 a.m. a 14:00 p.m. (+/- 1 grado)	112
38	Potencia del horno solar cada 15 minutos (+/- 5 W)	112
39	Vistas de ensayos con secador solar tipo chimenea	113

40	Instrumentos para mediciones externas del secador solar	114
41	Fotografías de la ubicación de los termómetros en el interior del secador solar tipo chimenea	115
42	Voluntarias de Monterrico ensayado el horno solar	116

TABLAS

I	Valores de A_{ij} para calcular la densidad $\rho(S,T)$	20
II	Valores de B_{ij} para calcular el coeficiente de estabilidad	21
III	Configuración del estanque solar experimental	24
IV	Valores del número de Froude durante la inyección de agua	28
V	Resistencias correspondientes a los flujos de calor relevantes	37
VI	Eficiencias diarias de colección de calor en la LCZ del estanque	56
VII	Polinomios de ajuste de perfiles de temperatura para estimar el SMN	57
VIII	Polinomios de ajuste de perfiles de salinidad para estimar el SMN	58
IX	Número de Margen de Estabilidad (SMN)	59
X	Parámetros del estanque de simulación	72
XI	Costos de construcción según la cantidad del área	73
XII	Parámetros económicos	73
XIII	Resultados de la primera simulación para la temperatura promedio del estanque y la energía extraída durante un año de operación	75
XIV	Resultados de la segunda simulación para la temperatura promedio del estanque y la energía extraída durante un año de operación	76
XV	Indicadores de rendimiento térmico y económico para diferentes áreas y una carga de 12,000 GJ anuales	78
XVI	Comparación de áreas para diferentes cargas, $LCZ = 1m$ y $LCZ = 0.50 m$	79

XVII	Fracciones solares e indicadores económicos para estanques solares en dos latitudes diferentes	84
XVIII	Hoja de cálculo para la configuración del estanque, el plan de inyección de agua y el Número de Froude	96
XIX	Hoja de cálculo para el margen de estabilidad (SMN)	99
XX	Hoja de cálculo para la estimación de temperaturas en la LCZ	101
XXI	Hoja de cálculo para la eficiencia de acumulación de energía y el error de estimación	103

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{LCZ}	Área de la zona de almacenamiento del estanque solar
A_{ij}	Matriz de coeficientes para convertir salinidad en % a densidad
CU	Costo por metro cuadrado de construcción
c_p	Calor específico
D_{am}	Concentración de la solución en el ambiente que se inyecta agua
D_i	Concentración del agua de inyección
d	Altura de paso de agua del difusor
F_r	Número de Froude
F_{solar}	Fracción anual por energía solar
g	Constante gravitacional
GJ	GigaJoule, equivalente a 10^9 Joules
GZ	Profundidad de la zona entre el fondo del estanque y el manto friático
H	Irradiación diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal (kWh/m ² día)
I	Irradiación horaria, intensidad de radiación solar
I_T	Insolación instantánea global incidiendo sobre la superficie
L	Profundidad de zona de calentamiento de un estanque, calor latente de evaporación del agua
LCE	Costo o tarifa actualizada de GJ de energía
LCS	Ahorro de costos con proyecto del estanque solar, durante la vida útil del proyecto
LCZ	Zona de almacenamiento de un estanque solar
n	Día del año, horas de brillo solar en un día
N	Longitud del día en horas
NCZ	Zona de gradiente de salinidad y aislante natural

P	Potencia
PB	Período de recuperación de la inversión
r	Radio
R	Tasa de flujo de un fluido
R_b	Factor geométrico de radiación directa
R_d	Factor geométrico de radiación difusa
R_T	Factor geométrico de radiación total
S	% de salinidad
spg	Gravedad específica
SIR	Tasa de ahorro de costos con relación a la inversión
SMN	Margen de estabilidad (o de seguridad)
t	Tiempo
T	Temperatura
UCZ	Zona convectiva superior de baja salinidad
z	Altura
α	Absorbencia
β	Inclinación o pendiente
δ	Declinación solar, grosor (localmente definido), coeficiente de estabilidad
Δ	Intervalo o incremento
η	Eficiencia (definida localmente)
θ	Ángulo entre la normal a la superficie y la radiación incidente
ρ	Reflectancia del suelo, densidad
τ	Transmitancia, tiempo
∂S_a/∂z	Gradiente de salinidad medido
∂S_i/∂z	Gradiente de salinidad teórico

GLOSARIO

Absorbencia	Radiación absorbida por un material, con relación a la radiación total que se recibe.
Absorbente	Placa plana de color negro, utilizada en los colectores solares para absorber la energía radiante.
Acuicultura	Excepcionalmente, también se le conoce como acuicultura. Cultivo de la fauna y flora acuática mediante el empleo de métodos y técnicas para su desarrollo controlado en todo estadio biológico y ambiente acuático y en cualquier tipo de instalación. Ejemplos: producción controlada de postlarvas, crías, larvas, huevos, semillas, cepas algas y esporas en laboratorio, o el desarrollo y engorde de éstos en estanques artificiales, lagos, presas, así como en instalaciones ubicadas en bahías, estuarios y lagunas costeras o en el medio marino.
Acimut solar	Desplazamiento angular desde el sur de la proyección de la radiación directa sobre un plano horizontal. En algunos casos y en otros contextos γ_s se mide a partir del norte.
Altitud solar	Complemento del ángulo cenit ($90-\theta_z$).

Ángulo cenit	Ángulo subtendido por una línea vertical al cenit (es decir, el punto directamente encima) y la línea que apunta directamente al sol.
Ángulo horario	Ángulo comprendido entre el meridiano y el círculo máximo, que pasa a través de un objeto celeste, se mide hacia el oeste sobre la esfera celeste y da el tiempo desde que el objeto cruzó por última vez el meridiano.
Puesta del sol	Ángulo horario correspondiente a la altitud solar igual a 0° , es decir ángulo cenit igual a 90° .
Área óptima	Es el área que optimiza el período de recuperación de la inversión y la relación de ahorro de costos con la inversión.
Brillo solar	Tiempo durante el cual se tiene una irradiancia superior a 120 W/m^2 en un período determinado. Unidad: horas/día, horas/mes, horas/año, dependiendo del período escogido.
Constante solar	Cantidad de energía solar que incide perpendicularmente por unidad de tiempo sobre una superficie de área unitaria, colocada fuera de la atmósfera terrestre a una distancia igual a la distancia promedio del sol a la tierra.

La referencia radiométrica mundial WRR (WRR: *World Radiometric Reference*) del WRC (*World Radiation Center*) es $1367 \text{ W/m}^2 = 433.3 \text{ Btu/ft}^2\cdot\text{h} = 1.96 \text{ cal/}(\text{cm}^2\cdot\text{min})$, con una desviación estándar de 1.6 W/m^2 y una desviación máxima de $\pm 7 \text{ W/m}^2$. En la literatura también son utilizados los valores de 1353 W/m^2 y de 1373 W/m^2 .

Declinación solar

Ángulo medido desde el ecuador hasta el punto dado por el semicírculo mayor que pasa por el polo celeste (polo del mundo) y dicho punto (por el círculo de declinación). En el hemisferio boreal la declinación es positiva, el austral negativa.

Ecuación del tiempo

Corrección que toma en cuenta las perturbaciones en la rotación de la Tierra, que afectan el tiempo para el cual el sol cruza el meridiano del observador.

Energía

Capacidad de producir un trabajo. La energía mantiene junta la materia. Puede convertirse en masa o derivarse de la masa, se presenta en varias formas tales como la energía cinética potencial química, eléctrica, calorífica y energía atómica y puede cambiar de una de estas formas a otra.

Factor geométrico

Relación entre la radiación sobre una superficie inclinada, respecto a la radiación que incide sobre una superficie horizontal, puede establecerse para radiación directa, difusa y promedia global.

Irradiancia	Tasa en la cual la energía radiante incide sobre una superficie por unidad de área y de tiempo (W/m^2).
Irradiación	Energía incidente por unidad de área sobre una superficie, encontrada por integración de la irradiancia durante un tiempo específico, usualmente una hora o un día. (El término insolación se aplica específicamente para la irradiación solar.)
Latitud	Localización al norte o al sur del Ecuador, positivo al norte, $-90^\circ \leq \lambda \leq 90^\circ$.
Mediodía solar	Tiempo solar en que el sol cruza el meridiano del observador.
Meteorológico	Cambios en las condiciones atmosféricas que se dan de un día a otro y algunas veces de manera instantánea sobre un lugar o área determinada. En contraste, el clima abarca la totalidad de estadísticas de todas las condiciones meteorológicas para un largo periodo de tiempo sobre un lugar o área. Las condiciones atmosféricas son medidas por medio de seis parámetros meteorológicos que son: temperatura del aire, presión barométrica, velocidad del viento, humedad, nubes y precipitación.

Nivel freático	Superficie de agua que se encuentra en el subsuelo bajo el efecto de la fuerza de gravitación y que delimita la zona de aireación de la de saturación.
PONDFEAS	Abreviatura de <i>ponds feasibility software</i> y consiste de un programa que se utiliza para hacer simulaciones acerca de la factibilidad de un estanque solar.
Radiación	Emisión de partículas atómicas o rayos de energía electromagnética de longitudes de onda corta, emitidas por los núcleos de algunos átomos. Algunos elementos son, radiactivos después de ser bombardeados con neutrones u otras partículas. Los tres tipos más comunes de radiación son los rayos alfa, beta y gama.
Radiación difusa	Radiación solar recibida desde luego que su dirección ha sido cambiada por el efecto de la atmósfera. En algunos casos también se le llama así a la radiación reflejada por superficies tales como las nubes, el suelo y las paredes.
Radiación directa	Radiación solar recibida desde el sol sin considerar el efecto de la atmósfera.
Tiempo solar	Tiempo basado en el movimiento angular aparente del sol en el firmamento.
Turbiedad	Condición nebulosa del agua o falta de lucidez debido a la presencia de partículas suspendidas las cuales pueden ser removidas por filtración.

RESUMEN

La observación experimental de la temperatura y del gradiente salino de un estanque solar que se construyó siguiendo la técnica de difusión por pasos, dentro de un depósito de asbesto cemento de 1.54 m de diámetro y 1.05 m de altura, sobre una plancha de concreto y expuesto al ambiente natural de Monterrico (13° 59' latitud Norte) y resultó con una eficiencia de acumulación promedia de 17.8%, durante 67 días de calentamiento alcanzando una temperatura máxima de 65 °C en la zona de almacenamiento.

Se aplicó el programa de simulación PONDFEAS para hacer una evaluación preliminar de la viabilidad técnica y de la prefactibilidad económica de un estanque solar de gradiente salino, como fuente de energía para una granja hipotética de hidrobiológicos operando en la costa sur de Guatemala. Se asume que la granja necesita agua de calidad para sus estanques de producción y que requiere energía para elevar la temperatura de 56,000 m³ de agua de 25 a 75 °C durante un año de operación, lo que significa una carga anual de 12,000 GJ, utilizando combustible Diesel.

Se determinó que el área óptima del estanque es de 2,065 m², con una profundidad en la zona de almacenamiento igual a 0.50 m. El rendimiento térmico del proyecto se estimó en una fracción solar de 0.22. El rendimiento económico resultó con un período de recuperación del capital de 5.3 años y una tasa de ahorro de costos de 4.98 respecto de la inversión con proyecto. Los resultados de la simulación para dos latitudes diferentes ponen en evidencia la ventaja comparativa que se tiene en latitudes bajas, como la de Guatemala.

OBJETIVOS

- ◆ General

Establecer la viabilidad técnica de la aplicación de estanques solares de gradiente salino, como fuente alternativa de energía en actividades industriales que operan a bajas temperaturas, menos de 100 °C, tales como la acuicultura.

- ◆ Específicos

1. Observar experimentalmente la eficiencia de acumulación de energía solar en forma de calor sensible en el fondo de un estanque solar de gradiente salino a pequeña escala.
2. Hacer una simulación para un estanque solar a nivel industrial.

HIPÓTESIS

Un estanque solar de gradiente salino, con un diámetro de 1.54 m, expuesto al ambiente natural de la Estación Experimental del CEMA, bajo condiciones de estabilidad de acuerdo con un valor de número margen de estabilidad (SMN) menor de 2.5, tiene una eficiencia de acumulación de energía solar mayor o igual a 20%.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo de graduación abarca principalmente la observación del desempeño de un miniestanque solar de gradiente salino expuesto al ambiente externo, así como con la estimación preliminar de los parámetros de diseño para un estanque solar con aplicaciones industriales. El esquema que se presenta para realizar la simulación es al nivel conceptual y de viabilidad técnica. Se entiende que el diseño de ingeniería procede cuando se han evaluado todas las opciones técnicas viables (*U.S. Department of Energy*, 1998).

Las tendencias actuales en el ámbito mundial exigen que las industrias y los consumidores de energía sean más eficientes en el uso de las fuentes energéticas. Los criterios para evaluar la eficiencia del uso de fuentes de energía tienden a considerar el enfoque de la segunda ley de la termodinámica, complementando el enfoque de evaluación de la primera ley de la termodinámica. Algunos autores se refieren a la aplicación de este enfoque como Análisis Exergético o Exergética (Wall, 1998). La importancia del enfoque del análisis exergético radica en la consideración de la degradación de la fuente de energía utilizada y del ambiente que engloba al sistema energético en cuestión. Entonces, resulta conveniente que las fuentes de energía estén eficientemente asociadas con los procesos que generan su consumo, desde el punto de vista económico y exergético.

La conveniencia del enfoque exergético será mayor en la medida que las fuentes renovables sustituyan o complementen el uso de fuentes convencionales de energía, particularmente en procesos que se dan a bajas temperaturas y que no requieren combustibles tan estructuralmente organizados y con altas entalpías, como los derivados del petróleo.

El criterio que se asumió coincide con que los sistemas fototérmicos para producción de calor a bajas temperaturas, menos de 100 °C, son buenos candidatos para una correcta asociación entre el destino final de la energía y la fuente de donde proviene. Estos sistemas degradan la calidad de energía a un ritmo menor que los combustibles convencionales. Esta premisa se considera válida por lo menos hasta que otras modalidades de recursos naturales renovables alcancen niveles comerciales favorables para la industria nacional, luego de recuperar los costos de investigación y desarrollo en los que actualmente están incurriendo los centros especializados.

El estado actual de la investigación y el desarrollo de la tecnología de estanques solares todavía no ha superado los problemas prácticos que limitan su difusión y comercialización pero, en el ámbito internacional, hay grupos de investigación que están haciendo esfuerzos por superar estas dificultades. En Estados Unidos de Norte América hay un consorcio de tres universidades: Universidad de Texas, El Paso; Universidad de Houston; y, Universidad de Texas A & M, el consorcio administra el proyecto de EL Paso, Texas, donde se mantiene una infraestructura para actividades de investigación, laboratorio de demostración y facilidades de entrenamiento. En Australia, el *Royal Melbourne Institute of Technology*, conjuntamente con varias instituciones gubernamentales y privadas australianas, conducen un proyecto ambicioso que pretende comercializar la tecnología de estanques solares.

En Guatemala no se encontraron antecedentes de estudios relacionados con estanques solares, situación que puede conducir a perder oportunidades de generar tecnología propia o disminuir las posibilidades de éxito de la transferencia de tecnología cuando esta tecnología alcance niveles comerciales atractivos para los inversionistas, lo que usualmente conlleva costos difíciles de apreciar cuando no se conoce la tecnología en cuestión.

Los estanques solares parecen ofrecer buenos resultados como fuente alternativa de energía, particularmente en aquellos procesos que requieren bajas temperaturas. Algunos autores sostienen que los estanques solares son la mejor opción para países en vías de desarrollo (Kreith y Kreither, 1978).

Este trabajo de graduación pretende contribuir con la incorporación de los aspectos fundamentales de la tecnología de estanques solares a la investigación institucional del Centro de Estudios del Mar y Acuicultura y de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos, consecuentemente a la investigación energética en Guatemala.

El alcance del estudio se limitó a generar información experimental de carácter cualitativo, así como obtener experiencia para construir, operar y evaluar estanques experimentales en un ambiente natural y fuera de laboratorio.

La investigación fue realizada en la Estación Experimental del CEMA, ubicada en Monterrico, Santa Rosa, Guatemala, América Central. Se observó la eficiencia de acumulación de un estanque solar rústico pequeño, de 1.54 m de diámetro y 1 m de profundidad, encontrándose valores de eficiencia de colección consistentes con los esperados para estanques de esas dimensiones, entre 15 y 20%.

Se utilizó el programa de simulación PONDFEAS (Cler, 1990) para investigar y optimizar el comportamiento de un estanque solar sometido a las condiciones de la estación meteorológica Hilo de Hawaii, como una aproximación al rendimiento en una localidad cerca de la costa sur de Guatemala. Se presentan los resultados de la simulación con base en parámetros establecidos por Henning y Reid (1995), algunos de ellos se modificaron para adaptarlos a las condiciones de Guatemala.

Se estimó que para mejorar la calidad del agua de los estanques productores y auxiliares de reproducción y crianza, para una granja de las dimensiones de la Estación Experimental del CEMA en Monterrico, con un régimen de dos cosechas por año, se requieren 12,000 GJ anuales de energía térmica, para someter a 56,000 m³ de agua anuales a una temperatura entre 70 y 75 °C. El área del estanque solar capaz de cogenerar esta energía, conjuntamente con un calentador de combustible líquido, se estimó entre 1,500 y 2,000 m².

Las características de este trabajo son consistentes con las iniciativas regionales tales como los acuerdos políticos enmarcados en la Alianza para el Desarrollo Sostenible (ALIDES), organismos de coordinación como la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD), y otras instancias regionales (Windevoxhel et al, sf.). La continuación de este trabajo puede ser considerada como una propuesta a considerar dentro de la primera fase del paradigma del programa que propone el Grupo de Expertos Sobre los Aspectos Científicos de la Protección Ambiental Marina (GESAMP), "Manejo Costero Integrado", Fase 1: Identificación y evaluación de asuntos claves (IMO/FAO/UNESCO-IOC/WMO/IAEA/UN/UNEP, 1996).

El capítulo 1 trata sobre la teoría y prácticas de los estanques solares relacionadas con este trabajo de graduación.

El capítulo 2 se refiere a los materiales, métodos y condiciones que prevalecieron durante la construcción, calentamiento y observación del estanque experimental. Se describe el procedimiento que se ha seguido para construir y para evaluar la estabilidad de la zona del gradiente salino (NCZ), así como estimar la eficiencia del estanque para coleccionar y almacenar energía térmica en la zona de almacenamiento (LCZ).

En este capítulo también se describe el procedimiento que se siguió para elaborar un modelo para estimar la temperatura de la zona de almacenamiento y la resistencia total a las pérdidas térmicas.

El capítulo 3 trata sobre los resultados experimentales de la observación del estanque solar de gradiente salino y la discusión de los mismos. El análisis de error y las hojas de cálculo se incluye en el apéndice

El capítulo 4 presenta una aproximación al diseño de un sistema energético basado en un estanque solar de gradiente salino, con la utilización del programa de simulación PONDFEAS. El material que se expone en este capítulo no pretende ser un diseño de ingeniería, más bien presenta algunos elementos básicos para que el físico, el ingeniero y el especialista en acuicultura eventualmente puedan hacer el diseño definitivo y llevarlo a la práctica. También se incluye un análisis comparativo entre los indicadores térmicos y económicos para dos localidades localizadas a diferentes latitudes, para evaluar el efecto de la latitud sobre los indicadores mencionados.

El apéndice incluye algunos resultados de casos relacionados con el Ejercicio Profesional Supervisado que sirvió de base para este trabajo de graduación, realizado en la Estación Experimental del Centro de Estudios del Mar y Acuicultura.

1. EFICIENCIA DE LOS ESTANQUES SOLARES

La tecnología de los estanques solares se ha desarrollado con el aporte de ciencias aplicadas tales como física, química e ingeniería. Los fundamentos teóricos y las leyes empíricas pertinentes para su comprensión y desarrollo corresponden a diferentes ramas de la ciencia tales como óptica, termodinámica, transferencia de masa, transferencia de calor, dinámica de fluidos y ciencia de materiales, por mencionar algunas de especial importancia.

En este capítulo se presentan los aspectos conceptuales y técnicos que están más relacionados con la observación experimental de la eficiencia de acumulación de energía de un estanque solar de gradiente salino de pequeñas dimensiones, sometido a condiciones ambientales fuera de laboratorio.

1.1 Estanques solares de gradiente salino

Los estanques solares consisten de una masa de agua contenida en depósitos naturales o contruidos artificialmente. Se utilizan para absorber la radiación solar que alcanza el fondo, transformarla en energía térmica y acumular parte de esta energía como calor sensible en la masa de agua encima de la placa absorbente. Los estanques solares pueden ser convectivos o no convectivos.

Los estanques solares convectivos, o charcas solares, consisten de cuerpos de agua estancada en depósitos de aproximadamente 3 a 4 m de ancho y 50 m de largo. Son poco profundos, del orden de 10 cm, y sus depósitos están debidamente impermeabilizados y aislados en el fondo y paredes laterales.

Investigadores de *Lawrence Livermore Laboratory* de la Universidad de California han presentado resultados de este tipo de estanques, derivados de un trabajo experimental de

varios años. Estos resultados han sido presentados en congresos internacionales de energía solar (Casamajor *et al*, 1977; Hewett, 1977; Dickinson y Clark, 1976 y Dickinson *et al*, 1975).

Por su parte, los estanques no convectivos presentan en el fondo una capa de agua con densidad uniforme y una estratificación de capas de agua con un gradiente de densidad como función de la altura del estanque.

Los estanques solares de gradiente salino son casos especiales de estanques no convectivos y consisten de una masa de solución salina estratificada. En el fondo del estanque reposa una capa de solución de concentración alta y constante (LCZ). Encima de la LCZ se encuentra una capa con un gradiente de salinidad negativo (NCZ). La capa superior del estanque está formada con agua de baja salinidad, también más o menos constante (UCZ).

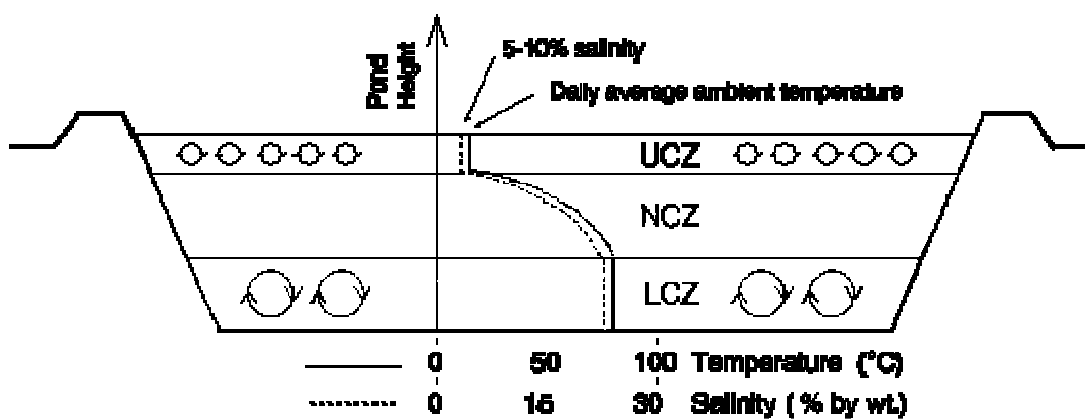
El gradiente salino de la zona no convectiva prácticamente elimina la transferencia de calor por convección hacia las capas superiores. Además, la solución salina tiene un bajo coeficiente de transferencia de calor por conducción y la transferencia de calor por radiación es prácticamente despreciable. Estos hechos determinan que la zona del gradiente actúe como un aislante natural transparente, que permite acumular diariamente la energía en forma de calor sensible, condición que le da a los estanques solares de gradiente salino la característica de acumular y almacenar energía en un solo dispositivo.

La profundidad de la zona del gradiente es uno de los parámetros del diseño y puede ser de 0.5 a 2 metros.

La zona de almacenamiento de calor en el fondo tiene una profundidad entre 0.5 y 1.50 m, dependiendo de las aplicaciones y de la carga anual que se pretende suministrar en forma de calor.

La profundidad de la capa superior depende principalmente de las condiciones del viento y del régimen de lluvias. Esta capa sirve para prevenir el deterioro de la zona del gradiente y puede estar entre 0.2 y 0.8 metros.

Figura 1. Características típicas de un estanque solar de gradiente salino.



Fuente: *RMIT University. Department of Mechanical and Manufacturing Engineering.*
<http://www.me.mit.edu/research/solarpond.htm>. Diciembre 2001. Pág 7.

La figura 1 presenta las características fundamentales de un estanque solar de gradiente de salino. En la zona superficial (UCZ) y en la zona de almacenamiento (LCZ) la salinidad y la temperatura son aproximadamente constantes. En la zona del gradiente (NCZ) se elimina la transferencia de calor por convección, siempre y cuando la relación entre el gradiente de temperatura y el gradiente de salinidad cumpla la condición de estabilidad del estanque. La curva continua corresponde al perfil de temperatura y la discontinua al perfil de salinidad. Los círculos con las flechas representan la convección de calor.

Se encontraron investigaciones de otros tipos de estanques solares, entre los que destacan los trabajos del *Royal Melbourne Institute* de Australia (*Aerospace, mechanical and manufacturing engineering*, Julio 2002) y las variantes para estanques convectivos (Taga *et al*, 1996).

1.2 Transmisión de la radiación solar

Cuando un haz de luz incide en la interfaz aire/agua de un estanque solar, parte del rayo es reflejado al aire y parte es transmitida en el estanque. La cantidad de radiación que alcanza el fondo del estanque depende del área superficial, del área del fondo, de la pendiente de las paredes de revestimiento, de la profundidad de la capa de agua que tiene que atravesar la radiación solar y de la turbiedad del agua. La fracción de radiación solar transmitida afecta al funcionamiento térmico del estanque y es uno de los factores más críticos en su funcionamiento.

Wang y Seyed-Yagoobi (1995) investigaron experimentalmente el efecto de la claridad del agua y los niveles de la concentración de sal sobre la penetración de la radiación solar a varias profundidades del agua. Sus resultados indican que la concentración de sal no afecta la penetración de la radiación solar.

El manual del proyecto El Paso (Xu, 1993) recomienda calcular la radiación efectiva recibida en la zona de almacenamiento de un estanque solar (IP), por medio de la expresión:

$$IP = 0.31I_T f \quad (1.1)$$

La constante 0.31 es la fracción de la radiación solar que es capaz de atravesar las capas de agua de un estanque solar típico, con agua transparente.

El factor de ajuste (f) se utiliza para considerar las reflexiones de la luz que dependen de la latitud local. El promedio anual de irradiación horaria sobre una superficie horizontal (I_T) viene dado en W/m^2 . Para el caso de Guatemala, que está en el rango de latitudes entre 0 y 29°, el factor de ajuste es 0.98.

Por ejemplo, un estanque solar típico tiene 0.30 m en la zona superficial (UCZ), 1.3 m en la zona del gradiente (NCZ) y 0.40 m en la zona de almacenamiento (LCZ), es decir, la masa de agua tiene una profundidad total de 2.0 m. Para esta configuración y una radiación solar promedio anual de 448.7 W/m^2 , la ecuación (1.1) produce una irradiación efectiva de 136.3 MJ/m^2 , que es el caso de la estación San José Aeropuerto en Escuintla, Guatemala. Este resultado es prácticamente el mismo que se obtiene con otros modelos más elaborados (Akbarzadeh, 1992).

Un tratamiento más completo del tema de la transmisión solar en los estanques solares se presenta en Sezai y Tasdemiroglu (1995), incluyendo el análisis de la distribución espectral de la radiación y la aplicación de la ley de Fresnel y la ley de Snell.

1.3 Termodinámica del estanque solar

El rendimiento de un estanque solar también depende de la absorbencia del fondo y de los diferentes mecanismos de la transferencia de calor por medio de los cuales se pierde energía en la configuración del estanque solar. El análisis de estos mecanismos incluye aspectos de transferencia de calor por conducción (Ley de Fourier), transferencia de calor por convección (Ley de enfriamiento de Newton) y transferencia de calor por radiación (Ley de Stefan-Boltzmann). Estas leyes y sus aplicaciones están ampliamente desarrolladas y documentadas (Lienhard IV y Lienhard V, 2003).

El tipo de modelo para realizar estos análisis depende de la geometría del depósito, la configuración del estanque y la profundidad y alcance que se pretende lograr con los resultados. En esta sección se incluyen algunas consideraciones generales y algunos modelos sencillos aplicables a estanques pequeños de geometría cilíndrica. Un tratamiento detallado acerca de la termodinámica y la difusión de sal en un estanque solar se encuentra en Alagao (1996).

1.3.1 Zona convectiva superior (UCZ)

La temperatura de esta zona superficial es cercana a la temperatura ambiente y se producen pérdidas de calor como consecuencia de la convección hacia el aire, la evaporación y el intercambio de radiación con el firmamento. Esta capa también está sometida a la influencia de las lluvias y al movimiento ondulatorio debido a la velocidad del viento.

Seebaluck y Russool (1997), calcularon el calor perdido por convección entre la superficie de la UCZ y el aire del ambiente por medio de la ecuación:

$$Q_{uc} = h_c A_s (T_s - T_0) \quad (1.2)$$

En la ecuación (1.2), A_s es el área superficial del estanque (m^2), h_c es una constante (W/m^2), T_s ($^{\circ}C$) es la temperatura de la superficie de la UCZ y T_0 ($^{\circ}C$) es la temperatura del aire del ambiente en contacto con la superficie del estanque.

Los autores citados anteriormente también calcularon la pérdida de calor por evaporación, desde la UCZ hacia el ambiente, por medio de la expresión:

$$Q_{ue} = h_e [C_1 (T_s - T_0) - C_2 (1 - \varphi)] \quad (1.3)$$

En la ecuación (1.3) el símbolo Q_{ue} es la pérdida de calor por evaporación del agua de la UCZ (W), h_e es el coeficiente de transferencia de calor por evaporación ($W/m^2^{\circ}C$), C_1 y C_2 son constantes y φ es la humedad relativa. T_s y T_0 representan la temperatura superficial y la temperatura del ambiente, respectivamente.

En la zona superficial también se produce un intercambio de energía por medio del intercambio de radiación entre el espejo de agua y el firmamento. El

firmamento puede considerarse como una superficie a la cual se le asocia una temperatura efectiva de un cuerpo negro equivalente.

El intercambio de calor por radiación entre el firmamento y la superficie del agua se expresa por medio de la ecuación:

$$Q_{ur} = \varepsilon A_s \sigma (T_{\text{firmamento}}^4 - T^4) \quad (1.4)$$

En la expresión anterior, ε es la emisividad del espejo de agua, A_s es el área de la superficie del estanque, σ es la constante de Boltzmann, $T_{\text{firmamento}}$ es la temperatura absoluta del firmamento y T la temperatura absoluta de la superficie de la UCZ.

Duffie y Beckman (1980) se refieren a dos modelos para estimar la temperatura de cuerpo negro del firmamento. El modelo de Swinbank que utiliza la temperatura del aire en el ambiente y el modelo de Brunt y Bliss que utiliza la temperatura ambiente y la temperatura de punto de rocío.

En la mayoría de aplicaciones es posible asumir que la temperatura del firmamento es la misma que la temperatura del aire ambiente cercano al colector.

1.3.2 Zona convectiva inferior (LCZ)

La pérdida de calor hacia el suelo es de gran importancia para determinar el sitio geográfico más apropiado para instalar un estanque solar. La conductividad térmica efectiva del terreno aumenta con su contenido de humedad, que está relacionado con la profundidad de la capa de tierra que precede a la corriente de agua subterránea. El manual del proyecto El

Paso indica que la conductividad térmica efectiva del suelo puede estar entre 2.0 a 2.4 W/m°C y no cambia con el tiempo (Xu, 1993).

Otro aspecto que se ha estudiado es la relación entre la reflectividad del fondo del estanque, su capacidad de absorción y las pérdidas de calor a través del fondo del estanque (Sezai y Tasdemiroglu, 1995). Estos autores encontraron que las pérdidas de calor al suelo son insensibles a la reflectividad del mismo.

1.3.3 Zona no convectiva (NCZ)

Hay dos tipos de gradientes en la zona no convectiva de un estanque solar de gradiente salino, el gradiente de temperatura y el gradiente de salinidad.

Para que la zona del gradiente permanezca con sus propiedades de aislante natural, es necesario que la tasa con que aumenta la temperatura sea menor que la tasa permitida para el incremento de la salinidad. Matemáticamente, la relación del gradiente de temperatura local ($\Delta t/\Delta z$) al gradiente local de salinidad ($\Delta S/\Delta z$) deberá permanecer menor que un límite llamado coeficiente de estabilidad (δ). Esto es:

$$\frac{\Delta T}{\Delta z} \left(\frac{\Delta S}{\Delta z} \right)^{-1} \leq \delta \quad (1.5)$$

El manual del proyecto El Paso propone utilizar una conductividad térmica de 0.6 W/°C para la zona del gradiente, para estimaciones iniciales (Xu, 1993).

1.3.4 Fronteras de la zona no convectiva

Una frontera entre una zona convectiva y la zona del gradiente se caracteriza porque el gradiente adopta un valor igual a cero. La frontera de salinidad

permanece relativamente fija en el tiempo. La frontera de temperatura puede experimentar fluctuaciones en un período de tiempo del orden de minutos.

La migración de la frontera inferior de la zona del gradiente generalmente está sujeta a los efectos de convecciones de calor por las turbulencias debidas a las altas temperaturas. El movimiento de la frontera superior está influenciada por el viento, las tensiones que provoca la incidencia de la radiación solar y la influencia de otras variables ambientales como las lluvias.

Los parámetros que influyen la evolución de la frontera son la difusividad molecular del calor, la difusividad de la sal, el gradiente de temperatura y el gradiente de salinidad. El trabajo de Sreenivas *et al* (1995) se ocupa ampliamente de este tema.

1.4 Diseño de la configuración del estanque

Los elementos para el diseño de un estanque solar que se presentan a continuación asumen una carga anual promedio y se ocupan principalmente de la configuración de la zona del gradiente, la técnica para construirla y la forma de controlar su estabilidad.

1.4.1 Área superficial del estanque

La energía que proporciona el estanque para satisfacer cierta demanda es función de la diferencia entre el promedio anual de la temperatura de la LCZ del estanque y de la temperatura ambiente. Esta diferencia y la radiación solar que alcanza el fondo determinan el área requerida para la superficie absorbente del estanque solar. La radiación efectiva que alcanza el fondo del estanque se calcula con la ecuación (1.1) y el área del fondo del estanque (A_{LCZ}) se puede estimar con la fórmula:

$$A_{LCZ} = \left(\frac{1.1TD + \sqrt{1.21TD^2 + L(IP - 0.83TD)}}{IP - 0.83TD} \right)^2 \quad (1.6)$$

En la ecuación (1.6), TD es la diferencia entre la temperatura de la LCZ y la temperatura ambiente, IP es la radiación que alcanza el fondo del estanque, L es la carga promedio anual demandada en Watts y A_{LCZ} es el área que necesita el estanque solar (m^2).

La ecuación (1.6) puede ser usada para la estimación del área de la superficie absorbente en diseños preliminares. El área estimada con este cálculo será alrededor de 20 % del área del diseño final. Para el diseño final deberán considerarse las características específicas del lugar donde se piensa instalar el estanque (Xu, 1993).

1.4.2 Profundidad de la zona del gradiente

La profundidad de la zona del gradiente depende principalmente de la diferencia que se quiere mantener entre la temperatura de la UCZ y la temperatura local a una profundidad dada.

La diferencia de temperaturas entre la UCZ y la LCZ está correlacionada con la profundidad de la LCZ, para un nivel de eficiencia dado (η'). Esta eficiencia es un parámetro que se define como la relación del calor removido, extraído o transferido desde la LCZ, respecto de la radiación solar incidente en la superficie del estanque. Es diferente a la eficiencia de acumulación (η) que se define más adelante.

El manual del proyecto El Paso proporciona funciones de transmisión para un rango de eficiencias (η') de 0.16 a 0.40, dada una insolación de 200 W/m^2 y una profundidad de la zona del gradiente entre 0.80 y 3.00 m (Xu, 1993).

Por ejemplo, para una profundidad total de 1.40 m, una profundidad de UCZ de 0.20 m y una diferencia de temperatura de 20 °C, entre la UCZ y la LCZ, se necesita una profundidad de 1.2 m (1.4 m – 0.2 m) en la zona del gradiente, para obtener el mejor rendimiento con una eficiencia $\eta' = 0.32$. Estos valores corresponden a condiciones ideales, en condiciones reales es necesario acudir al método de ensayo y error, auxiliándose con técnicas de simulación.

Los trabajos de Alagao (1996), Wang y Seyed-Yagobi (1995) y Sezai y Tasdemiroglu (1995) se ocupan del estudio de este tema, concluyendo con modelos para realizar cálculos y simulaciones con diferentes parámetros.

1.4.3 Concentración de sal

Los especialistas recomiendan construir la zona del gradiente basándose en una función lineal de la altura del estanque, cuya pendiente depende de la concentración establecida para la LCZ y para la frontera inferior de la UCZ.

El campo gravitatorio determina la estabilidad inicial del gradiente de salinidad, debido a que las capas más livianas ocupan posiciones superiores a las capas más pesadas, o de mayor concentración de sales. Esta distribución se modificará con el tiempo debido a los esfuerzos que produce la difusión de la sal y el cambio en la temperatura de las capas del gradiente.

El rendimiento térmico del estanque es similar para un amplio rango de concentraciones y para diferentes tipos de sales. Entonces, lo que prevalece en el diseño son los criterios económicos y las condiciones técnicas del régimen de operación que se quiere imponer para satisfacer la demanda establecida.

La diferencia de concentración de sal entre el fondo y la superficie del estanque produce una difusión de sal desde el fondo con alta salinidad (hasta 26 %) a la zona superficial con baja salinidad (hasta 1 %). El transporte de sal resulta ser del orden de $0.1 \text{ kg/m}^2\text{día}$ (Xu, 1993).

La concentración que se requiere en cada una de las capas está determinada por aspectos físicos y económicos que deben ser evaluados por ensayo y error, y con técnicas de simulación, para establecer el diseño más apropiado. El trabajo de Alagao (1996) es un ejemplo del tipo de simulaciones que se pueden realizar.

1.5 Construcción del gradiente de salinidad

En este apartado se presentan los cálculos y procedimientos que se siguen con la técnica de difusión por pasos discretos. Esta técnica consiste en llenar parcialmente el estanque con brin saturado y posteriormente inyectar agua fresca o de baja salinidad, paso por paso, durante intervalos de tiempo preestablecidos. Se utiliza un disco difusor con pequeños chorros paralelos a la superficie de la capa de solución existente. El difusor se sumerge en los niveles previamente establecidos.

La solución encima del difusor se diluye progresivamente conforme se inyecta el solvente adicional, el nivel superior del agua del estanque sube y la concentración de la capa encima del difusor se hace menor. Este proceso será completado cuando el difusor alcance el nivel final predeterminado.

Antes de aplicar físicamente la técnica es necesario realizar una serie de cálculos para determinar la masa de sal necesaria, la altura inicial de la superficie del brin y el volumen de agua fresca o de baja concentración que se necesita inyectar en cada nivel.

Las secciones 1.5.1 a 1.5.3 presentan las principales ecuaciones que, en la práctica, están involucradas con el establecimiento del gradiente salino (Xu, 1993).

1.5.1 Masa de sal y volumen inicial de la solución salina

Si las paredes del estanque no son verticales y el área varía con la altura, la cantidad de sal necesaria para construir el gradiente salino viene dada por:

$$M = \int_0^H A(z)C(z)dz \quad (1.7)$$

En la expresión (1.7) el símbolo $C(z)$ corresponde a la concentración deseada (kg/m^3) y H es la posición final de la zona del gradiente(m).

El volumen total de solución en la zona del gradiente será:

$$V = \int_0^H A(z)dz \quad (1.8)$$

El principio de conservación de la masa se aplica para encontrar la altura necesaria de la capa de brin a diluir (Z_0^s), para obtener la masa calculada en la ecuación (1.7). Las ecuaciones resultantes son:

$$Q_T C_b + \int_0^{Z_0^s} C_0 A(z)dz = M \quad (1.9)$$

$$Q_T + \int_0^{Z_0^s} A(z)dz = V \quad (1.10)$$

En la ecuación (1.9), C_0 es la concentración del brin que se deposita inicialmente en el fondo del estanque, C_b es la concentración del agua que se inyecta y Q_T es el volumen total de agua que se necesita inyectar para formar la zona del gradiente, de altura H .

Para un área constante a lo largo de la zona del gradiente, la integración y combinación de las ecuaciones (1.9) y (1.10) produce la expresión para calcular la altura inicial de brin saturado Z_0^s :

$$Z_0^s = \frac{(M - C_b V)}{(C_0 - C_b) A} \quad (1.11)$$

1.5.2 Tasa de flujo de agua

El agua se inyecta horizontalmente en cada nivel a una tasa R (m^3/seg). El fluido del ambiente es más pesado y ejerce una fuerza de arrastre que tiende a subir el agua inyectada hacia un nivel superior Z^s . Al inicio del proceso, cuando el tiempo $t=0$, la altura a la que se inyecta el agua corresponde al nivel inicial Z_0^s .

Cada vez que se inyecta agua liviana en el nivel del difusor Z^d , el agua inyectada asciende arrastrando el líquido que encuentra en su camino. El proceso de arrastre va mezclando el agua que está encima de las posiciones intermedias del difusor Z^d , produciendo una mezcla cercanamente homogénea. Una vez la concentración encima de Z^d alcanza el valor deseado en ese nivel, el difusor será movido a otra posición más arriba.

Para que el mezclado sea efectivo se necesita un flujo de agua específico durante un intervalo de tiempo específico. Una velocidad de inyección menor a la necesaria causará mayor mezcla de la que corresponde a ese nivel. Una velocidad

de inyección mayor introducirá un arrastre más fuerte y causará mezcla por debajo de la correspondiente a ese nivel de inyección. El parámetro que se utiliza para indicar un nivel de arrastre adecuado es el número de Froude. Este es un número adimensional que depende de la geometría del difusor que se utiliza para inyectar el agua y del empuje del fluido que se inyecta.

Un típico difusor consiste de un cilindro recto conectado a una manguera, con pequeñas salidas de agua perpendiculares al área del perímetro del cilindro. El número de Froude para esta geometría puede ser expresado así:

$$F_r = \frac{R}{2\pi r d \sqrt{dg \frac{D_{am} - D_i}{D_i}}} \quad (1.12)$$

En la ecuación (1.12), D_i es la densidad del fluido inyectado (kg/m^3), D_{am} es la densidad del fluido ambiente al nivel z_i , R es la tasa del flujo del agua (m^3/s), d es la altura de las ranuras del difusor (m), r el radio del difusor (m), y g es la aceleración de la gravedad (m/s^2).

Los especialistas indican que un valor de 18 está correlacionado con los mejores resultados en la construcción de gradientes salinos. En general son aceptables los valores entre 15 y 20, para el Número de Froude.

1.5.3 Procedimiento de inyección

En la práctica el procedimiento de inyección consiste en mover el difusor en pasos discretos, cada uno de tamaño δz , en cada paso el difusor inyecta agua durante un tiempo δt . El diseño establece el volumen de agua y el tiempo necesario de inyección en cada nivel.

En el primer paso de inyección el difusor está colocado en la frontera inferior de la NCZ, $z = 0$. La concentración en y encima de este nivel después de la inyección está dada por la siguiente expresión:

$$C_1 V_1^a = C_b R \delta t_1 + C_0 V_0^a \quad (1.13)$$

El volumen de la solución encima del difusor, luego del primer paso, es:

$$V_1^a = V_0^a + R \delta t_1 \quad (1.14)$$

Considerando un nivel dado z_i , la concentración en y encima de este nivel C_i resultado de la inyección a este nivel está dada por:

$$C_i V_i^a = C_b R \delta t_i + C_{i-1} (V_{i-1}^a - \delta z A_{i-1}) \quad (1.15)$$

En la expresión (1.15), C_i es la concentración deseada al nivel entre z_{i-1} y z_i ; $R \delta t_i$ es la cantidad de agua requerida para obtener tal concentración a ese nivel.

El volumen V_i^a es el volumen de la solución encima del difusor cuando el paso i -ésimo de inyección ha terminado. Este volumen puede ser expresado como aparece en las ecuaciones (1.16) y (1.17).

$$V_i^a = V_{i-1}^a + R \delta t_i - \delta z A_{i-1} \quad (1.16)$$

$$V_i^a = V_0^a + R \delta t_1 + \sum_{j=2}^i (R \delta t_j - \delta z A_{j-1}) \quad (1.17)$$

En la ecuación (1.17), V_0^a es el volumen inicial de brin saturado y δz es el tamaño de paso del movimiento del difusor, el cual es 0.05 m en la práctica.

La cantidad de agua fresca que se necesita inyectar en el primer paso para obtener la concentración C_1 , en y encima del nivel $z = 0$ se denota con Q_1 , y se puede obtener de la expresión:

$$Q_1 = R\delta t_1 = \frac{(C_0 - C_1)}{(C_1 - C_b)} V_0^a \quad (1.18)$$

Las ecuaciones 1.17 y 1.18 pueden combinarse y resolver para $R\delta t_i = Q_i$, con lo que se encuentra la expresión para calcular la cantidad de agua que se necesita en pasos posteriores. Esto es:

$$Q_i = \frac{(C_{i-1} - C_i)(V_{i-1}^a - \delta z A_{i-1})}{C_i - C_b} \quad (i \geq 2) \quad (1.19)$$

Para una tasa de flujo de agua constante (R), el tiempo requerido para mantener el difusor al nivel z_i es:

$$\delta t_i = \frac{Q_i}{R} \quad (1.20)$$

El nivel superficial aumenta de altura durante el intervalo de tiempo de la ecuación (1.20), la cantidad que asciende viene dada por la ecuación:

$$\delta z_i^s = \frac{Q_i}{A_i^s} \quad (1.21)$$

En la expresión anterior A_i^s es el área de la superficie después del paso de inyección i-ésimo. Después de este paso el nivel de la superficie es:

$$z_i^s = z_{i-1}^s + \delta z_i^s \quad (1.22)$$

Una vez se ha determinado el intervalo de tiempo en cada paso, el tiempo total requerido para establecer el gradiente completo es:

$$t = \sum_{i=1}^N \delta t_i \quad (1.23)$$

De la ecuación (1.23) se encuentra que el número total de pasos que se requiere es $N = H/\delta z$.

1.6 Estabilidad interna del estanque

Las definiciones, datos y ecuaciones que se presentan en este apartado también fueron tomadas del manual del Proyecto El Paso (Xu, 1993).

El gradiente de salinidad es función del gradiente de temperatura según la ecuación (1.24). El término $\left(\frac{Pr+1}{Pr+S_c} \right) \frac{\alpha}{\beta}$ es el coeficiente de estabilidad y es función

de la temperatura y de la salinidad. Las ecuaciones (1.25) a (1.28) complementa a la ecuación (1.24).

$$\left(\frac{\partial S_1}{\partial Z}\right) = \left(\frac{P_r + 1}{P_r + S_c}\right) \frac{\alpha}{\beta} \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (1.24)$$

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_s \quad (1.25)$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial S}\right)_T \quad (1.26)$$

$$S_c = \frac{K_s}{K_T} \quad (1.27)$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\kappa_T} \quad (1.28)$$

La relación Pr se conoce como Número de Prandtl, S_c es la relación de difusión de la sal a la difusión de la temperatura y ρ la densidad de la solución. La densidad de la solución es una función de la temperatura y la salinidad.

El valor teórico del gradiente de salinidad requerido para mantener la estabilidad, dado un gradiente de temperatura, se determina directamente de la ecuación (1.24).

El cálculo de la densidad ρ de una muestra de solución a temperatura T ($^{\circ}\text{C}$) y salinidad S (%) se hace por medio de la ecuación:

$$\rho(S, T) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 A_{ij} S^i T^j \quad (1.29)$$

Los valores de la matriz A_{ij} están dados en la tabla I, para soluciones de cloruro de sodio y temperaturas desde 10 °C a 100 °C, para salinidades (S) desde 0% a 26% y para densidades (ρ) expresadas en kg/m³.

Tabla I. Valores de A_{ij} para calcular la densidad $\rho(S,T)$

$j \setminus i$	0	1	2	3
0	999.90	7.6374	$7.3624 \cdot 10^{-4}$	$4.7088 \cdot 10^{-4}$
1	$2.5920 \cdot 10^{-2}$	$-3.3946 \cdot 10^{-2}$	$7.7952 \cdot 10^{-4}$	$-9.3073 \cdot 10^{-6}$
2	$-5.9922 \cdot 10^{-3}$	$3.7422 \cdot 10^{-4}$	$-1.0436 \cdot 10^{-5}$	$1.4816 \cdot 10^{-7}$
3	$1.5332 \cdot 10^{-3}$	$-9.3860 \cdot 10^{-7}$	$3.2836 \cdot 10^{-9}$	$4.0083 \cdot 10^{-10}$

Fuente: Hu Xu. *Salinity gradient solar ponds a practical manual*. Pág. II-3.4

Los valores de α y β que corresponde a la misma temperatura y salinidad de la ecuación (1.29), vienen dados por las ecuaciones (1.30) y (1.31).

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_S = \frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 j A_{ij} S^i T^{j-1}}{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 A_{ij} S^i T^j} \quad (1.30)$$

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_T = \frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 i A_{ij} S^i T^{j-1}}{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 A_{ij} S^i T^j} \quad (1.31)$$

El coeficiente de la ecuación (1.29) se calcula con la expresión (1.32). Los valores de la matriz B_{ij} se presentan en la Tabla II.

$$\frac{Pr+1}{Pr+Sc} = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 B_{i,j} S^i T^j \quad (1.32)$$

Tabla II. Valores de B_{ij} para calcular el coeficiente de estabilidad

$j \setminus i$	0	1	2
0	1.085	$-1.532 \cdot 10^{-3}$	$1.168 \cdot 10^{-5}$
1	$2.550 \cdot 10^{-3}$	$-3.902 \cdot 10^{-7}$	$-1.935 \cdot 10^{-6}$
2	$2.784 \cdot 10^{-5}$	$-8.203 \cdot 10^{-7}$	$2.757 \cdot 10^{-8}$

Fuente: Hu Xu. *Salinity gradient solar ponds a practical manual*. Pág. II-3.5

La experiencia del Proyecto El Paso ha demostrado que los valores del coeficiente de estabilidad (en %/ °C), en el rango de temperaturas de 4 °C a 100 °C y salinidad de 0% a 25%, varían desde 0.4 hasta 16.1.

El coeficiente de estabilidad se puede controlar a partir de observar el número margen de estabilidad SMN. Este margen se define como la relación entre el coeficiente de estabilidad medido y el coeficiente de estabilidad calculado teóricamente. Para calcular el SMN se utiliza la expresión (1.33).

$$SMN = \frac{dS_a/dZ}{dS_i/dZ} \quad (1.33)$$

El numerador de la ecuación (1.33) es el gradiente de salinidad (%/m) que se calcula de los valores medidos. El denominador es el valor teórico requerido para satisfacer el criterio de estabilidad para el perfil de temperatura medido a lo largo de la zona del gradiente.

En principio, para mantener la estabilidad local, el SMN deberá ser mayor que uno en cada nivel del estanque. Si el SMN es mayor que 2.5, en todos los niveles de medición, entonces la temperatura puede subir sin causar inestabilidad en el estanque.

1.7 Eficiencia de colección del estanque

Akbarzadeh (1992) define una eficiencia global de un estanque solar de gradiente salino, a partir del producto de la eficiencia de acumulación de energía y de la eficiencia de conversión. Esto es:

$$\eta_{global} = \eta_{acumulación} \eta_{conversión} \quad (1.34)$$

La eficiencia de acumulación depende de la transmitancia del agua, la absorbencia de la superficie colectora y del coeficiente de transferencia de calor (U_L). Este coeficiente representa las pérdidas térmicas totales desde la zona de almacenamiento hacia los alrededores, incluye las pérdidas térmicas por conducción, convección y radiación. El coeficiente de transferencia de calor también se acostumbra a representar como el recíproco de una resistencia a la transferencia de calor (R_T), esto es:

$$U_L = \frac{1}{R_T} \quad (1.35)$$

2. MÉTODOS Y MATERIALES

Los elementos considerados en el procedimiento experimental son: a) la configuración y la construcción del estanque experimental; b) el plan de inyección de agua fresca para obtener el gradiente de salinidad y c) el método para estimar la

eficiencia de acumulación y la estabilidad de la zona del gradiente del estanque, a partir de la medición de la temperatura y la salinidad en sus diferentes capas.

También se elaboró un modelo para aproximarse a la predicción de temperaturas en la zona de almacenamiento, para lo cual se realizaron una serie de suposiciones consistentes con las condiciones experimentales y con la información disponible.

2.1 Configuración del estanque experimental

Los parámetros básicos de la configuración del estanque solar experimental se incluyen en la tabla III. La geometría cilíndrica es más conveniente para estanques pequeños debido a que el cilindro tiene el menor perímetro para un área superficial dada, entonces hay menos pérdidas de calor por la superficie lateral. La altura y el área del estanque estuvieron condicionadas por las dimensiones de los depósitos cilíndricos disponibles en la Estación Experimental del CEMA.

Las profundidades de las tres zonas principales se seleccionaron tratando de mantener la proporcionalidad de las configuraciones que se encontraron en otros estudios experimentales, con propósitos y condiciones parecidas a las de este trabajo.

Tabla III. Configuración del estanque solar experimental

Parámetro	Valor
Geometría	Cilindro
Altura del estanque	1.05 m
Radio	0.770 m
Área del fondo y superficie	1.86 m ²
Altura LCZ	0.250 m

Altura NCZ	0.600 m
Altura UCZ	0.150 m
Concentración en LCZ	95.7 g/l – 25.4 g/l
Concentración en UCZ	3.00 g/l

La concentración de la zona superficial (UCZ) corresponde a la concentración que se ha medido para el agua de uno de los pozos de la estación.

Para establecer las concentraciones de la zona del gradiente (NCZ) y de la zona de almacenamiento (LCZ), se elaboró una hoja de cálculo MS-Excel (ver apéndice), con la cual se estimó una distribución lineal para el gradiente de salinidad, considerando la disponibilidad de sal, el caudal de la fuente de agua medido, las dimensiones del difusor y los límites para el Número de Froude, como se detalla en la sección 2.2.

La distribución lineal del gradiente de salinidad se seleccionó en razón de que el campo gravitatorio actúa sobre las capas de solución salina de la NCZ, por lo que es deseable que el gradiente salino cumpla la condición de que las capas más livianas se encuentren arriba de las más pesadas.

Las simulaciones realizadas con la hoja de cálculo 1 han conducido a un perfil de concentración salina representado por la siguiente ecuación:

$$C = -1.171z + 124.98 \quad (2.1)$$

En la ecuación 2.1, (C) es la concentración en kg/m³ y (z) es la altura (m) a la que se encuentra la capa de solución salina. La ecuación que representa la altura como función de la concentración resulta ser:

$$z = -0.8547C + 106.8 \quad (2.2)$$

La ecuación (2.2) produce una altura de 0.25m para una concentración de 25.4 kg/m³ y de 0.85 m para una concentración de 95.7 kg/m³, valores que corresponden a la frontera inferior y superior de la NCZ, respectivamente. En términos de gravedad específica la ecuación (2.1) resulta de la forma:

$$spg = 1.08480 - 0.07883(z) \quad (2.1a)$$

2.2 Plan de inyección de agua de baja concentración

La hoja de cálculo también se utilizó para realizar los cálculos necesarios para establecer un plan de inyección de agua dentro de un estanque de área constante, con el fin de obtener el perfil de concentración salina deseado. El método en el que se basó la elaboración de la hoja de cálculo se resume a continuación.

Primero se estableció una distribución lineal de concentración entre los valores seleccionados para la concentración de la frontera inferior y la concentración de la frontera superior de la NCZ.

La cantidad de sal necesaria (M), para construir la zona del gradiente, se calculó utilizando la ecuación:

$$M = \sum_1^N A_i C_i \delta Z \quad (2.3)$$

Para la formación del perfil de concentración se consideraron N pasos discretos de tamaño δZ , cada uno de concentración C_i y área constante.

El nivel inicial de la superficie del estanque, se estableció con las siguientes relaciones:

$$Q_T C_b + \sum C_0 A_i \delta Z = M \quad (2.4)$$

$$Q_T + \sum A_i \delta Z = V \quad (2.5)$$

$$Z_0^s = n \delta Z \quad (2.6)$$

El símbolo Z_0^s representa el nivel de la superficie al iniciar el proceso de inyección.

La posición inicial del difusor se ubicó en la frontera inferior de la NCZ ($z=0$) y se evaluaron iterativamente las ecuaciones (2.4) a (2.6), para calcular la cantidad de agua que fue necesario inyectar.

El nivel que debe alcanzar la superficie al finalizar cada paso de inyección se calculó considerando el tiempo que necesita permanecer el difusor en cada nivel, suponiendo un flujo constante de agua.

El número de Froude es un valor adimensional cuya magnitud debe estar en un rango de 15 – 20 para que la solución salina, en y encima del nivel de inyección, se mezcle efectivamente.

La forma de calcular el número de Froude depende de la geometría del difusor y para este caso se ha utilizado la expresión propuesta por Xu (1993), es decir:

$$F_r = \frac{R}{2\pi r d \sqrt{dg \frac{D_{am} - D_i}{D_i}}} \quad (2.7)$$

En la expresión anterior R es la tasa del flujo de agua ($3.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$), D_i la concentración del agua inyectada (3.0 kg/m^3) y D_{am} es la concentración de la solución en el ambiente en que se inyecta el agua, la cual varía con la altura.

El símbolo r corresponde al radio del difusor ($2.9 \times 10^{-2} \text{ m}$), d es la altura del paso de agua del difusor hacia el ambiente salino ($3.0 \times 10^{-3} \text{ m}$) y g es la aceleración del campo gravitacional (9.8 m/s^2).

Se utilizaron 67.6 kg (149 lb) de sal rústica, producida en salinas locales, para formar el gradiente y 44.5 kg (98 lb) para formar la zona de almacenamiento. La altura inicial del brin fue de 0.62 m, de los cuales 0.25 m corresponden a la zona de almacenamiento y 0.37 m a la cantidad de brin equivalente inicial, necesario para formar la zona del gradiente.

La tabla IV es un resumen de los resultados de la hoja de cálculo 1, incluye los valores esperados para el número de Froude (quinta columna) y el tiempo requerido en cada uno de los pasos de inyección (tercera columna). La segunda columna se refiere a la posición del difusor por encima de la frontera inferior de la NCZ. La cuarta columna es la concentración esperada cada 5 cm.

Tabla IV. Valores del Número de Froude, durante la inyección de agua.

Paso	Altura (cm)	Tiempo (seg)	Concentración (g/l)	Número de Froude
------	-------------	--------------	---------------------	------------------

1	2.5	65	92.8	15.0
2	7.5	124	86.9	15.6
3	12.5	123	81.1	16.2
4	17.5	121	75.2	16.8
5	22.5	119	69.3	17.5
6	27.5	117	63.5	18.3
7	32.5	113	57.6	19.3
8	37.5	108	51.8	20.4
9	42.5	102	45.8	21.7
10	47.5	92	40.0	23.3
11	52.5	76	34.2	25.3
12	57.5	50	28.3	28.1

2.3 Medición de salinidad y temperatura

Para estimar la eficiencia y la estabilidad del estanque es necesario contar con perfiles de temperatura y salinidad. Las mediciones de la temperatura se realizaron a cada 5 cm por la mañana (entre 6:00 y 7:00 a.m.) y solamente la temperatura de la zona de almacenamiento se realizó por la tarde (entre 16:00 y 17:00 p.m.).

La salinidad se midió con menos frecuencia que la temperatura debido a que el proceso de difusión es bastante lento. Se tomaron muestras del agua del estanque cada 5 cm, con una pipeta graduada y conectada por un tubo plástico a un extractor graduado (parapipeta). La gravedad específica de las muestras se midió con un refractómetro con compensación de temperatura.

Las mediciones de temperatura y de salinidad se realizaron desde la capa más superficial hacia la capa del fondo del estanque, esto es, de la zona de menor salinidad y temperatura a la zona de mayor concentración y temperatura.

2.4 Modelo para predecir la temperatura de la LCZ

Para establecer la validez de las temperaturas medidas en la LCZ se construyó un modelo para estimar la temperatura del fondo del estanque al final del día, conociendo la temperatura medida temprano en la mañana.

Se realizó una adaptación de algunos modelos sencillos encontrados en las referencias consultadas. La literatura especializada presenta modelos más completos, como el de Alagao (1,996) y Taga (1,996), pero estos modelos se aplican a estanques grandes y requieren información más precisa acerca de los parámetros que intervienen en el modelo.

El modelo que se construyó está sujeto a un conjunto de suposiciones que se aproximan razonablemente a las condiciones reales del experimento. Los principales supuestos para este modelo se mencionan a continuación.

La zona superior (UCZ) y la zona inferior (LCZ) son totalmente convectivas, están bien mezcladas y tienen fronteras fijas con la zona del gradiente (NCZ).

El sistema se encuentra bajo condiciones de conducción de calor unidireccional, de régimen estable, es decir, la temperatura resulta ser función de una determinada dirección.

Los efectos debidos a las paredes laterales del estanque, la duración del día, la hora durante la cual se realizaron las mediciones y los errores de procedimiento de medición,

son despreciables al considerar la tolerancia para el promedio diario mensual de radiación solar sobre una superficie horizontal, considerando 6 horas de brillo solar, entre 9:00 a.m. y 15:00 p.m.

La potencia de radiación solar (P_{solar}) que incide en el fondo de la LCZ es convertida en calor sensible de la solución salina que está presente en esa zona y en pérdidas de calor al ambiente, el que se encuentra a una temperatura igual a la temperatura del aire del ambiente.

La irradiancia que alcanza el fondo del estanque se puede expresar, en W/m^2 , por medio de la ecuación (2.8).

$$P_{solar} = 0.31f\alpha A_{LCZ} \overline{I_T} \quad (2.8)$$

En la expresión anterior $0.31f$ es el producto del factor de la transmitancia (0.31) y de la reflectancia ($f = 0.98$) de la luz. La constante α corresponde a la absorbencia de la pintura negra sobre la superficie del fondo del estanque y en promedio es 0.95. El símbolo A_{LCZ} representa el área del fondo de la zona de almacenamiento y el símbolo I_T es la irradiancia diaria promedio mensual.

Las pérdidas ocurren principalmente por la diferencia de temperatura entre la solución salina de la LCZ y la temperatura del aire del ambiente.

La ecuación (2.9) representa las pérdidas de calor hacia el ambiente, sometidas a una resistencia térmica global, que se puede representar con R_T .

$$P_{perdidas} = -(T_{LCZ} - T_{aire})R_T^{-1} \quad (2.9)$$

La potencia neta absorbida por la superficie absorbente es transferida a la solución salina para almacenar calor sensible de acuerdo con la ecuación:

$$P_{neta} = mc_p \frac{dT}{dt} \quad (2.10)$$

Finalmente, la temperatura ambiente de referencia se puede aproximar con el promedio de las temperaturas del aire del ambiente que se midieron en la mañana y en la tarde, del día respectivo.

La formulación del modelo se inició con la combinación de las ecuaciones (2.8) a (2.10), para establecer el balance de energía en la zona de almacenamiento (Dickinson et al, 1975). Este balance de calor viene dado por la siguiente ecuación:

$$mc_p \frac{dT_{LCZ}}{dt} = 0.31 f \alpha A_{LCZ} \bar{I}_T - (T_{LCZ} - T_{aire}) R_T^{-1} \quad (2.11)$$

Para simplificar la nomenclatura se establecieron las transformaciones siguientes:

$$\begin{aligned} C &= mc_p \\ K &= 0.31 f \alpha A_{LCZ} \bar{I}_T \\ T &= T_{LCZ} \\ A &= T_{aire} \\ R &= R_T \end{aligned} \quad (2.12)$$

Entonces, aplicando las transformaciones (2.12), la ecuación (2.11) se transforma en una ecuación diferencial lineal de primer orden de la forma:

$$CT' = K - (T - A)R^{-1} \quad (2.13)$$

La solución general para esta ecuación es:

$$T = [KR + A] + C_0 e^{-t(RC)^{-1}} \quad (2.14)$$

La condición inicial $T(0) = T_0$ conduce a un valor de C_0 dado por:

$$C_0 = T_0 - [KR + A] \quad (2.15)$$

Entonces, la solución para la ecuación (2.13) resulta en la siguiente expresión:

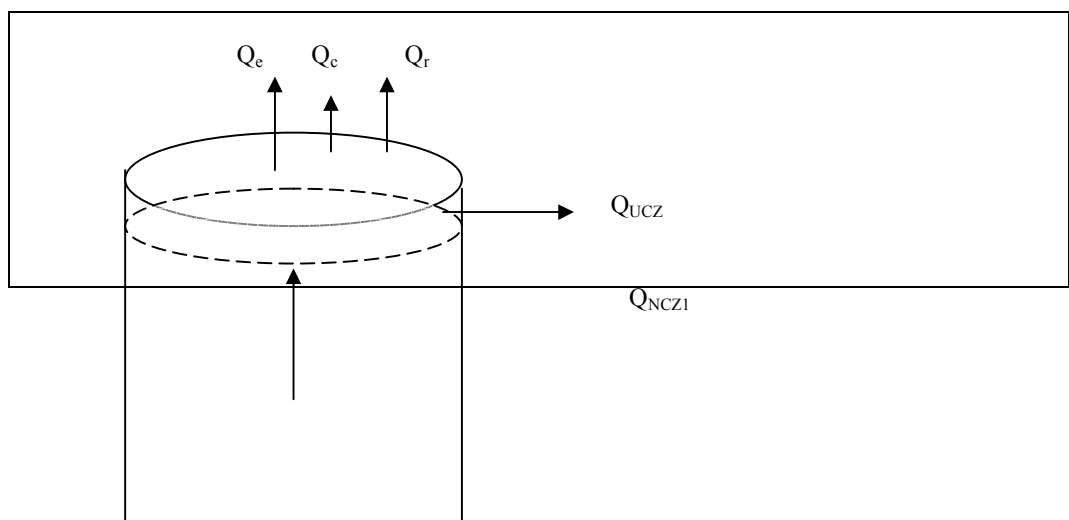
$$T = [T_0 - KR - A] e^{-t(RC)^{-1}} + [KR + A] \quad (2.16)$$

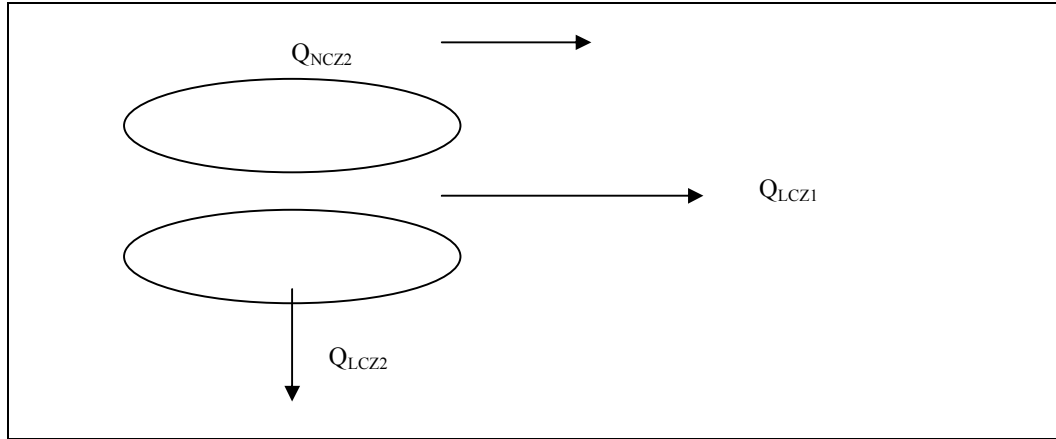
2.5 Modelo para la resistencia total a la transferencia de calor

Para estimar la resistencia total a la transferencia de calor (R_T) se elaboró un modelo similar al de resistencias térmicas que utilizó Neil Ashton (*Solar ponds*, Agosto 1999), basado en una analogía con la ley de Ohm.

La figura 2 es un esquema que presenta los flujos de calor que fueron considerados en el modelo para la resistencia térmica total R_T .

Figura 2. Esquema del flujo de calor en el modelo de resistencias.





Cada uno de los flujos de calor que se representan en la figura 2 tiene asociada una resistencia térmica, dentro de un circuito térmico con características similares a los circuitos eléctricos. El procedimiento que se siguió para estimar la resistencia total se relata a continuación.

En la zona superficial del estanque (UCZ) se pierde calor por evaporación (Q_e), por radiación entre la superficie del estanque y el firmamento (Q_r), por convección de calor hacia el aire (Q_c), y por conducción a través de la pared lateral (Q_{UCZ}).

Para calcular el flujo de calor desde la superficie superior (UCZ) se utilizaron las expresiones resumidas en (2.17), expresiones que se exponen en la sección 1.3.1.

$$\begin{aligned}
 Q_c &= h_c A_s (T_s - T_{aire}) \\
 Q_e &= h_e [C_1 (T_s - T_{aire}) - C_2 (1 - \phi)] \\
 Q_r &= \sigma \varepsilon_s A_s [T_s^4 - T_k^4]
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

En el conjunto de condiciones (2.17), h_c y h_e representan al coeficiente de transferencia de calor por convección y por evaporación, respectivamente. Los símbolos T_s y T_{aire} corresponden a la temperatura de la superficie del estanque y a la temperatura del aire del ambiente. A_s representa el área de la superficie del estanque. C_1 y C_2 son constantes empíricas y ϕ es la humedad relativa. Los símbolos σ y ε_s representan a la

constante de Boltzman y a la emisividad de la superficie del estanque. La temperatura del firmamento está representada por T_K .

A cada uno de los flujos de calor de la serie (2.17) se le puede asociar una resistencia a la transferencia de calor y se puede considerar que se comportan como resistencias térmicas en paralelo, que actúan simultáneamente.

Ashton utilizó esta suposición y define un coeficiente de transferencia de calor (h_{c+e+r}), el cual representa una conductividad térmica que combina los efectos de la convección de calor al aire, de la transferencia de calor por la evaporación y de la transferencia de calor por el intercambio de radiación entre la superficie del estanque y el firmamento. La ecuación para calcular la resistencia correspondiente a la conductividad térmica combinada viene a ser:

$$R_{c+e+r} = (h_{c+e+r} A_s)^{-1} \quad (2.18)$$

Bajo condiciones de laboratorio se produjo un valor de $75 \text{ W/m}^2\text{K}$ para h_{c+e+r} . Seebaluck y Russool realizaron su investigación bajo condiciones externas, fuera de laboratorio. Los datos que se obtuvieron se utilizaron para estimar un valor de h_{c+e+r} y compararlo con el valor propuesto por Ashton.

Para realizar los cálculos se asumió una diferencia de temperatura de $1 \text{ }^\circ\text{C}$, entre la superficie del estanque y la temperatura del aire del ambiente. Estos cálculos produjeron un valor de $74.0 \text{ W/m}^2\text{K}$. Entonces se consideró adecuado el valor de $75.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ para el coeficiente de transferencia de calor, coeficiente que combina los efectos de la convección de calor hacia el aire, la evaporación y la transferencia por intercambio de radiación entre la superficie y el firmamento.

En la pared lateral de la zona convectiva superior (UCZ) también se produce una pérdida de calor debida a la diferencia de temperatura con la temperatura del aire

ambiente. Esta pérdida ocurre por conducción a través de una capa de asbesto-cemento y luego a través de una capa de lana de vidrio con cubierta de aluminio.

La expresión para calcular la resistencia para un recipiente cilíndrico se deriva a partir de la ley de Fourier en su forma escalar, utilizando un sistema de coordenadas cilíndricas y viene dada por:

$$R_{UCZ} = \frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi k_{asbesto} L_{UCZ}} + \frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{2\pi k_w L_{UCZ}} \quad (2.19)$$

En la ecuación (2.19), el símbolo R_1 corresponde al radio interno del cilindro, R_2 al radio interno del cilindro más el grosor de la capa de asbesto y R_3 representa al radio R_2 más el grosor del forro externo de lana de vidrio. Los términos $k_{asbesto}$, k_w y L_{UCZ} corresponden a la conductividad térmica del asbesto-cemento, la conductividad térmica de la lana de vidrio y la profundidad de la UCZ, respectivamente.

En la zona no convectiva (NCZ) se pierde calor a través de la pared lateral (Q_{NCZ1}). Para estimar la resistencia térmica a este flujo de calor también se utilizó la ecuación 2.19, cambiando L_{NCZ} (profundidad de la NCZ) en vez de L_{UCZ} . Un criterio similar se aplicó en la zona de almacenamiento considerando el área del perímetro correspondiente a la LCZ.

En la zona convectiva inferior (LCZ) también se pierde un poco de calor por conducción a través de la NCZ hacia la UCZ (Q_{NCZ2}) y por conducción hacia el suelo (Q_{LCZ2}). En estos dos casos se aplica la ley de Fourier para conducción de calor entre placas paralelas. Esto es:

$$R_{NCZ2} = \frac{L_{NCZ}}{k_{agua} A_s} \quad (2.20)$$

Con la ecuación (2.20) se puede calcular la resistencia térmica ofrecida por la zona del gradiente. La misma fórmula se aplicó para calcular la resistencia térmica al flujo de calor hacia el suelo, cambiando la profundidad de la NCZ por el grosor de la capa de asbesto-cemento y la respectiva conductividad.

A la capa de asbesto-cemento le sigue una capa de block y concreto, que conlleva una resistencia adicional en serie y cuya estimación también se realizó con la ecuación (2.20). Finalmente se encuentra una capa de suelo arenoso que se supone que en promedio se encuentra a una temperatura similar a la de la temperatura del aire del ambiente.

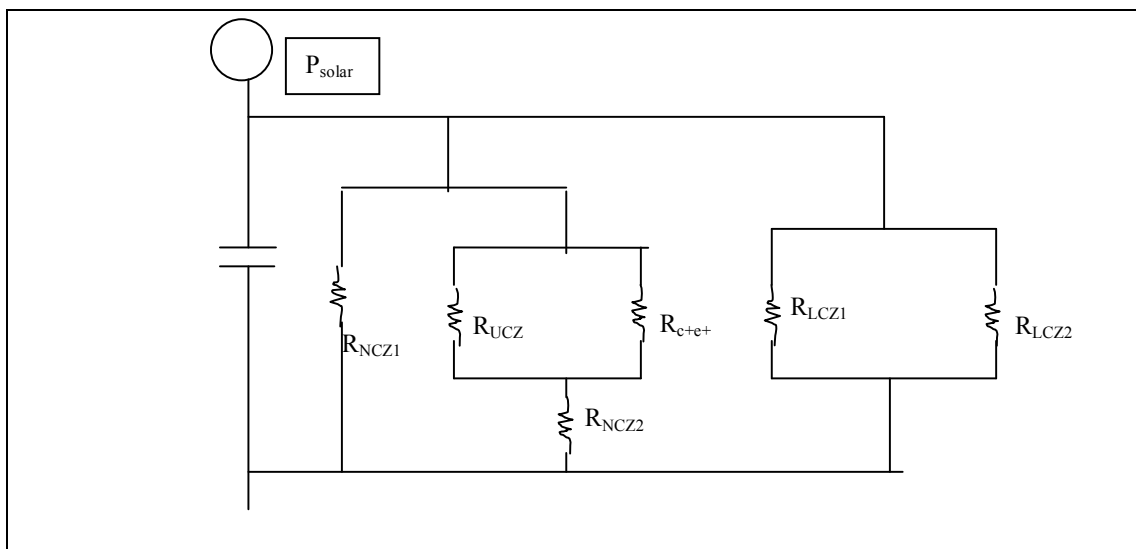
Los valores que se asumieron y se calcularon para las resistencias térmicas involucradas se presentan en la tabla V.

Tabla V. Resistencias correspondientes a los flujos de calor relevantes.

Resistencias	Conductividad k (W/mK)	Área (m ²)	Valor (K/w)
R_{e+c+r} (h=75 (W/m ² K))		1.86	0.0072
R_{UCZ}	Asbesto-cemento = 0.319 Lana de vidrio=0.035	0.942	1.94
R_{NCZ1}	Asbesto-cemento = 0.319 Lana de vidrio=0.035	3.77	0.484
R_{LCZ1}	Asbesto-cemento = 0.319 Lana de vidrio=0.035	1.57	1.16
R_{NCZ2}	Agua en reposo=0.600	1.86	0.538
R_{LCZ2}			67.8

Suelo: asbesto-cemento	Asbesto-cemento = 0.319	1.86	0.0253
Suelo: block y concreto	0.290	1.86	0.556
Suelo arenoso	0.040 (5 m)	1.86	67.2
R_T	Resistencia total		0.21

Figura 3. Circuito de resistencias térmicas.



La figura 3 presenta el diagrama de resistencias térmicas que se aplicó para encontrar la resistencia total R_T . La resistencia total a la transferencia de calor se ha estimado a partir de la ecuación (2.21).

$$R_T = \left[\frac{1}{\left[\frac{1}{R_{LCZ1}} + \frac{1}{R_{LCZ2}} \right]^{-1}} + \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{NCZ1}} + \frac{1}{\left(\frac{1}{R_{UCZ}} + \frac{1}{R_{e+r+c}} \right)^{-1}} + R_{NCZ2} \right)^{-1}} \right]^{-1} \quad (2.21)$$

En la ecuación (2.21), R_{LCZ1} es la resistencia a la transferencia de calor desde la LCZ hacia el exterior de la superficie lateral, R_{LCZ2} es la resistencia a la conducción de calor hacia el suelo desde el fondo del estanque, R_{NCZ1} es la resistencia a la transferencia de calor desde la NCZ hacia el ambiente de la pared lateral, R_{UCZ} es la resistencia a la transferencia de calor desde la UCZ al ambiente externo a la pared lateral, R_{e+r+c} es la resistencia a la pérdida de calor por evaporación, radiación y convección, desde la UCZ, y R_{NCZ2} es la resistencia a la transferencia de calor desde la LCZ a la UCZ.

La radiación solar y otras variables meteorológicas que están asociadas al experimento han sido aproximadas con los datos correspondientes a la estación meteorológica San José Aeropuerto. La estación San José Aeropuerto y la estación Montúfar forman parte del sistema nacional de estaciones meteorológicas del INSIVUMEH, son las más cercanas a la Estación Experimental del CEMA en Monterrico y también se encuentran casi a la misma latitud y altura.

2.6 Eficiencia de colección de energía

El modelo utilizado para calcular la eficiencia de acumulación es una adaptación del modelo denominado Hottel-Whiller-Bliss, que también se puede

aplicar para el estudio de estanques solares convectivos (Hewett, 1977). La ecuación para estimar el promedio diario de la eficiencia de acumulación es:

$$\bar{\eta} = \frac{\rho c_p L}{\Delta t} \frac{T_{max} - T_{min}}{\bar{H}_T} \quad (2.22)$$

La densidad ρ se estimó a partir de primero medir la gravedad específica (s.g) con un refractómetro con compensación de temperaturas a 20 °C, luego las mediciones se transformaron a densidad (kg/m^3) y a salinidad por medio de las ecuaciones (2.23) y (2.24), esto es:

$$\rho(S, T) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 A_{ij} S^i T^j \quad (2.23)$$

$$S = 132.8 \left(\sqrt{1 + 2.156(S.G. - 1)} - 1 \right) \quad (2.24)$$

El valor medio del calor específico c_p se estimó a partir de la gráfica de calor específico contra concentración de sal en %, que se encuentra en el manual del proyecto El Paso (Xu, 1993).

La eficiencia del estanque en un día particular se estimó en función de la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima, que corresponden a las mediciones por la tarde y por la mañana, para el día en cuestión. El intervalo de tiempo Δt corresponde a las horas de brillo solar reportadas por el INSIVUMHE.

2.7 Construcción del estanque experimental

El depósito que se utilizó es un tinaco de asbeto-cemento que forma parte de un complejo de seis que están conectados en serie y ubicados en un sector donde no existen árboles o paredes que produzcan sombra.

La preparación del depósito consistió en: a) limpiar, sellar e impermeabilizar el estanque, b) aplicar tres capas de pintura epóxica negra en el fondo, c) tapar el desfogue inferior con tubería de PVC con su respectivo tapón, d) forrar la superficie lateral con lana de vidrio de dos pulgadas cubierta externamente con papel de aluminio reforzado y e) fijar la lana de vidrio colocando cinta adhesiva, especial para tuberías de agua, a lo largo del perímetro superior para prevenir infiltraciones de agua de lluvia hacia la lana de vidrio.

El estanque se construyó conforme los parámetros establecidos en la tabla III y el plan de inyección de la tabla IV. El procedimiento que se siguió se resume en los pasos siguientes:

- a. Preparar una solución salina con una concentración de 95.7 kg/m^3 en un recipiente de aproximadamente 40 litros y depositarla en el estanque. El proceso se repitió hasta completar una altura de 0.62 m desde el fondo del estanque. La mezcla depositada se batió con una paleta grande y se inyectó aire a presión con una manguera conectada a una bomba de aire (*bowler*), para lograr mayor efectividad en la mezcla.
- b. Tomar muestras de la solución salina para medir su gravedad específica en el laboratorio.
- c. Medir el caudal del difusor en un ambiente de agua con concentración parecida al de la concentración inicial del agua del estanque.

- d. Colocar el difusor en la altura apropiada e inyectar agua a partir de la frontera superior de la LCZ hasta completar el tiempo establecido en el plan de inyección de agua. Este paso se repitió cada 5 cm hasta completar la altura de la capa de gradiente de salinidad NCZ, es decir 0.85 m desde el fondo del estanque.
- e. Inyectar agua en la parte superior de la frontera de NCZ hasta completar la altura correspondiente para la UCZ. Este paso se repitió aproximadamente cada dos días para lavar y recuperar el agua superficial perdida por evaporación. En realidad la UCZ siempre ha tenido entre 2 y 5 cm más que los 15 cm considerados en las mediciones. Además, con una pipeta ocasionalmente se extrajo agua para restablecer la concentración inicial.
- f. Construir una cubierta de plástico con perímetro de tubo de caucho, para proteger el estanque del viento y la lluvia. Esta cubierta se perforó con agujeros de 10 mm para limitar el efecto invernadero. Con la cobertura de plástico también se limitó el proceso de formación de algas y deposición de basuras.

2.8 Estabilidad del gradiente

El gradiente de salinidad permanece no convectivo y actúa como aislante transparente en tanto que la tasa de incremento de temperatura no sea mayor que la permitida por la tasa de incremento de salinidad, ambas con respecto a la profundidad.

La estabilidad del gradiente salino se observó a partir del número margen de estabilidad (SMN) que fue definido con la ecuación (1.33).

El manual del proyecto El Paso indica que el valor límite del número margen de estabilidad SMN debe ser 2.5 (Xu, 1993). Se elaboró una hoja de cálculo MS-Excel (hoja de cálculo 2) para calcular el número de margen de estabilidad (SMN), a partir de las mediciones que se hicieron de la temperatura y de la salinidad.

2.9 Turbiedad del agua

La turbiedad del agua se evaluó por inspección. Para observar la turbiedad del agua se utilizó una pequeña esfera de cemento pintada con franjas blancas y negras. Al introducir la esfera a diferentes niveles del estanque se puede apreciar la transparencia que tiene la capa de agua.

2.10 Material y equipo

Las dos fotografías de la figura 3 corresponden a vistas del ambiente y del tinaco utilizado como recipiente para construir el estanque solar experimental, el cual se identifica por el forro plateado. Este forro plateado corresponde a una tela de aluminio que cubre el aislante térmico de la lana de vidrio que se utilizó para simular el aislante que se aplica a un estanque solar construido bajo tierra.

El material de los depósitos es asbesto-cemento y está fijado al suelo por medio de una plancha de cemento. Los estanques se encuentran conectados por tuberías subterráneas. En el pasado se utilizaron para crianza de peces decorativos. El material del cual están hechos no es apropiado para el tratamiento de hidrobiológicos por lo que constituyen una infraestructura que puede utilizarse para propósitos de almacenamiento de agua calentada con energía solar.

Figura 4. Fotografías del estanque experimental y su ambiente



Las fotografías que corresponden a las figuras 5 y 6 presentan algunos de los instrumentos de medición y del equipo que se utilizó para construir el gradiente de salinidad y para medir la temperatura y la salinidad en el estanque.

Figura 5. Difusor con flotadores y termómetros



Figura 6. Balanza analítica y muestras de agua del estanque



Los termómetros de inmersión, HACH y LAMOTE, que se utilizaron en los ensayos preliminares se sustituyeron por un termómetro digital Robertshaw, para hornos industriales, el cual tiene un sensor de termocupla con capacidad de respuesta más rápida y estable, y con una precisión de ± 0.1 °C.

Figura 7. Ensayo de técnica de construcción de gradiente



La fotografía de la figura 7 presenta la posición del difusor durante un ensayo de técnica de llenado. Los flotadores hacen que el difusor suba conforme se inyecta agua de pozo, esta técnica produce un gradiente que demostró tener resultados como aislante térmico, pero no permite la evaluación de indicadores importantes como el número de margen de seguridad (SMN). Entonces, fue necesario introducir modificaciones en el difusor.

El difusor con flotadores se sustituyó por un difusor construido con un anillo de tubo de PVC de 5.8 cm de diámetro y 5 cm de alto. El anillo se selló, en los dos extremos, con tapones para tubería PVC. En la parte interna del tapón inferior se ha fijado una pequeña plomada para superar el empuje de la solución. Entre los dos tapones quedó libre una cinta de PVC de aproximadamente 1 cm. A lo largo de esta cinta se perforaron agujeros de 0.003 m de diámetro para el flujo horizontal del agua inyectada en cada nivel. El tapón superior se horadó para fijar una manguera conectada a la fuente de agua. El difusor se condujo hacia arriba y hacia abajo a través de una guía formada con una unión de derivación de tubo PVC en forma de T. Dos extremos de la unión T se conectaron y sellaron a dos tubos de PVC de 0.60 m. Una varilla de hierro se atravesó a lo largo de los dos tubos y la unión en forma de T, para poder apoyar el sistema sobre las paredes del depósito del estanque. La manguera del difusor se introdujo por uno de los tubos laterales y se extrajo por el extremo libre de la unión en forma de T.

La salinidad de las muestras se midió a través de la densidad utilizando la balanza analítica del laboratorio de la Estación Experimental y la gravedad específica medida con un refractómetro A366ATC, los mejores y más rápidos resultados se obtuvieron con el refractómetro. En el laboratorio se producen corrientes de aire que afectan la precisión de la balanza y además la temperatura no se puede controlar. Por el contrario, el refractómetro tiene compensación de temperatura y una precisión de 0.001spg.

La fotografía de la figura 8 corresponde a un ensayo en las técnicas de medición de temperatura, utilizando un termómetro de inmersión y una regla graduada. La experiencia de estos ensayos sirvió para mejorar el procedimiento de medición, incluyendo la estimación de tiempos de respuesta de los instrumentos.

Figura 8. Medición de temperaturas por la mañana



Figura 9. Ensayo de técnica de medición más estable



La figura 9 presenta una fotografía del momento en que se hace un ensayo de medición que posibilita tener más tiempo al sensor del termómetro en una posición estable, en cada nivel de medición. Para este tipo de sensores el tiempo de respuesta es de alrededor de 1/2 minuto.

Las tapaderas de fibra de fibra de vidrio de la figura 8 y de plástico de la figura 9, se elaboraron para proteger a los estanques de la evaporación, de la deposición de basuras y de la formación de algas en la superficie. Estas tapaderas se perforaron con agujeros de 0.005 m con lo que se limita el efecto invernadero. Una tapadera similar de plástico se elaboró para proteger el estanque experimental.

Figura 10. Romana para pesar la sal



La fotografía de la figura 10 se tomó en el momento que se pesó la sal en uno de los ensayos preliminares. Las mediciones del laboratorio demostraron que con esta técnica se pueden obtener valores cercanos a los previstos, a pesar de la humedad de la sal que se utilizó y de las dificultades al disolverla.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis cuantitativo requiere condiciones experimentales con procedimientos y variables bajo control, así como la posibilidad de realizar réplicas. Ninguna de estas condiciones se han cumplido en el ambiente natural y con los instrumentos y equipo disponible en la Estación Experimental del CEMA. Los resultados se han limitado a la obtención de experiencia operativa y como fuente de información cualitativa para la realización de futuras investigaciones y para la aplicación de técnicas de simulación con conocimiento de condiciones reales de operación.

En el apéndice se incluye la hoja de cálculo que se utilizó para el análisis de error correspondiente al cálculo de la eficiencia de acumulación de calor en la LCZ. Este análisis de error se basó en la precisión de los instrumentos utilizados y los errores reportados por las fuentes consultadas. La propagación del error (Taylor, 1982) produjo un error cuadrático medio de aproximadamente 20%, que corresponde al margen de tolerancia de las mediciones de radiación solar (Godínez, 1995).

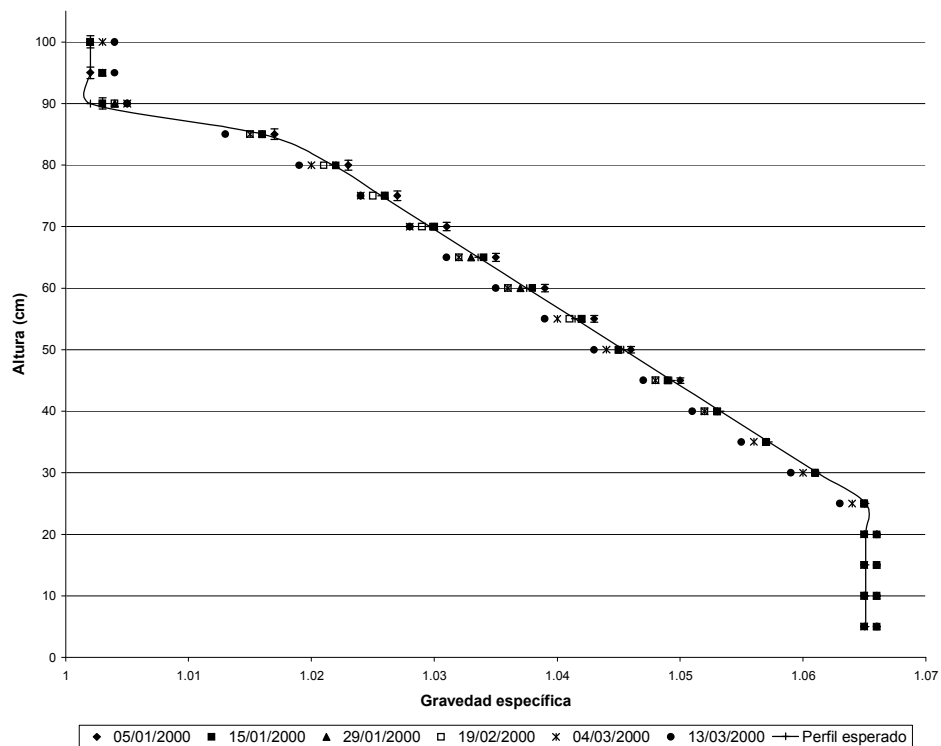
3.1 Perfiles de salinidad

La salinidad se midió en unidades de gravedad específica a partir de muestras de agua tomadas cada 5 cm. Estas mediciones se realizaron en seis días más o menos igualmente espaciados durante el período de observación y alrededor de las 18:00 p.m.

El refractómetro que se utilizó para medir la salinidad tiene compensación automática de temperatura y una precisión de ± 0.001 spg.

La figura 11 presenta el perfil de salinidad esperado, que consiste de una recta entre las fronteras, superior e inferior, de la zona no convectiva (NCZ). Alrededor de esta recta se ubican los puntos correspondientes a las mediciones experimentales. En este gráfico se observa que los puntos de la salinidad medida en los primeros días están por encima de la recta del perfil deseado, en tanto que para los puntos correspondientes a mediciones de los últimos días ocurre lo contrario, están por debajo de la recta.

Figura 11. Perfil de salinidad esperado y perfiles de salinidad medidos entre el 5 de enero y el 11 de marzo



3.2 Perfiles de temperatura

Las figuras 12 a 15 representan los perfiles de temperatura para 18 días en los cuales se midió la temperatura, cada 5 cm, entre 6 y 7 a.m. En el eje de las ordenadas se encuentran los valores para las alturas (cm) y en el eje de las abscisas los valores para las temperaturas medidas (°C). La precisión del termómetro fue 0.1 °C.

Al superponer los perfiles se observa el desplazamiento hacia arriba y hacia abajo, conforme pasan los días. En la parte del gráfico que corresponde al fondo del estanque se presenta una inflexión en la curva como consecuencia de la disminución de la temperatura, por el calor que se pierde hacia el suelo.

Figura 12. Perfiles de temperatura del 3 al 16 de enero, tomadas de 6:00 a 7:00 a.m.

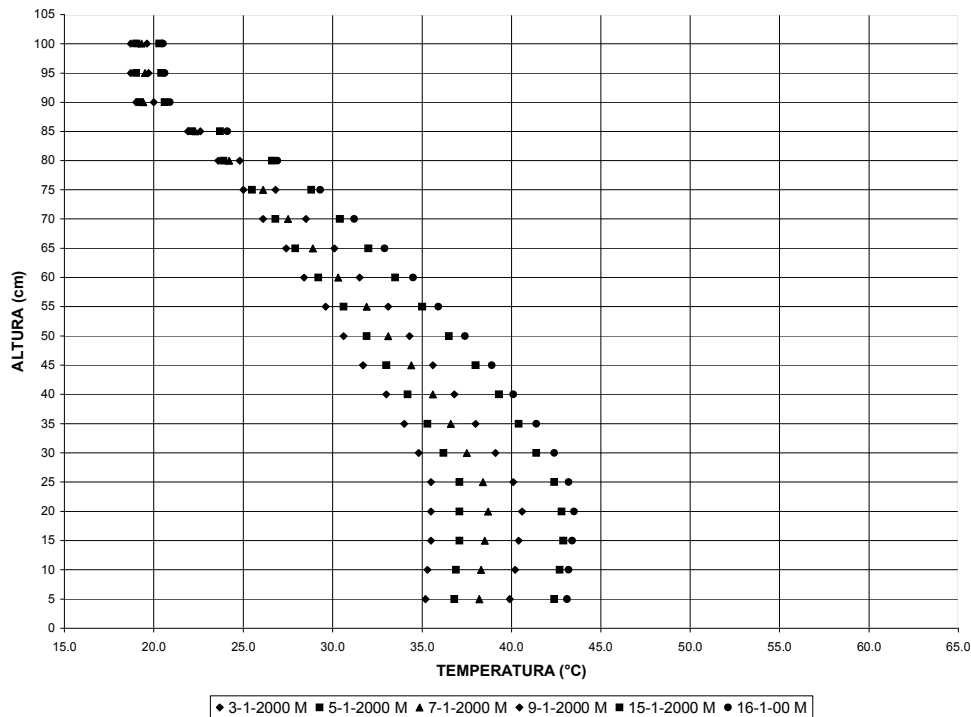


Figura 13. Perfiles de temperatura del 23 de enero al 12 de febrero, tomadas de 6:00 a 7:00 a.m.

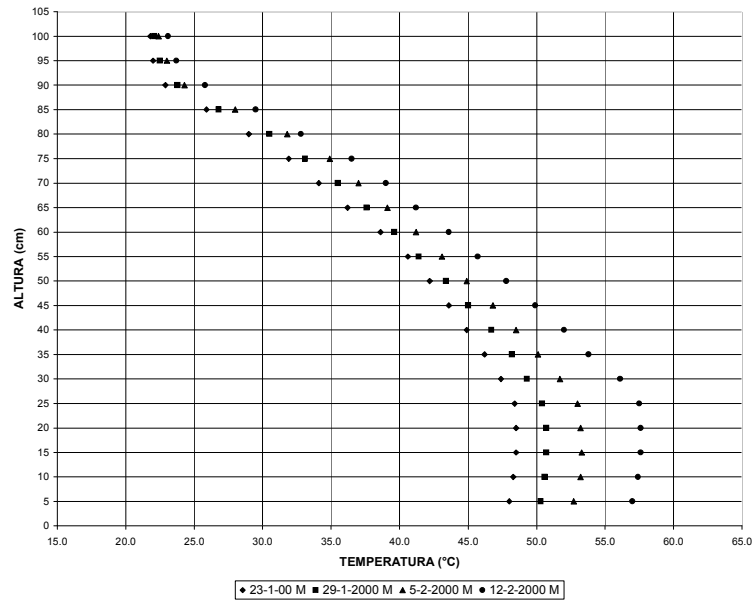


Figura 14. Perfiles de temperatura del 19 al 27 de febrero, tomadas de 6:00 a 7:00 a.m.

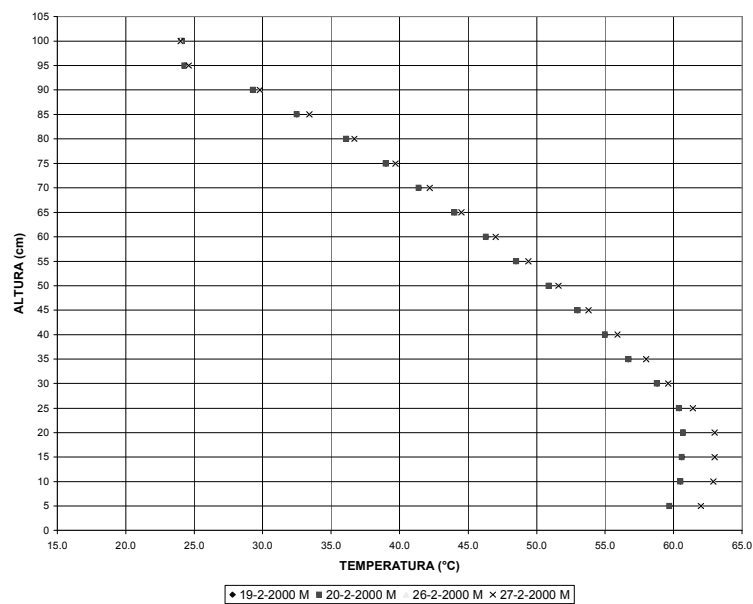
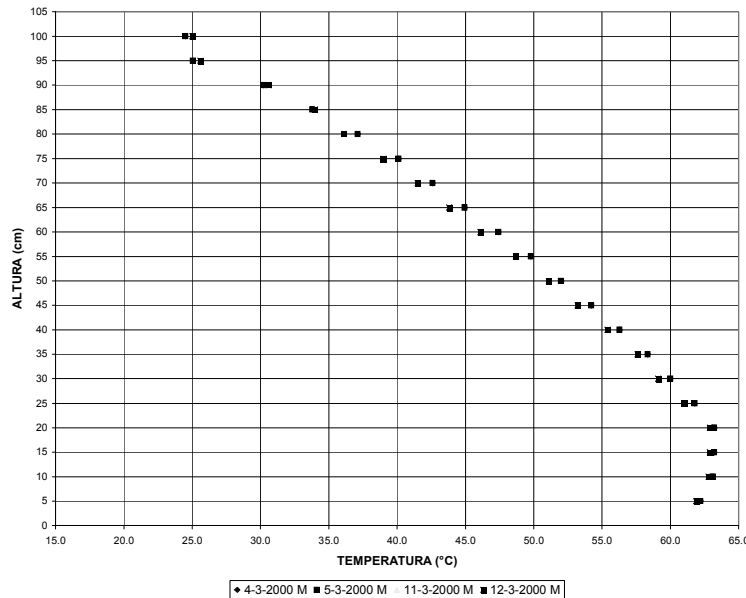


Figura 15. Perfiles de temperatura del 4 al 12 de marzo, tomadas de 6:00 a 7:00 a.m.

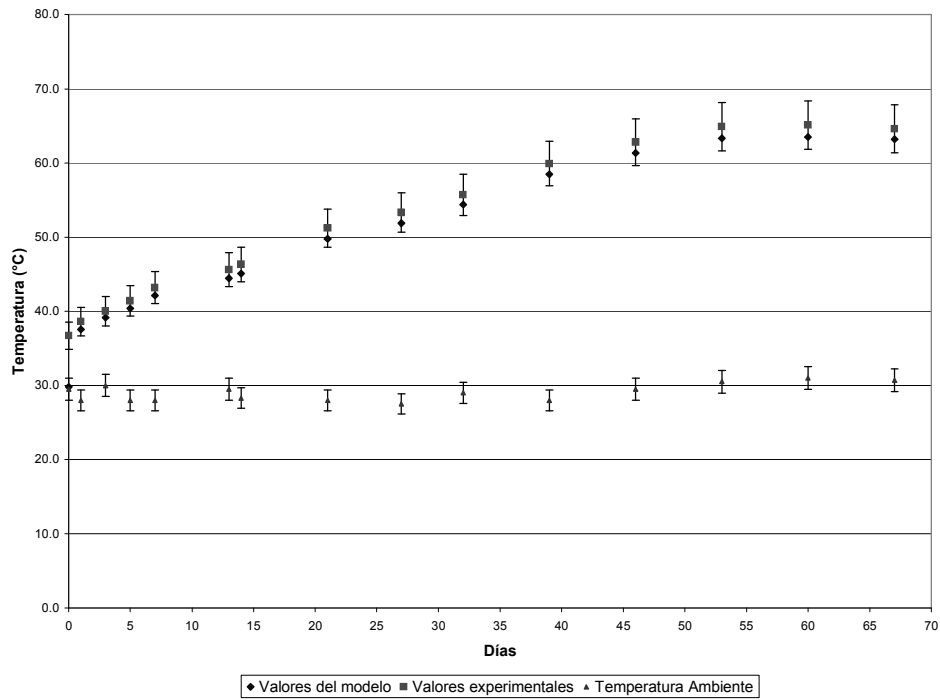


3.3 Evolución de temperaturas en la LCZ

Se registraron las temperaturas de la zona de almacenamiento a finales de la tarde para 15 días del período de observación. Estas temperaturas están relacionadas con el rendimiento del estanque como se explica en la próxima sección. La figura 16 representa la evolución de la temperatura ambiente (T_a) y de la temperatura en la zona de almacenamiento (TLCZ), así como la temperatura estimada con el modelo que se discutió en el capítulo 2.

En la figura 16 se observa que todos los valores que predice el modelo caen dentro de la franja inferior del intervalo de $\pm 5\%$ de los valores medidos durante el período de observación experimental.

Figura 16. Evolución de las temperaturas de la LCZ, valores según modelo y valores experimentales



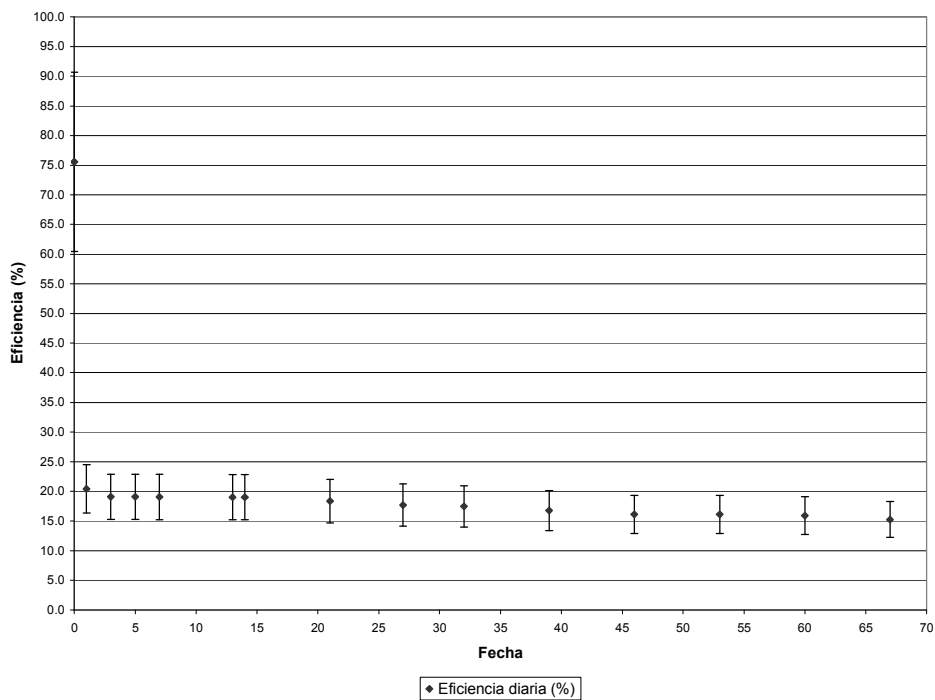
La nube de puntos de la figura 16, correspondiente a los valores calculados con las medidas experimentales y los valores predichos por el modelo, tienen formas muy similares y se encontró un coeficiente de correlación de 0.99 entre los valores observados y los valores calculados.

3.4 Eficiencia de acumulación

La eficiencia del estanque experimental para acumular energía térmica en la zona de almacenamiento (LCZ) fue de 75.6 % durante el primer día, 2 de enero. La figura 16 presenta la eficiencia estimada para 14 días de observación, entre el 3 de enero y el 11 de marzo, durante los cuales el estanque estuvo expuesto a la radiación solar y no se extrajo calor más que el perdido en forma natural.

El margen de error que se estimó es 20%, los resultados y procedimientos para calcular este error se presentan en el apéndice.

Figura 17. Eficiencia de acumulación de energía en la LCZ del 2 de enero al 11 de marzo



En la tabla VI se presentan los resultados obtenidos para la eficiencia diaria de acumulación. Esta eficiencia se calculó en función del aumento de la temperatura promedio de la masa de brin en la zona de almacenamiento LCZ, durante el período desde la salida hasta la puesta del sol, segunda columna de la tabla VI.

El número de minutos de brillo solar, quinta columna de la tabla VI, se obtuvo a partir de los datos del INSIVUMEH, y corresponden al promedio diario mensual para cada mes.

El tiempo de brillo solar correspondiente al primer día es menor que los otros días porque el estanque se terminó de construir alrededor de las 9:30 de la mañana.

La densidad de la solución, cuarta columna de la tabla VI, se corrigió según la temperatura de la solución salina en la LCZ.

Tabla VI. Eficiencias diarias de colección de calor en la LCZ del estanque

Fecha	Cambio de T (°C)	T de la LCZ (°C)	Densidad (g/cm ³)	Radiación solar (cal/cm ² -min)	Tiempo (min)	Eficiencia (%)+/-20%
2-1-2000	9.5	36.7	1.058	0.68	450	75.5
3-1-2000	3.2	38.6	1.057	0.68	561	20.4
5-1-2000	3.0	40.0	1.056	0.68	561	19.1
7-1-2000	3.0	41.4	1.055	0.68	561	19.1
9-1-2000	3.0	43.2	1.055	0.68	561	19.1
15-1-2000	3.0	45.6	1.054	0.68	561	19.1
16-1-2000	3.0	46.3	1.053	0.68	561	19.0
23-1-2000	2.9	51.2	1.051	0.68	561	18.4
29-1-2000	2.8	53.3	1.050	0.68	561	17.7
5-2-2000	2.6	55.7	1.048	0.66	544	17.5
12-2-2000	2.5	59.9	1.046	0.66	544	16.8
19-2-2000	2.4	62.8	1.045	0.66	544	16.1
26-2-2000	2.4	64.9	1.043	0.66	544	16.0
4-3-2000	2.4	65.1	1.043	0.68	535	15.8
11-3-2000	2.3	64.6	1.044	0.68	535	15.2

El aumento en la diferencia de temperatura en la zona del gradiente y sus fronteras tienden a destruir el equilibrio del estanque, entonces el cálculo de eficiencias tiene sentido en tanto que el estanque se mantenga en equilibrio y la zona del gradiente mantenga su propiedad de aislante térmico. Como se demuestra más adelante, el estanque mantuvo un equilibrio aceptable durante 63 días, posteriormente comenzó a generar pérdidas de calor más fuertes que reflejan el deterioro de la zona del gradiente por las tensiones de las diferencias de temperatura y la difusión de la sal.

3.5 Estabilidad del gradiente de salinidad

La tabla VII presenta los polinomios de tercer orden para ajustar los datos de cada uno de los perfiles de temperatura obtenidos.

Tabla VII. Polinomios de ajuste de perfiles de temperatura

Fecha	Polinomio de tercer orden
5-1-00	$-1.1655E-06x^3 - 8.3866E-04x^2 - 1.4457E-01x + 4.1328E+01$
15-1-00	$-2.5408E-05x^3 + 2.0365E-03x^2 - 2.7898E-01x + 4.8627E+01$
29-1-00	$-2.8904E-05x^3 + 1.6364E-03x^2 - 2.8226E-01x + 5.7057E+01$
19-2-00	$-2.4476E-05x^3 + 1.7308E-03x^2 - 4.0913E-01x + 7.0038E+01$
4-3-00	$-1.3462E-05x^3 + 6.9056E-05x^2 - 3.3788E-01x + 7.0473E+01$
11-3-00	$2.7040E-05x^3 - 5.8501E-03x^2 - 7.6900E-02x + 6.6113E+01$

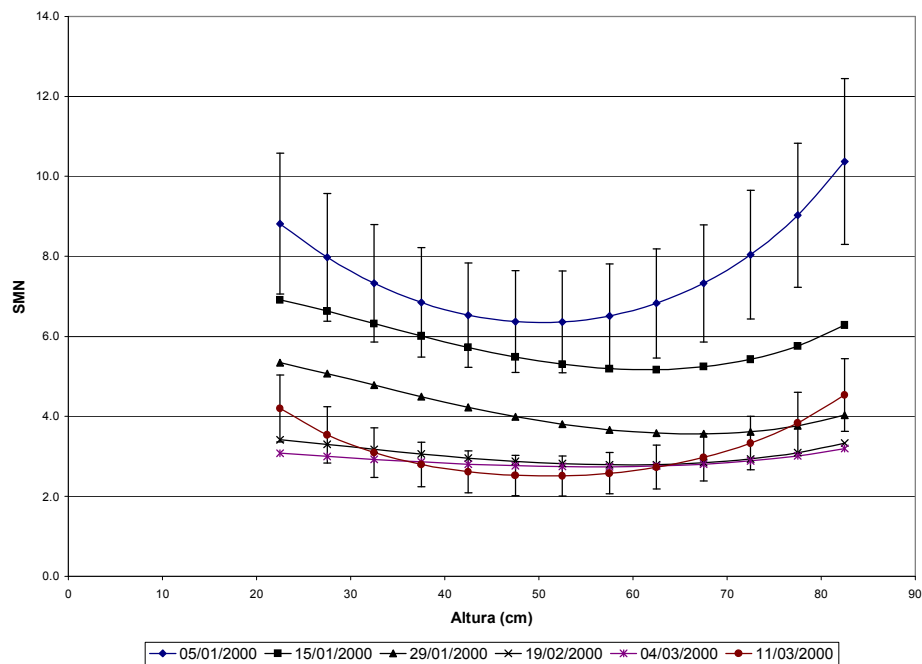
De forma similar a los perfiles de temperatura, se construyeron polinomios de tercer orden para ajustar los perfiles de salinidad, que se presentan en la tabla VIII. En ambos casos los coeficientes de determinación están entre 0.98 y 0.99. Estos polinomios se utilizaron para estimar el número de margen de estabilidad (SMN).

Tabla VIII. Polinomios de ajuste de perfiles de salinidad

Fecha	Polinomio de tercer orden
5-1-00	$-9.0909E-08x^3 + 1.3382E-05x^2 - 1.3605E-03x + 1.0921E+00$
15-1-00	$-8.3916E-08x^3 + 1.2827E-05x^2 - 1.3871E-03x + 4.8627E+00$
29-1-00	$-5.8275E-08x^3 + 9.2559E-06x^2 - 1.2243E-03x + 1.0911E+00$
19-2-00	$-6.0606E-08x^3 + 9.8801E-06x^2 - 1.3099E-03x + 1.0928E+00$
4-3-00	$-2.5641E-08x^3 + 3.7912E-06x^2 - 9.7491E-04x + 1.0865E+00$
11-3-00	$-8.3916E-08x^3 + 1.2907E-05x^2 - 1.4113E-03x + 1.0919E+00$

El número de margen de estabilidad (SMN) es el criterio que se utilizó para establecer el grado de estabilidad del estanque experimental. Los valores del número margen de estabilidad (SMN) se calcularon para seis días y se representan en la figura 18.

Figura 18. Número de margen de estabilidad (SMN), según la altura del estanque



Las curvas de la figura 18 tienen un comportamiento que representa la evolución de la estabilidad a lo largo de la zona del gradiente. La mayor tensión para erosionar el gradiente se da en las capas medias de la zona del gradiente. Conforme transcurre el tiempo los valores del número de margen de estabilidad (SMN) tienden a disminuir, en este experimento se ha obtenido una tendencia hacia un valor límite cercano a 2. El valor límite sugerido por la literatura especializada es 2.5. Las barras de error corresponden a un 5 %.

La tabla IX presenta los valores para el número de margen de estabilidad (SMN) calculado cada 5 cm en la zona del gradiente y en las fechas que se hicieron mediciones de salinidad. Como se esperaba, los valores más altos se encuentran en los primeros días.

Tabla IX. Número de margen de estabilidad (SMN)

Altura (cm)	5-1-00	15-1-00	29-1-00	19-2-00	4-3-00	11-3-00
82.5	10.4	6.3	4.0	3.3	3.2	4.5
77.5	9.0	5.8	3.8	3.1	3.0	3.8
72.5	8.0	5.4	3.6	2.9	2.9	3.3
67.5	7.3	5.2	3.6	2.8	2.8	3.0
62.5	6.8	5.2	3.6	2.8	2.8	2.7
57.5	6.5	5.2	3.7	2.8	2.7	2.6
52.5	6.4	5.3	3.8	2.8	2.7	2.5
47.5	6.4	5.5	4.0	2.9	2.8	2.5
42.5	6.5	5.7	4.2	3.0	2.8	2.6
37.5	6.8	6.0	4.5	3.1	2.9	2.8
32.5	7.3	6.3	4.8	3.2	2.9	3.1
27.5	8.0	6.6	5.1	3.3	3.0	3.5
22.5	8.8	6.9	5.3	3.4	3.1	4.2

3.6 Temperatura ambiente y velocidad del viento

La figura 19 presenta el comportamiento de la temperatura media del día (TMedia), la temperatura máxima del día (Tmáxima) y la temperatura mínima del día (Tmínima). La figura 20 corresponde a la velocidad promedio (v promedio) y a la velocidad máxima del viento (v máxima). En la figura 21 se presenta el comportamiento de los grados de enfriamiento (d . enfriamiento), el punto de rocío y la visibilidad, que son otras variables de interés en el estudio de sistemas fototérmicos.

Figura 19. Evolución de la temperatura de la zona de almacenamiento (LCZ) y otras temperaturas de referencia

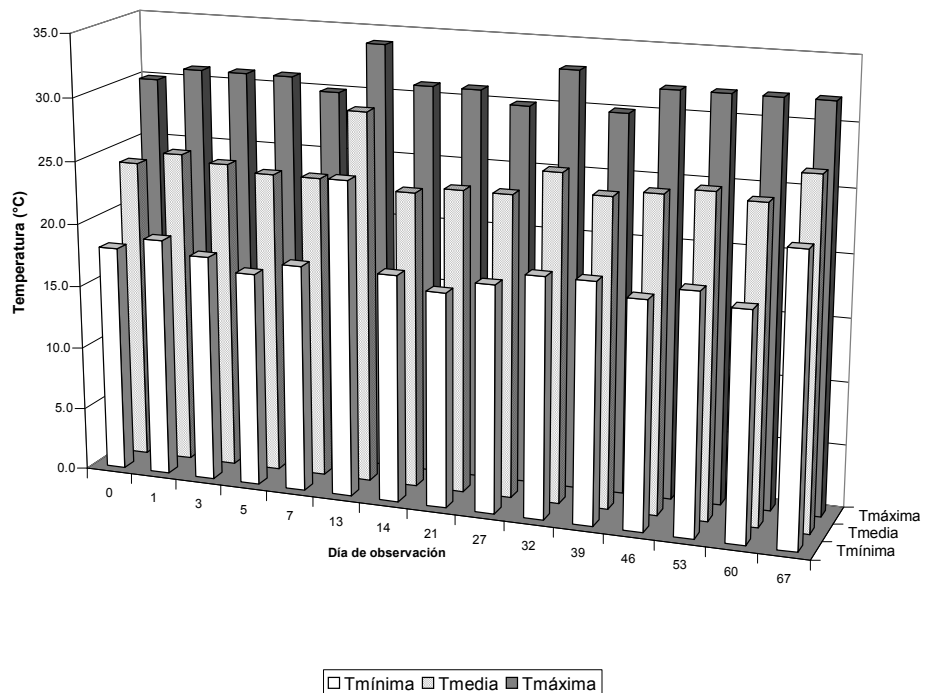


Figura 20. Velocidad promedio del viento y velocidad máxima durante los días de observación

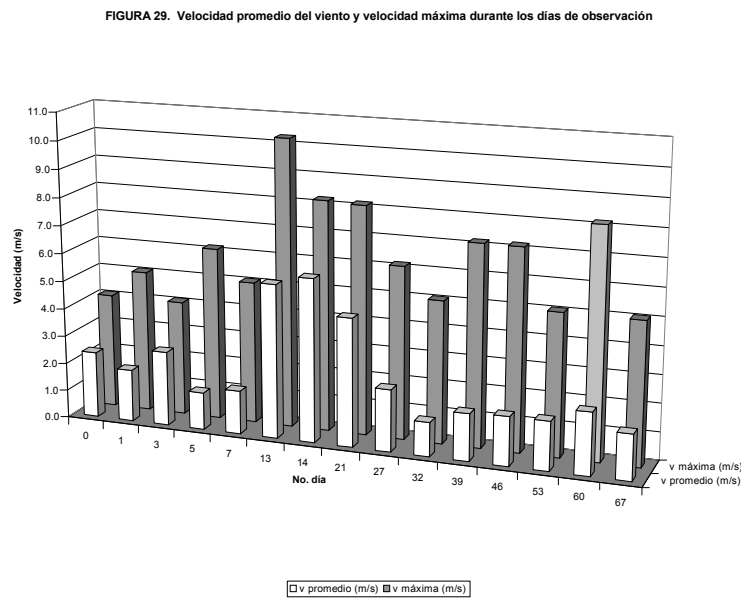
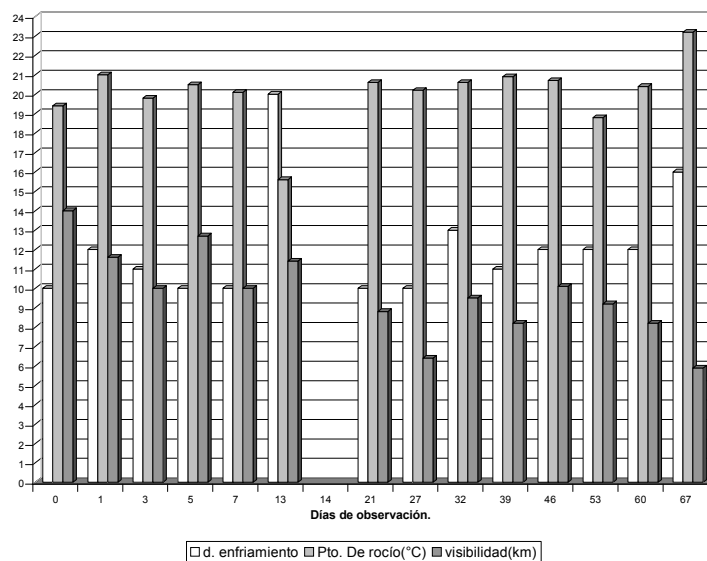


Figura 21. Otras variables meteorológicas: grados de enfriamiento (°C), punto de rocío (°C) y visibilidad (km).



3.7 Discusión

La temperatura en la LCZ después del primer día de calentamiento fue de alrededor de 37 °C, valor que aún está bastante lejos del valor máximo esperado de 60 °C. El valor máximo que se obtuvo durante los días de observación fue de 65 °C, que es 5°C mayor que la temperatura más alta que se esperaba. Esta temperatura máxima en la zona de almacenamiento ocurrió en el intervalo de 53 a 60 días del período de calentamiento.

Si se toma como temperatura inicial a la temperatura promedio de la LCZ, medida el segundo día por la mañana (35.4 °C), la diferencia respecto del máximo (65 °C) produce una tasa de calentamiento de aproximadamente medio grado por día. Esta tasa de calentamiento es alrededor de la mitad de la reportada por el proyecto El Paso (Xu, 1993).

La resistencia total a la transferencia total se estimó con un valor de 0.22 (K/W). El error de estimación no se determinó debido al desconocimiento de la precisión de los datos utilizados.

Las temperaturas medidas se correlacionan bastante bien con las temperaturas estimadas por el modelo para predecir temperaturas en la zona de almacenamiento (LCZ). La nube de puntos de las temperaturas medidas sigue el mismo patrón que el de las temperaturas calculadas con el modelo, ligeramente desplazada hacia arriba, un intervalo menor al 5 %.

El primer día de calentamiento resultó con una eficiencia de 75.6 %. No se encontró un valor de referencia para comparar esta eficiencia inicial pero se esperaba un valor alto debido a que el aumento de temperatura ocurre desde una temperatura cercana a la temperatura del aire del medio ambiente.

La eficiencia en la zona de almacenamiento disminuye conforme aumenta la temperatura en la zona de almacenamiento. El rango de la eficiencia a partir del segundo día es de 20.4 a 15.3 % y el promedio para los 67 días 17.8 %.

El análisis de error produjo un error cuadrático medio cercano al 20 %, que es la tolerancia establecida para los datos de radiación solar. Entonces, el intervalo de 17.8 % +/- 20 % (14.2 %, 21.4 %) contiene el promedio de eficiencia de acumulación del estanque experimental, durante el período de tiempo desde el calentamiento inicial hasta el momento que la estabilidad comienza a perderse, aproximadamente 60 días después.

Los primeros dos días ocurren valores de eficiencia como los considerados en la hipótesis de investigación, no obstante, el intervalo de eficiencias (14.2 %, 21.4%) contiene el valor mínimo establecido en la hipótesis, con un nivel de confianza no establecido.

Para calcular la eficiencia se consideró la radiación solar global, sin el efecto del factor de visión debido a la sombra de las paredes del estanque. Entonces, el intervalo de eficiencia de acumulación que se estableció puede considerarse como una hipótesis conservadora para el diseño de estanques pequeños y de construcción rústica. Para estanques con áreas superficiales grandes el efecto de las sombras de las paredes no es importante, por lo que la hipótesis se puede extender a estanques mayores.

Las curvas para el SMN corresponden a valores de estabilidad bastante aceptables, comparadas con resultados de otros casos (Xu, 1993). A partir de un valor del SMN cercano a 2.5 en las capas intermedias, el estanque comienza a perder su capacidad de aumentar la temperatura, como se observa en los perfiles de temperatura posteriores al 11 de marzo.

Los valores calculados del SMN sugieren que este tipo de estanque puede ser bastante robusto, a pesar de sus limitaciones geométricas y lo rústico del material utilizado para su construcción. El estanque fue capaz de mantener su estabilidad durante más de tres meses antes de que surgieran evidencias de la necesidad de introducir correctivos para mantener la estructura y la estabilidad del gradiente. Esto se confirma con observar los perfiles de salinidad que reflejan cambios menores en la estratificación de la solución salina.

Este tipo de acumulador entonces resulta ser barato y efectivo, pero presenta dificultades en su construcción y monitoreo, aspectos que requieren técnicas, equipos e instrumentos apropiados, cuyo manejo necesita de ciertas destrezas. Superado esto último, no hay razón para pensar que no se puedan construir prototipos de mediano tamaño que alcancen temperaturas suficientes como para calentar ambientes, pasteurizar leche o escarzir cosechas de cultivos agrícolas, por ejemplo.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos preliminares, la inflexión de las curvas para los perfiles de temperatura en los niveles inferiores de la LCZ se esperaba que fuese más pronunciada, como consecuencia de la pérdida de calor hacia el suelo. Este hecho probablemente se explica debido a que el estanque experimental se cimentó sobre una plataforma de concreto, en vez de la arena y fibra de vidrio de los recipientes utilizados en los ensayos preliminares.

Llama la atención que las diferencias entre la temperatura ambiente y la temperatura de la LCZ son casi las mismas en todos los días que se realizaron las mediciones. Esto significa que la tasa de calentamiento y de enfriamiento son muy similares, excepto que el estanque solar retiene el calor y la atmósfera lo pierde por la noche.

4. SIMULACIÓN DE UN ESTANQUE SOLAR INDUSTRIAL

La calidad del agua es un factor crítico en la industria, particularmente en la industria de alimentos. En la camaronicultura, por ejemplo, en el pasado reciente se tuvieron por lo menos dos experiencias negativas por la ocurrencia de enfermedades en el camarón que suele cultivarse (Marroquín Mora, 2002). La temperatura del agua también resulta crucial en ciertos procesos como la crianza de larva de camarón y manipulación de cosechas de hidrobiológicos. Ciertos subproductos que normalmente son desechados se pueden aprovechar si son tratados con procesos térmicos apropiados.

4.1 Diseño conceptual

Hay muchas opciones técnicas para el diseño de aplicaciones de estanques solares o de dispositivos fototérmicos a la industria. Ahmed *et al* (2001) presentan un trabajo de diseño en el cual se incluye explícitamente una aplicación a la acuicultura, dentro de un sistema que potabiliza agua a partir de agua salada y que tiene como fuente de energía un sistema híbrido que incluye un estanque solar de gradiente salino.

En esta sección se hace una propuesta conceptual de un sistema fototérmico concebido para proveer energía destinada a mejorar la calidad del agua y proveer agua caliente para los diversos procesos de un sistema de pequeñas industrias en el área rural, que puede incluir una granja de producción de hidrobiológicos (o similares).

También se presenta una estimación preliminar de los principales parámetros de diseño de un estanque solar de gradiente salino, como fuente de calor para operar conjuntamente con un calentador de combustible convencional.

En la figura 22, los pozos de agua dulce (1) y de agua salada (2) proporcionan el agua para ser mezclada en el estanque para mezclar agua (3). Para localidades lejos de la costa el agua salada es más difícil de obtener. No obstante, el sistema propuesto se puede aplicar para crianza y producción de especies de agua dulce, o bien otro tipo de industria de alimentos, incluyendo la opción de reciclado de agua.

El agua del estanque (3) es conducida hacia el intercambiador de calor (5) donde el agua que proviene del fondo del estanque solar aumenta la temperatura del agua mezclada entre 5 y 50 °C. En algún punto, antes de que el agua pase por el intercambiador de calor, puede ser conveniente poner un filtro para eliminar impurezas.

El agua que sale del intercambiador de calor tiene dos posibles caminos. Primero, cuando el estanque opera a temperaturas muy bajas el agua sube poco su temperatura y entonces se envía al estanque de almacenamiento (6) siguiendo la trayectoria (5)-(6).

A través del estanque (5) se puede hacer pasar un flujo de aire que gana temperatura para calentamiento de espacios como puede ser un gabinete de secado, trayectoria (6)-(7). El agua enfriada en este estanque se utiliza para recuperar el agua superficial del estanque solar que se pierde por evaporación o por extracción de agua con salinidad superior al umbral de salinidad de la UCZ, trayectoria (6)-(4).

El otro recorrido, trayectoria (5)-(8), se activa cuando el estanque cede más calor y la temperatura del agua que circula es mayor. El agua precalentada entra al calentador de agua donde se calienta más hasta alcanzar una temperatura de 75 °C, suficiente para obtener agua de calidad. El agua caliente pasa por el intercambiador de calor (9), trayectoria (8)-(9), donde el calor excedente se extrae por medio de un ciclo externo que conduce a estanques de almacenamiento hasta lograr una temperatura entre 28 y 30 °C, posteriormente pasa a los estanques de cultivo, trayectoria (9)-(11) y (9)-(10). El sistema de almacenamiento puede estar aislado para que el agua caliente pueda utilizarse en otros procesos relacionados con el ciclo de producción.

El flujo de agua que es vaciado en los estanques de producción (10) y (11) sirve para renovar agua del estanque y recuperar el nivel de oxígeno, así como para reponer el agua perdida por evaporación.

El agua que se extrae de los estanques de producción se envía al estanque de evaporación o reciclado (12), donde puede ser reciclada por técnicas de destilación para ser utilizada en miniriego o estanques de especies silvestres, por ejemplo (*CSIRO Land and water*, 2001).

Del estanque solar también sale un flujo de agua hacia el estanque de evaporación, debido al agua que se extrae de la superficie del estanque, cuando ha alcanzado niveles de salinidad superiores a los establecidos en el plan de operación, trayectoria (4)-(12).

El círculo (13) representa las aplicaciones adicionales que se pueden mantener a partir de la energía obtenida en el sistema de almacenamiento.

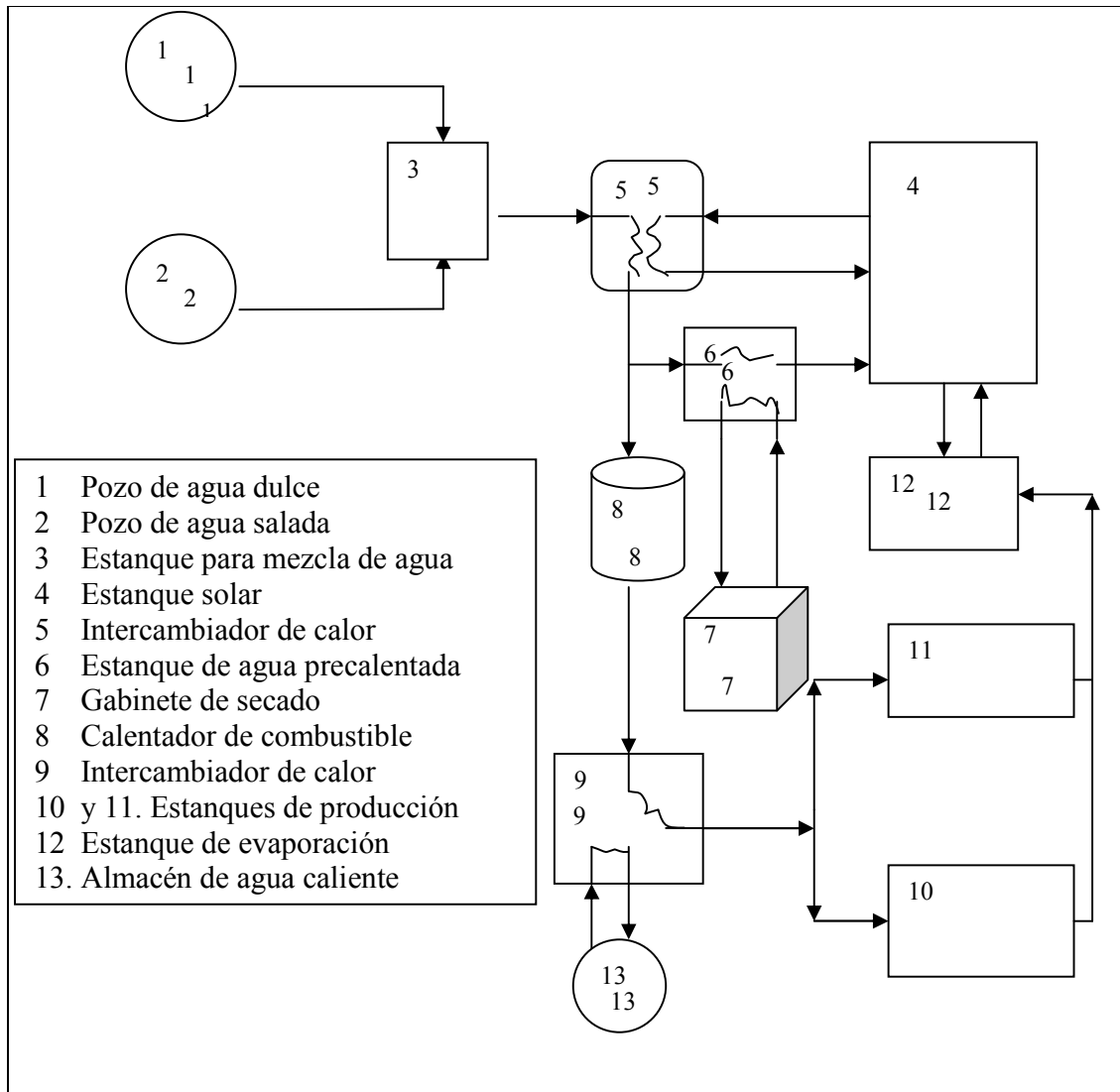
En la época fría del año la temperatura puede descender y permanecer durante algún tiempo con valores tales que algunas especies no pueden sobrevivir o se inhibe su crecimiento. El agua de los estanques de almacenamiento se puede hacer circular donde sea necesario para recuperar los valores de temperatura requeridos. Puede utilizarse en otras aplicaciones como calentamiento de invernaderos y lavado de instalaciones.

También es posible utilizar a menor costo el calentador convencional para lograr mayor calidad de agua que se puede necesitar en la manipulación y tratamiento de cosechas, de acuerdo con normas industriales de calidad.

Un sistema de hornos solares puede formar parte del ciclo de producción ya que permite secar productos a temperaturas mayores y, combinándolo con el gabinete de secado, puede producirse harina o alimento deshidratado, dando mayores opciones de aprovechamiento. También se pueden utilizar para esterilizar instrumentos y dispositivos de diferente índole.

Este diseño conceptual es una aproximación muy preliminar y más adelante se presentan algunos resultados de la aplicación de técnicas de simulación, para explorar si el estanque solar no convectivo es una opción técnicamente viable como fuente de energía, y también para examinar su factibilidad económica según una estructura de costos supuesta. El siguiente paso consiste en evaluar otras opciones técnicas y comparar el ahorro de costos durante la vida útil del proyecto (*U.S. Department of Energy, 1998*).

Figura 22. Esquema del diseño conceptual para una estanque solar aplicado a la acuicultura



4.2 Estimación de la demanda y del área del estanque solar

Durante el Ejercicio Profesional Supervisado se realizaron entrevistas a especialistas y personal de campo de la Estación Experimental del Centro de Estudios del Mar y Acuicultura de la Universidad de San Carlos de Guatemala - CEMA-. Con esta información y los criterios de las referencias citadas en la bibliografía, especialmente relacionadas con el cultivo de camarón, se hizo una estimación de la demanda de energía térmica para la operación de una granja acuícola hipotética. Se asume que la granja hace procesamiento industrial de las cosechas y que convencionalmente consume energía proveída por combustible como Diesel o gasolina.

Se consideró una granja con dos estanques de producción de 2,000 m³ de capacidad y aproximadamente 2,000 m² de área, para cultivo de baja o mediana intensidad de dos cosechas anuales.

Para cada cosecha se establecieron 4 semanas para las actividades de cosecha, limpieza y arreglo de los estanques, quedando 44 semanas de operación, 22 para cada cosecha. El volumen de agua inicial por cosecha es de 4,000 m³. Si se considera un porcentaje de recambio del agua de los estanques de 20 % por semana, más un porcentaje por reposición de evaporación del agua y la provisión de agua caliente para otras actividades del ciclo de producción y conexas, entonces en un año se requiere darle tratamiento a aproximadamente 56,000 m³ de agua.

Se seleccionó una temperatura promedio de 25 °C para el agua de entrada y una temperatura de 75 °C para la salida del agua, luego del proceso de calentamiento, para garantizar una calidad aceptable.

El requerimiento anual de energía es, entonces:

$$4200JKg^{-1}C^{-1} * 56,000,000Kg * (75 - 25)C \approx 12,000GJ / año$$

Para estos requerimientos de energía y condiciones de operación, la latitud y niveles de radiación de la estación San José Aeropuerto, se estimó que se necesita un estanque solar con un área superficial entre 1,500 a 2,000 m², con un régimen de operación entre 5 y 8 horas por día, durante 5 días semanales.

4.3 Simulación con PONDFEAS

El simulador PONDFEAS es un programa interactivo para hacer simulaciones de estanque solares no convectivos y fue desarrollado por el Laboratorio de Investigación de Ingeniería de Construcción de la Armada de Estados Unidos de Norte América (Cler, 1990).

El programa inicialmente estima el rendimiento térmico y la factibilidad económica de un estanque solar con gradiente de salinidad, sobre la base de la configuración diseñada inicialmente por el usuario (área del estanque, profundidad de la UCZ, de la NCZ y de la LCZ, y la profundidad entre el fondo del estanque y las aguas subterráneas). La carga térmica de los procesos puede especificarse según régimen semanal, mensual o anual.

El programa predice el costo del estanque solar instalado (calcula los costos de los requerimientos de obra civil para excavación, cubrimiento de paredes y sal), la proyección de tasas del combustible auxiliar, los costos de mantenimiento y reparaciones durante la vida útil y asume un valor de rescate de 0.

Posteriormente es posible hacer una optimización del área del estanque y de la profundidad de la zona de almacenamiento (LCZ). El rendimiento económico también es maximizado con respecto al área del estanque y la profundidad de la LCZ.

Finalmente, se pueden hacer análisis de sensibilidad para diferentes parámetros considerados como tal a lo largo de las simulaciones anteriores.

La principal limitación del *software* es que los datos de radiación solar y temperaturas se circunscriben a los correspondientes a estados de la Unión Americana.

4.4 Parámetros del estanque

La tabla X presenta los valores para los parámetros iniciales que se tomaron de Henning y Reid (s.f), con algunos ajustes de acuerdo con las características del diseño conceptual y los resultados cualitativos de la fase de investigación. También se hicieron ajustes a los costos para adecuarlos a los precios estimados en Guatemala.

Tabla X. Parámetros del estanque de simulación

UCZ = 0.30 m	Pendiente de bordillo = 14°
NCZ = 1.25 m	Ancho de bordillo = 3.0 m
LCZ = 1.00 m	Temperatura de la tierra = 10°
GZ = 3.00 m	Conductividad de la tierra = 1.0 W/m°C
Horas de operación = 30/semana	Temperatura mínima de operación = 30 °C
Área de estanque = 1750 m ²	

La tabla XI presenta los costos de construcción estimados. A todos los costos, excepto los correspondientes a la excavación, la sal para disolver, la cerca perimetral y la tierra, se les aumentó un 20% por requerir material importado y se presentan entre paréntesis.

Tabla XI. Costos de construcción según cantidad de área

Item	4,000 m ²	40,000 m ²	100,000 m ²
Excavación	\$3/m ³	\$2/m ³	\$1.5/m ³
Forro	\$6.46/m ² (7.75)	\$4.63/m ²	\$4.20/m ²
Sal	\$35/tonelada	\$30/tonelada	\$25/tonelada
Control de ondas	\$1/m ² (1.20)	\$1/m ²	\$1/m ²
Extracción de calor	\$5/m ² (6.00)	\$3/m ²	\$2/m ²
Controladores	\$10,000 (12,000)	\$20,000	\$40,000
Cerca perimetral	\$25/m	\$25/m	\$25/m
Tierra	\$5,000/ha	\$5,000/ha	\$5,000/ha

La tabla XII presenta los parámetros económicos para realizar las simulaciones. Los costos de administración del proyecto se asumieron de un 10%.

Tabla XII. Parámetros económicos

Vida útil = 25 años	Tasa de impuesto = 15%
Tasa de descuento = 7.0 %	Mantenimiento y costos de reparación
Depreciación = 12 años	\$0 a \$250 de costo inicial = 2.0%
Pago inicial = 25.0 %	De \$250k o más = 1.0%
Valor de rescate = 0	Tipo de combustible: Diesel = \$9.00/GJ
Años de amortización = 15 años	Tasa de incremento = 5.0%
Tasa de interés = 9.0 %	Eficiencia de combustión = 65%
Impuesto al crédito = 10%	Seguro = 0.10 %

4.5 Aplicación de PONDFEAS

La principal limitación que tiene el programa para aplicarlo en el caso de Guatemala consiste en que está diseñado para localidades que pertenecen a la Unión Americana.

La estación meteorológica de Hilo, Hawaii, cuya latitud corresponde a la zona tropical (19° 43' latitud Norte), se encuentra a una altura de alrededor de 9 m sobre el nivel del mar. Los promedios anuales de temperatura y de irradiación solar global sobre una superficie horizontal en la estación de Hilo (15.73 MJ/m²-día), son muy parecidos a los de la estación San José Aeropuerto (15.37 MJ/m²-día) en Escuintla, Guatemala.

El programa PONDFEAS se aplicó para los datos correspondientes a Hilo y las estimaciones relatadas en las secciones anteriores, con la expectativa de obtener una aproximación muy preliminar para ciertos parámetros de diseño. Los datos de esta estación, con algún corrimiento de los meses, se aproximan a los datos que proporciona la NASA para una latitud como la de Guatemala (NASA, 2001). En términos generales los datos proporcionados por el INSIVUMEH corresponden a niveles menores de radiación solar que los estimados por la NASA, lo que hace que las estimaciones realizadas sean conservadoras y aceptables para un régimen de operación anual.

En la primera corrida se obtuvieron resultados para una carga de 12,000 GJ, un área de 1,750 m², una tasa de flujo de 12 kg/seg, un régimen de operación de 30 horas por semana y los parámetros recomendados para iniciar un estudio de diseño, con los ajustes que se estimaron apropiados para el caso de Guatemala.

El área del estanque se seleccionó con base en el promedio de estimaciones para la potencia promedio anual necesaria para lograr una temperatura intermedia entre 75 y 30°C. La tabla XIII presenta los resultados de la primera corrida para la energía mensual requerida y la energía extraída, durante 12 meses de operación, así como la temperatura promedio del estanque.

Tabla XIII. Resultados de la primera simulación para la temperatura promedio del estanque y para la energía extraída durante un año de operación

Mes	Temperatura promedio del estanque (°C)	Energía requerida (GJ)	Energía extraída (GJ)
Enero	37.9	1,000.0	149.7
Febrero	38.6	1,000.0	162.5
Marzo	39.4	1,000.0	178.4
Abril	40.2	1,000.0	194.1
Mayo	41.1	1,000.0	212.3
Junio	42.1	1,000.0	230.4
Julio	42.4	1,000.0	236.6
Agosto	42.3	1,000.0	235.1
Septiembre	42.0	1,000.0	229.0
Octubre	41.0	1,000.0	209.5
Noviembre	39.3	1,000.0	175.9
Diciembre	38.0	1,000.0	151.2

La energía suministrada por el estanque durante el año de operación es de 2,365 GJ, lo que significa una fracción solar anual de 0.19. El costo por GJ es de \$1.71 y el costo de construcción es de \$56.15/m².

El ahorro de energía durante la vida útil alcanza un total de \$ 86,280, el período de recuperación de la inversión es de 6.3 años y la relación de ahorro de costos a la inversión es 4.51.

En la segunda corrida se optimizó el área del estanque y la profundidad de la LCZ, dejando fijos los otros valores. El resultado ha sido un área óptima de 2,065 m² y una profundidad de LCZ igual a 0.50 m. Bajo las condiciones óptimas, la energía suplida por el estanque es de 2,742 GJ, lo que significa una fracción solar de 0.22. El ahorro de energía durante la vida útil es de \$107,254 y la tasa de ahorro respecto de la inversión es 4.98. El período de recuperación de la inversión es 5.3 años y el costo de la energía resulta ser \$1.64/GJ. El costo de construcción es de \$52.26/m².

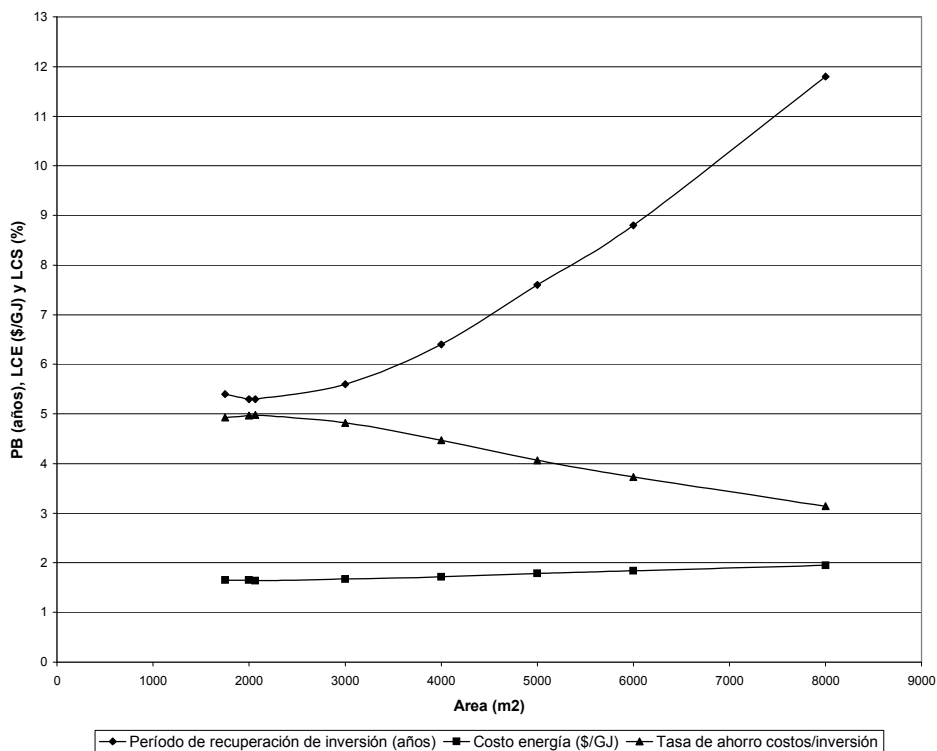
Tabla XIV. Resultados de la segunda simulación para la temperatura promedio del estanque y para la energía extraída durante un año de operación

Mes	Temperatura promedio	Energía requerida (GJ)	Energía extraída(GJ)
Enero	39.0	1,0000.0	174.4
Febrero	39.8	1,0000.0	189.9
Marzo	40.8	1,0000.0	208.3
Abril	41.7	1,0000.0	226.2
Mayo	42.7	1,0000.0	247.3
Junio	43.8	1,0000.0	267.9
Julio	44.1	1,0000.0	274.1
Agosto	44.0	1,0000.0	271.9
Septiembre	43.6	1,0000.0	264.6
Octubre	42.4	1,0000.0	241.2
Noviembre	40.4	1,0000.0	201.9
Diciembre	39.0	1,0000.0	174.5

La tabla XIV presenta los resultados para la temperatura media del estanque y para la energía extraída según la segunda corrida, para optimizar el rendimiento económico del estanque, a través de optimizar el área y la profundidad de la LCZ.

Los indicadores que se incluyen en la tabla son: ahorro de costos durante la vida útil (LCS), tasa de relación entre el ahorro de costos y la inversión (SIR), período de recuperación de la inversión (PB), costo por GJ de energía (LCE), fracción solar o proporción de energía cedida por el estanque (F_{solar}) y costo por metro cuadrado de construcción (CU).

Figura 23. Indicadores económicos PB, LCE y SIR como función del área para una carga de 12,000 GJ/añual



La figura 23 corresponde a los datos de la tabla XIV, que contiene resultados para la simulación con diferentes áreas, con una carga constante de 12,000 GJ/año y una profundidad de LCZ de 0.50 m. Se puede apreciar que los mejores valores de los indicadores corresponden al área óptima calculada en la segunda corrida. Para esta área óptima el tiempo PB es mínimo y la tasa SIR es máxima. El precio de cada GJ también es menor.

Tabla XV. Indicadores de rendimiento térmico y económico para diferentes áreas y una carga de 12,000 GJ anuales

Área	LCS (US\$)	SIR	PB (años)	LCE (US\$/GJ)	F.solar	CU (\$/m ²)
1750	92,830	4.93	5.4	1.65	0.19	53.97
2000	104,391	4.97	5.3	1.65	0.22	52.58
2065	107,254	4.98	5.3	1.64	0.22	52.26
3000	140,981	4.82	5.6	1.67	0.3	49.24
4000	164,620	4.47	6.4	1.72	0.37	47.49
5000	177,867	4.07	7.6	1.79	0.44	46.40
6000	186,765	3.73	8.8	1.84	0.49	45.64
8000	191,132	3.14	11.8	1.95	0.58	44.63

En la tabla XV se observa que cuando se cuadruplica el área el período de recuperación de la inversión se duplica. La relación del ahorro a la inversión disminuye en menos del 50% y el costo por GJ aumenta alrededor de 20%. La fracción solar casi se triplica, esto último como consecuencia de mantener constante la carga, la tasa de flujo del fluido y las horas de operación semanales. Cuando aumentan los niveles de demanda de la carga, las áreas necesarias también son más grandes y mucho más favorables económicamente, aunque la fracción solar anual tiende a ser menor. Esta es una consecuencia de la naturaleza de los estanques solares que limita su aplicación en industrias muy pequeñas.

La tabla XVI compara las áreas requeridas para obtener diferentes cargas anuales, para el caso de una LCZ de 1.00 m (1) y de 0.50 m (2). Se ha fijado el número de horas semanales de operación en 30 horas por semana y se ha variado la tasa de flujo desde 12 hasta un máximo de 120 kg/seg, conforme aumenta la carga.

Las áreas correspondientes a una profundidad de 0.50 son mayores que las requeridas para una profundidad de 1 m, pero los indicadores económicos son más favorables para la profundidad de 0.50 m.

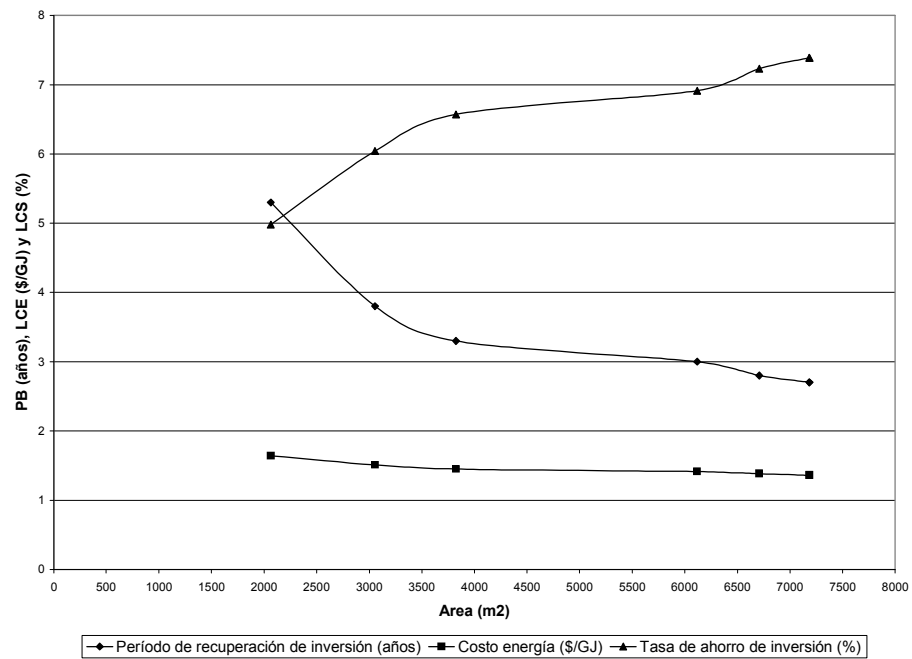
Tabla XVI. Comparación de áreas para diferentes cargas, LCZ = 1 m (1) y LCZ = 0.50 m (2)

Carga (GJ)	Area (1)	Area (2)	PB (1)	PB (2)	LCE (1)	LCE (2)
12,000	1,895	2,065	6.3	5.3	1.71	1.64
24,000	2,639	3,055	4.5	3.8	1.58	1.51
36,000	3,225	3,825	4.0	3.3	1.53	1.45
48,000	3,172	6,157	3.7	3.0	1.50	1.41
60,000	6,077	6,708	3.4	2.8	1.46	1.38
72,000	6,649	7,621	3.3	2.7	1.43	1.35
84,000	7,272	8,229	3.1	2.6	1.41	1.33
96,000	7,720	8,946	3.0	2.5	1.29	1.31

La figura 24 representa al período de recuperación de la inversión (PB), el costo de la energía (LCE) y la tasa de ahorro respecto de la inversión (SIR) como función del área óptima del estanque, profundidad de la LCZ igual a 0.50 m, carga anual variable desde 12,000 hasta 84,000 GJ, tasa de flujo fija en 12 Kg/seg, y horas de operación semanales desde 30 hasta un máximo de 168 horas.

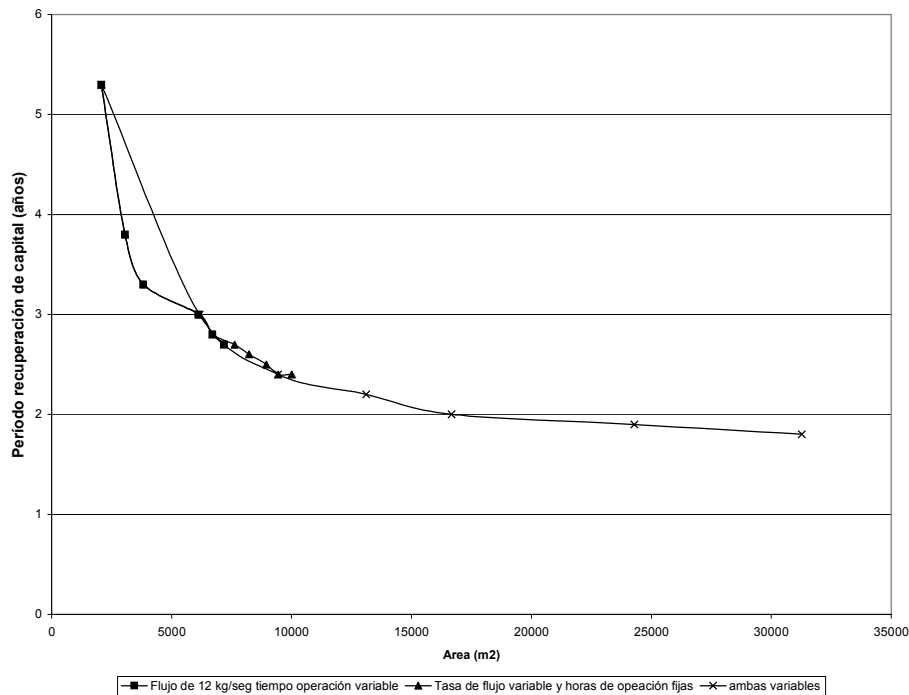
El comportamiento de los indicadores revela la conveniencia de utilizar áreas mayores para cargas mayores, en la práctica puede significar que esta tecnología procede más en el caso de productores grandes, grupos cooperativos que aglomeren varios productores pequeños o, algo muy importante, zonas industriales que formen parte de una política de descentralización industrial con enfoque de desarrollo sostenible.

Figura 24. Indicadores económicos PB, LCE y SIR como función del área para una LCZ = 0.50 m y carga anual variable



Las figuras 25, 26 y 27 representan la comparación de los indicadores PB, LCE y SIR, para diferentes áreas óptimas, cuando se simulan tres condiciones de operación diferentes: a) tasa de flujo variable y número de horas semanales de operación constante, b) tasa de flujo constante y horas semanales de operación variable y c) tasa de flujo variable con tasas de operación semanal variable.

Figura 25. Comparación de curvas de PB y área óptima, para tres situaciones diferentes



En la figura 25 se observa que las primeras dos situaciones, en las que permanece fija la tasa de flujo o el número de horas de operación, el PB se comporta mejor hasta un área de alrededor de 6,000 m² (alrededor de 48,000GJ). A partir de un área aproximada de 10,000 m² (alrededor de 100,000 GJ) prácticamente es indiferente respecto del tercer tipo de escenario, es decir, tasa de flujo y número de horas de operación variable. Situaciones similares se observan en las figuras 26 y 27, que corresponden al LCE y al SIR para los tres tipos de escenarios establecidas en la simulación.

Figura 26. Comparación de curvas de LCE y área óptima, para tres tipos de situaciones

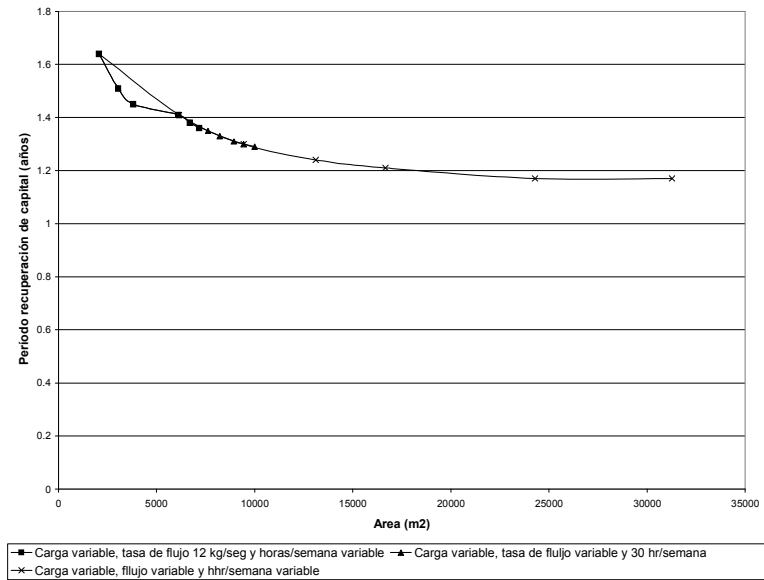
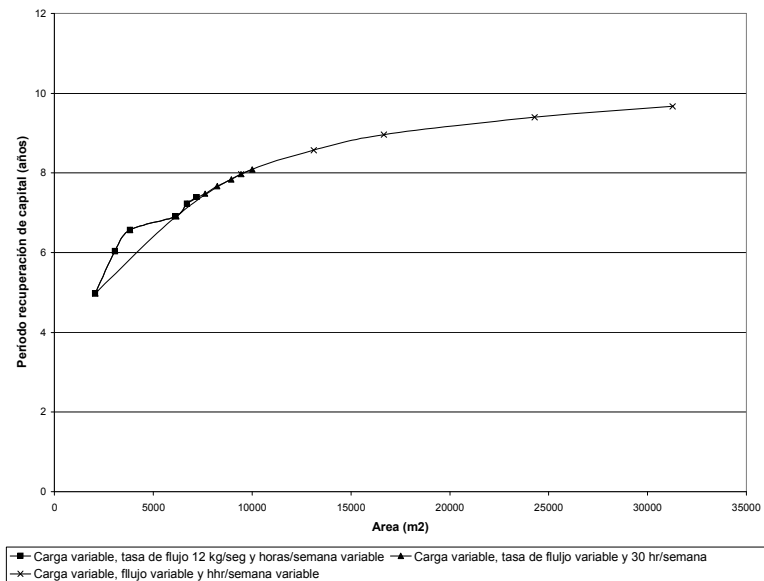


Figura 27. Comparación de curvas de SIR y área óptima, para tres tipos de situaciones



4.6 Análisis comparativo

Se hicieron simulaciones con PONDFEAS para explorar la posible ventaja comparativa que se tiene en Guatemala, con respecto a regiones que se encuentran en latitudes más altas, para utilizar estanques solares como fuente de energía. Los datos de radiación solar de la estación Hilo, Hawaii, son los de la Unión Americana que más se aproximan a los datos de Guatemala. Los parámetros para la simulación del estanque corresponden al caso base utilizado en el estudio de factibilidad del Programa de Energía Renovable de Wisconsin, U.S.A. (*College of Engineering Marquette University, 1995*).

En la tabla XVII se comparan las fracciones solares para un estanque solar en Wisconsin (U.S.A., latitud cerca de 43°) y otro en Hilo (Hawaii, latitud cerca de 20°), en todos los casos se asume una demanda anual de 120,000 GJ, es decir, 10,000 GJ mensuales. La máxima fracción solar en Milwaukee fue de 0.07, en tanto que en Hilo fue 0.09. El área óptima para Hilo es cerca del 90 % del área óptima correspondiente a Milwaukee.

Los indicadores económicos se han estimado asumiendo la misma estructura de costos para los dos lugares y cambiarán al utilizar los valores para el caso de Guatemala, aunque no se esperan muchas diferencias. El período de recuperación de la inversión para Hilo fue de 4.9 años, en tanto que para Milwaukee fue de 18.8 años. El ahorro de costos para el caso de Milwaukee alcanza a ser únicamente el 25 % del ahorro de costos para el caso de Hilo. Estos indicadores y los otros indicadores económicos como LCS y el costo por GJ, que aparecen en la tabla XVII, evidencian la diferencia del rendimiento de un estanque solar en latitudes más al norte, a favor del rendimiento del mismo estanque solar en latitudes menores.

Tabla XVII. Fracciones solares e indicadores económicos para estanques solares en dos latitudes diferentes

Variable	Milwaukee, Wisconsin		Hilo, Hawaii	
Carga anual (GJ)	120,000		120,000	
Área (m ²)	9,222		9,222	
Área óptima (m ²)	9,084		8,060	
Energía disponible	Normal (GJ)	Optima (GJ)	Normal (GJ)	Optima (GJ)
Enero	27.8	26.8	295.9	754.6
Febrero	171.5	169.6	332.5	835.6
Marzo	458.8	453.7	367.6	922.0
Abril	814.7	805.4	399.6	1,002.8
Mayo	1,173.3	1,159.2	438.4	1,098.0
Junio	1,453.1	1,435.0	473.0	1,188.1
Julio	1561.8	1,541.4	475.2	1,207.1
Agosto	1450.1	1,430.2	466.3	1,190.6
Septiembre	1142.7	1,126.0	449.0	1,153.1
Octubre	750.0	738.1	397.7	1,039.5
Noviembre	349.6	342.9	320.5	855.3
Diciembre	80.7	78.1	280.4	739.1
Total anual	9,134.1	9,306.4	4,696.1	11,985.8
LCS (\$)	56,584	55,805	82,216	223,011
SIR	1.53	1.53	3.18	3.37
Fracción solar	0.07	0.07	0.03	0.09
Recuperación de Inversión (años)	18.8	18.8	5.5	4.9
Costo \$/GJ	1.55	1.55	1.32	1.28

CONCLUSIONES

1. La temperatura máxima que se midió en la zona de almacenamiento fue de 65.0 °C +/- 0.1 °C, cuando el número de margen de estabilidad (SMN) estuvo por debajo del valor crítico de 2.5. Los perfiles de temperatura y salinidad resultaron consistentes con el comportamiento esperado para este tipo de estanques.
2. La resistencia térmica total y el modelo que se elaboró para estimar la temperatura en la zona de almacenamiento (ecuaciones 2.16 y 2.21) condujeron a la predicción de temperaturas vespertinas que están correlacionadas con las temperaturas medidas en la zona de almacenamiento (LCZ), con un coeficiente de 0.99. Las temperaturas medidas están por encima de las temperaturas predichas por el modelo en un intervalo no mayor de 5%. Esto significa que las suposiciones que se hicieron para construir el modelo de predicción son aceptables y la alta correlación sugiere que el modelo puede servir para predecir temperaturas, en estanques similares al estudiado, cambiando materiales y consiguientemente las resistencias térmicas.
3. La eficiencia y la estabilidad del estanque solar resultaron con valores cercanos a los propuestos en la hipótesis de trabajo. La eficiencia promedio para 67 días de calentamiento durante la época seca fue de 17.8 % +/- 20%.
4. Los resultados experimentales demuestran que los estanques solares pequeños, en un intervalo de tiempo de dos a tres meses, son tan estables como los estanques grandes y son capaces de acumular energía en pequeñas cantidades.

5. No se ha visualizado una aplicación inmediata para estanques solares del tamaño que se utilizó para realizar el estudio debido a que, a pesar de su eficiencia, la energía total que pueden almacenar no alcanza a ser lo suficiente para compensar la necesidad de conocimientos y destrezas para su mantenimiento, lo que actualmente los hace poco atractivos y prácticos. Más adelante, con el avance de la ciencia de los materiales, podrían ser dispositivos que generen mayor valor agregado a ciertos procesos artesanales característicos de las áreas rurales.

6. La simulación del comportamiento del diseño conceptual que se presenta en este trabajo produjo resultados que demuestran que un estanque solar convectivo de gradiente salino es una opción técnicamente viable y rentable económicamente, de acuerdo con la estructura de costos que se propuso. La fracción solar para una carga de 12,000 GJ fue de 0.22, con un área de 2,065 m² y una profundidad de la zona de almacenamiento (LCZ) de 0.50 m. El ahorro de energía por dólar invertido (LCE) es una tasa de 4.5 y el período de recuperación de la inversión (PB) es de 6.3 años.

7. Los resultados de este trabajo son suficiente evidencia para descartar la posibilidad de sugerir el diseño de un estanque solar de gradiente salino para el caso particular del CEMA, además de un estudio de suelos y de impacto ambiental, se necesitarían niveles de producción muy altos (carga anual de alrededor de 100,000GJ) para justificar un área suficiente (alrededor de 10,000 m²) para que el estanque fuese rentable. Se necesita explorar otros dispositivos capaces de calentar agua, que requieran menos área y sean rentables con niveles menores de producción a los que necesita un estanque solar.

RECOMENDACIONES

1. En el diseño de proyectos de acuicultura que necesiten fuentes de energía, hacer simulaciones con el apoyo de *software* apropiado para revisar la viabilidad y la factibilidad técnica de los sistemas fototérmicos que puedan ser una opción técnica para satisfacer la demanda energética del proyecto. Algunas opciones son: colectores de tubo vacío, colectores de placa plana, torres solares tipo chimenea, estanques solares, etc. Una vez se ha establecido la factibilidad técnica de los sistemas, se debe hacer la evaluación del proyecto al nivel de perfil, considerando cada dispositivo como una de las opciones técnicas, además de otras como las derivadas de fuentes fotovoltaicas o de otros recursos renovables. Los mejores candidatos deberán someterse a la evaluación al nivel de prefactibilidad, considerando el rendimiento económico, la factibilidad financiera y la evaluación de impacto ambiental. Todo ello con la adecuada asesoría de especialistas en el campo de la acuicultura.
2. Establecer un programa agresivo de investigación en energía solar para incorporar institucionalmente a la Universidad de San Carlos en la investigación que se está realizando a nivel mundial en energía solar fototérmica, estimulando la participación de equipos multidisciplinarios en el desarrollo y transferencia de estas tecnologías. Esto se puede lograr a partir de un programa universitario que contemple la participación de varias unidades académicas tales como la Facultad de Ingeniería, la Facultad de Agronomía, el Centro de Estudios de Mar y Acuicultura, las carreras técnicas de los Centros Regionales, entre otros.

3. Continuar con la evaluación de opciones técnicas para proyectos productivos y académicos del CEMA. Por ejemplo, para una granja similar a la Estación Experimental del CEMA se puede utilizar un estanque solar de gradiente salino siempre y cuando la profundidad del nivel freático y la condición de los suelos lo permitan. Además, la opción mejora su factibilidad económica si se concibe utilizar el estanque como generador de energía eléctrica, simultáneamente con la producción de agua potable a través de un sistema de desalinización y calentamiento de agua, como se aplica en otros lugares (Ahmed *et al* , 2001).

4. Insistir en la búsqueda de soluciones fototérmicas para los problemas energéticos encontrados en el CEMA, al margen de que ya han sido solucionados mediante otras técnicas convencionales. El caso de la energía térmica que se necesita para mantener una temperatura adecuada en los estanques de crianza de larva de camarón, como los que hay en la Estación Experimental del CEMA, se puede suplir con la utilización de un estanque solar no convectivo de poca profundidad (Dickinson *et al.*, 1975). Un estanque de este tipo puede conectarse a depósitos aislados y adecuarlos para almacenar agua caliente. De esta forma se puede hacer circular agua caliente en los estanques de crianza cuando la temperatura baje mucho. El problema del secado y el tratamiento de cosechas, o de la fauna de acompañamiento al proceso de pesca artesanal, se puede resolver con una combinación de un estanque solar convectivo y un gabinete de secado con un flujo de aire proveniente de una tubería conectada al estanque o a los depósitos de almacenamiento, probablemente con un ventilador que puede tener como fuente de energía un panel fotovoltaico.

5. Elaborar y experimentar modelos que consideren la estabilidad de los estanques solares en caso de ocurrir sismos de regular intensidad.

REFERENCIAS

1. **Aerospace, mechanical and manufacturing engineering.** <http://www.rmit.edu.au>. Julio, 2002.
2. Ahmed, Mushtaque. "*Integrated power, water and salt generation: a discussion paper. International Conference on Sea Water Desalination Technologies on th Threshold of the New Millenium, Kuwait, 4-7 November 2000*" **Desalination** (Kuwait) (134) 37-45. 2001.
3. Alagao, Feliciano B. "*Simulation of the transient behavior of a closed-cycle salt-gradient solar pond*" **Solar Energy**. (U.S.A.) (56, No. 3): 245-260. 1995.
4. Akbarzadeh, Aliakbar. **Fundamentals of remote area power supply system. A text for tertiary students.** Australia: Royal Melbourne Institute of Technology, 1992. 137 pp.
5. Ashton, Neil. **Solar ponds.** <http://fluids4.ocean.washington.edu/Students/Neil/> Agosto, 1999.
6. Casamajor, Alan B. *et al.* **Cost reductions and performance improvements for shallow solar ponds.** U.S.A.: Lawrence Livermore Laboratory, 1977. 5 pp.
7. Cler, Gerald L y Ty A. Newell. **PONDFEAS: A feasibility study and design tool for salt gradient solar ponds, User's Manual, Versión FY90.2.** U.S.A.: U.S. Army Construction Engineering Research Laboratoty, 1990. 23 pp.
8. College of Egeineering Marquette University. **Renewable Energy Assistance Program. Project Report: Feasibility study of solar ponds for Wisconsin Industrial Process Heat Applications.** U.S.A.: Wisconsin Energy Bureau, 1995. 33pp.
9. College of Egeineering Marquette University. **Renewable Energy Assistance Program. Project Report: Design study of solar ponds for Wisconsin industrial process heat application.** U.S.A.: Wisconsin Energy Bureau, 1996. 98 pp.

10. **CSIRO Land and water.** www.clw.csiro.au/division/griffith . Octubre, 2001.
11. Dickinson, W.C. y Arnold F. Clark. **Industrial process heat from shallow solar ponds.** U.S.A.: Lawrence Livermore National Laboratory, 1976. 10 pp.
12. Dickinson, W.C. et al. **Industrial process heat from solar energy: the ERDA-SOHIO project.** U.S.A.: Lawrence Livermore National Laboratory, 1975. 36 pp.
13. Duffie, John A. y William A. Beckman. **Solar engineering of thermal processes.** USA: John Wiley & Sons, 1980. 762 pp.
14. Godínez, Guillermo Ariel. **Análisis preliminar sobre radiación y brillo solar en Guatemala.** Guatemala: INSIVUMEH, 1995. 12 pp.
15. Heening, Mark A. y Robert L. Reid. **A feasibility study of solar ponds for Wisconsin industrial process heat applications area dependence.** U.S.A: s.e., s.a. 8 pp.
16. Hewett, L. D. **The January – March performance of shallow solar ponds with and without reflectors on their side.** U.S.A.: Lawrence Livermore Laboratory, 1977. 30 pp.
17. Kreith, F. y J.F. Kreider. **Principles of Solar Engineering.** USA: Hemisphere Publishing Corporation: NY., 1978. 778 pp.
18. Lienhard IV, John y John Lienhard V. **A heat transfer book.** 3ª ed. U.S.A.: Phogiston Press, 2003. 749 pp.
19. Marroquín Mora, Claudia. **La acuicultura en Guatemala.** <http://aquatic.unizar.es/N2/art904/Guatemala>. Marzo, 2002.
20. NASA. **Surface meteorology and solar energy data set (release 3).** <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse>. Noviembre, 2001.
21. RMIT University. **Department of Mechanical and Manufacturing Engineering.** <http://me.mit.edu.au/research/solarpd.htm>. Diciembre, 2001.
22. Seebaluck, Dharmendr y M. Shameem Russool. "A Small-scale Solar Pond Performance at Reduit" **PROSI Magazine** (Mauritius)(344). 1977. 8 pp.
23. Sezai, I y E. Tasdemiroglu. "Effect of bottom reflectivity on ground heat losses for solar ponds". **Solar Energy.** (U.S.A) (55, No. 4): 311-319. 1995.

24. Sreenivas, K.R. et al. "*Modeling the dynamics of the mixed layer in solar ponds*". **Solar Energy**. (U.S.A.)(54 No. 3): 193-200. 1995.
25. Taga, M. et. al. "*Field testing on nonsalt solar ponds*". **Solar Energy**. (U.S.A.) (56, No. 3): 267-277. 1995.
26. U.S. Department of Energy. **Standard Life-Cycle Cost-Savings Analysis Methodology for Deployment of Innovative Technologies**. U.S.A.: Federal Energy Technology Center, 1998. 33 pp.
27. Wall, Göran. **Exergetics. Preliminary version**. Suecia: s.e., 1998. 150 pp.
28. Wang, J. Y J. Seyed-Yagoobi. "*Effect of water turbidity on thermal performance of a salt-gradient solar pond*". **Solar Energy**. (U.S.A) (54, No. 5): 301-308. 1995.
29. Windevoxhel, Nestor J. **Situación del manejo integrado de zonas costeras en Centro América; experiencias del programa de conservación de humedales y zonas costeras de UICN para la región**. s.l: s.e, s.a. 31 pp.
30. Xu, Hsu ed. **Salinity gradient solar ponds. A practical manual, Vols. 1 y 2**. U.S.A.: University of Texas at El Paso, 1993.

BIBLIOGRAFÍA

1. Argueta Natareno, Walter Arturo. Secado de frutas mediante el uso de secadores solares pasivos de pequeña escala. Tesis ingeniero químico. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1986. 84 pp.
2. Atlantis Water Desalination Systems Ltd. ***Atlantis autoflash 50 m³/d distillation desalination system powered by a salt gradient solar pond. Technical description.*** Suiza: Atlantis Energy Group, s.a. 23 pp.
3. Bracamonte Orozco, Edwin. **Mapa solar de Guatemala.** Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Centro de Investigaciones de Ingeniería, 1990. 10 pp.
4. Bracamonte Orozco, Edwin. Diseño de iluminación natural en edificios industriales utilizando el proceso de Markov. Tesis ingeniero industrial. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1987. 88 pp.
5. Cohen Deftlensen, Eduardo. Uso y diseño de la energía solar en ingeniería. Tesis ingeniero civil. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1994. 243 pp.
6. Contreras Anckerman, Victor Manuel. Manual de instalación de estaciones meteorológicas de superficie terrestre. Tesis ingeniero civil. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1992. 137 pp.
7. Dickinson, W.C. y K.C. Brown. ***Economic analysis of solar industrial process heat systems: a methodology to determine annual required revenue and internal rate of return.*** U.S.A.: Lawrence Livermore National Laboratory, 1981. 46 pp.
8. Edwards, C. H. Y David E. Penney. **Ecuaciones diferenciales elementales con aplicaciones.** México: Prentice Hall, 1986. 681 pp.

9. Ekechukwu, O. V. ***Design and measured performance of a plane reflector augmented box-type solar energy cooker.*** Italia: *The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics*, 2001. 16 pp.
10. Hart, Robert A. et. al. ***Sea water solar ponds – Applications for mariculture.*** USA: *Department of Mechanical Engineering. University of Houston*, s.f..
11. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología –ICAITI-. ***Conservación de Productos Marinos.*** 2 ed. Guatemala: Proyecto de Leña y Fuentes Alternas de Energía ICAITI-ROCAP, 1985.
12. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología –ICAITI-. ***Secadores Solares Modelos Carpa y Wengert.*** Guatemala: Proyecto de Leña y Fuentes Alternas de Energía ICAITI-ROCAP, 1985. 63 pp.
13. Kleis, S.J. et al. ***A gradient maintenance technique for seawater solar ponds.*** USA: Department of Mechanical Engineering, University of Houston, s.f.. 10 pp.
14. Konttinen, Petri. ***Accelerated aging and optical characterization of absorber surface for solar collectors.*** Finland: *Helsinki University of Technology*, 2000. 84 pp.
15. Lekube Insausti, Juan. ***IR Exchange between a solar collector with plastics glazing and the sky.*** Wisconsin, Madison, U.S.A.: *University of Wisconsin*, 2000. 110pp.
16. Li, Haoming y Stanley Kleis. ***Thermal refuge designs for seawater solar ponds in commercial mariculture operations.*** U.S.A.: *Department of Mechanical Engineering, University of Houston*, s.a. 20 pp.
17. Marknart, Tomas et al. ***Solar electricity.*** England: John Wiley & Sons, 1994. 212 pp.
18. Meinel, Aden B. y Marjorie P. Meinel. ***Aplicaciones de la energía solar.*** España: Editorial Reverté, S. A., 1982. 699 pp.
19. Nandwani, Shyam S. ***La cocina/horno solar. Hágalo usted mismo.*** Costa Rica: Editorial Fundación UNA, 1993. 98 pp.
20. Pawar, S. H. Y N. Chapgaon. ***"Fertilizer solar ponds as a clean source of energy: some observations from small scale experiments" Solar Energy*** U.S.A. (55, No. 6): pp. 537-542. 1995.

21. Rabl, Ari. ***Active solar collectors and their applications***. New York, U.S.A.: Oxford University Press, 1985.
22. Szacsvey, Tamás, et al. ***Thechnical and economical aspects or small scale solar pond powered sea-water desalination systems***. Suiza: Atlantis Water Desalination Systems Ltd, s.f. 20 pp.
23. Taylor, John R. ***An Introduction to error analysis. The study of Uncertainties in physical measurements***. U.S.A.: University Science Books, 1982. 269 pp.
24. Van Ness, Hendrick y Michael M. Abbot. **Termodinámica**. México: Mc Graw Hill, 1972. 355 pp.
25. Zemansky, Mark W. **Calor y Termodinámica**. 4ta. Edición. España: Aguilar S.A. 1979. 668 pp.

APÉNDICE

Durante el Ejercicio Profesional Supervisado se ensayaron otros dos prototipos fototérmicos que se consideraron útiles para la operación de pequeñas granjas de peces y camarones, así como para mejorar los resultados de la pesca artesanal que prevalece en las zonas costeras. Estos prototipos fueron un horno solar tipo caja y un secador solar tipo chimenea. También se hicieron estimaciones para la radiación solar directa y difusa sobre la Estación Experimental del CEMA.

En este apéndice se presentan las figuras que ilustran algunas actividades complementarias que se realizaron durante el Ejercicio Profesional Supervisado. También se incluyen las principales hojas de cálculo que se utilizaron para derivar los resultados de este trabajo de graduación.

Tabla XVIII. Hoja de cálculo para la configuración del estanque, el plan de inyección de agua y el Número de Froude

Configuración del estanque:					
Area (m ²):	Zona	Altura (m)	Frontera (m)	Concentración (kg/m ³)	
1.86	LCZ (m)	0.25	0.25	C ₀	95.7
	NCZ(m)	0.60	0.85		
	UCZ(m)	0.15	1.00	C _{up}	25.4
Perfil de salinidad: origen de z se define en frontera entre LCZ y NCZ					
	Pendiente	Ordenada			
z(C)	-0.008534851	0.816785206			
C(z)	-117.17	95.7			
Altura (cm)	Concentración				
z	C(z)				
0	95.7				
5	89.8				
10	84.0				
15	78.1				
20	72.3				
25	66.4				
30	60.6				
35	54.7				
40	48.8				
45	43.0				
50	37.1				
55	31.3				
60	25.4				
65	3.0				
Plan de inyección					
Concentración de inyección		C (kg/m ³)=	3.0		
Densidad de inyección		rho (kg/m ³)=	1000.4		
Radio del difusor		r(m)=	2.9E-02		
Altura de ranuras difusor		d (m) =	3.0E-03		
Tasa de flujo de agua		R (m ³ /s)=	3.5E-04		
Masa de sal (M) en el gradiente y el volumen inicial de brin (V)					
$M = \int A(z)C(z)dz(kg)$			Masa de sal		
			(kg)	(lbr)	
			67.6	149.0	
Volumen del gradiente			V (m ³)	1.12	

Volumen de brin equivalente (La expresión del recuadro si Cb=0)					
$V_0 = M/C_0$			V_0 (m ³)	0.69	
Determinación del nivel de brin saturado equivalente z_0^s cuando va a entrar agua con concentración diferente de 0					
$z_0^s = \frac{(M - C_b V)}{(C_0 - C_b) A}$			z_0^s (m)	0.37	
Q_T es el volumen de agua que tiene que agregarse					
$Q_T C_b + \sum_1^n C_0 A_i \delta z = M$ $Q_T + \sum_1^n A_i \delta z = V$ $z_0^s = n \delta z$	delta-z		0.05		
	n=		7.45		
	Q_T =		0.42		
	Altura desde el fondo del estanque (m)			0.62	
	Volumen de brin inicial $V_0=V(0,a)$			0.69	
Posiciones y tiempos para el perfil de salinidad deseado					
Tamaño de paso del difusor	dz (m) =		0.05		
Número de pasos	$N=H/dz$ =		12		
Notación					
i	número de paso				
Z(i,d)	posición del difusor				
C(i)	concentración esperada a la mitad del nivel entre Z(i-1,i) y Z(i,d).				
A(i,d)	área del estanque al nivel dz/2 encima.				
V(i,a)	volumen de solución encima del difusor con concentración esperada C(i)				
Q(i)	agua necesaria para cambiar la concentración desde C(i-1) a C(i)				
i	Z _{id}	Z _{id} + dz/2	C _i	A _{id}	Q _i
1	0.00	0.025	92.8	1.86	0.023
2	0.05	0.075	86.9	1.86	0.043
3	0.10	0.125	81.1	1.86	0.043
4	0.15	0.175	75.2	1.86	0.042
5	0.20	0.225	69.3	1.86	0.042
6	0.25	0.275	63.5	1.86	0.041
7	0.30	0.325	57.6	1.86	0.040
8	0.35	0.375	51.8	1.86	0.038
9	0.40	0.425	45.9	1.86	0.036
10	0.45	0.475	40.0	1.86	0.032
11	0.50	0.525	34.2	1.86	0.027
12	0.55	0.575	28.3	1.86	0.017

TQ	total de agua inyectada				
dZ(i,s)	cambio en cada paso del nivel superficial				
Z(i,s)	el nivel superficial medido desde 70 cm encima del fondo				
i	Via	TQi	Ais	dZis	Zis
1	0.71544	0.023	1.86	0.012	0.385
2	0.66590	0.066	1.86	0.023	0.408
3	0.61590	0.109	1.86	0.023	0.431
4	0.56533	0.151	1.86	0.023	0.454
5	0.51404	0.193	1.86	0.022	0.476
6	0.46182	0.234	1.86	0.022	0.498
7	0.40838	0.274	1.86	0.021	0.520
8	0.35327	0.311	1.86	0.020	0.540
9	0.29581	0.347	1.86	0.019	0.559
10	0.23488	0.379	1.86	0.017	0.576
11	0.16853	0.406	1.86	0.014	0.591
12	0.09300	0.423	1.86	0.009	0.600
dt(i)	tiempo requerido para el paso i-ésimo				
Tt(i)	tiempo total requerido para terminar los N pasos				
i	dTi	Tti	Minutos		
1	65	65	1.08		
2	124	189	3.15		
3	123	312	5.19		
4	121	433	7.21		
5	119	552	9.20		
6	117	669	11.14		
7	113	782	13.03		
8	108	890	14.83		
9	102	991	16.52		
10	92	1083	18.05		
11	76	1159	19.32		
12	50	1209	20.15		
$F_r = \frac{R}{2\pi r d \sqrt{dg \left(\frac{D_{am} - D_i}{D_i} \right)}}$					
Cálculo del Número de Froude					
i	Z _{id} + dz/2	Salinidad (Ci)	Densidad	F _r	
1	0.025	92.8	1062.1	15.0	
2	0.075	86.9	1057.5	15.6	
3	0.125	81.1	1053.6	16.2	
4	0.175	75.2	1049.8	16.8	
5	0.225	69.3	1045.8	17.5	
6	0.275	63.5	1042.0	18.3	
7	0.325	57.6	1038.0	19.3	
8	0.375	51.8	1034.1	20.4	
9	0.425	45.9	1030.1	21.7	
10	0.475	40.0	1026.1	23.3	
11	0.525	34.2	1022.1	25.3	
12	0.575	28.3	1018.1	28.1	

Tabla XIX. Hoja de cálculo para el margen de estabilidad (SMN)

Coeficientes del perfil de temperatura			Coeficientes del perfil de gravedad específica s.g.					
J0	48.6270000		F0	1.0932000	I Nivel			
J1	-0.2789800		F1	-0.0013871	Z ₁ Altura			
J2	0.0020365		F2	0.0000128	Z ₃ Mitad intervalo anterior			
J3	-0.0000254		F3	-0.0000001				
FNC(HG T)	Conversión de gravedad específica en salinidad				$S = 132.8(\sqrt{1 + 2.156(S.G. - 1)} - 1)$			
DT(I)	Cálculo de gradiente de temperatura usando derivada de polinomio de ajuste							
G(I)	Cálculo de gravedad específica con polinomio de ajuste							
DG(I)	Cálculo de gradiente de salinidad usando derivada de polinomio de ajuste							
S(I)	Conversión de gravedad específica en salinidad							
DS(I)	Conversion del gradiente de salinidad							
I	Z1	Z3	FNC(HG HT)	DT(I)	G(I)	DG(I)	S(I)	DS(I)
0	85	82.5	25.21	46.18	1.0189	-0.00098	2.68540	13.809
1	80	77.5	27.41	42.11	1.0237	-0.00091	3.34784	12.721
2	75	72.5	29.42	38.43	1.0281	-0.00085	3.96063	11.822
3	70	67.5	31.26	35.13	1.0322	-0.00080	4.53314	11.109
4	65	62.5	32.94	32.22	1.0361	-0.00077	5.07456	10.578
5	60	57.5	34.49	29.68	1.0399	-0.00074	5.59389	10.225
6	55	52.5	35.92	27.52	1.0436	-0.00073	6.10000	10.048
7	50	47.5	37.25	25.75	1.0473	-0.00074	6.60161	10.045
8	45	42.5	38.50	24.36	1.0510	-0.00075	7.10733	10.212
9	40	37.5	39.69	23.34	1.0548	-0.00078	7.62563	10.548
10	35	32.5	40.84	22.71	1.0588	-0.00082	8.16487	11.049
11	30	27.5	41.97	22.46	1.0630	-0.00087	8.73325	11.713
12	25	22.5	43.09	22.59	1.0675	-0.00094	9.33884	12.537
Calcular densidades D(I)					$\rho(S, T) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 A_{i,j} S^i T^j$			
I	C1(I)	C11(I)	C2(I)	C21(I)	C3(I)	C31(I)	C4(I)	
0	1020.42	7.652	0.060	0.0300	0.00506	-0.000321	1.284E-05	
1	1025.49	7.658	0.079	0.0290	0.00485	-0.000309	1.224E-05	
2	1030.19	7.665	0.097	0.0282	0.00466	-0.000299	1.169E-05	
3	1034.58	7.673	0.113	0.0275	0.00450	-0.000289	1.118E-05	
4	1038.74	7.681	0.127	0.0268	0.00434	-0.000280	1.071E-05	
5	1042.73	7.690	0.141	0.0261	0.00420	-0.000271	1.025E-05	
6	1046.62	7.699	0.154	0.0255	0.00406	-0.000263	9.820E-06	
7	1050.49	7.709	0.167	0.0249	0.00393	-0.000256	9.394E-06	
8	1054.39	7.719	0.179	0.0243	0.00381	-0.000248	8.971E-06	
9	1058.39	7.731	0.192	0.0237	0.00368	-0.000241	8.543E-06	
10	1062.56	7.744	0.204	0.0231	0.00355	-0.000233	8.106E-06	
11	1066.97	7.758	0.217	0.0225	0.00342	-0.000226	7.652E-06	
12	1071.67	7.774	0.231	0.0218	0.00329	-0.000218	7.179E-06	
ALPHA(I): Cálculo de alpha					$\alpha = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_S = \frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 j A_{i,j} S^i T^{j-1}}{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 A_{i,j} S^i T^j}$			
BETA(I) Cálculo de beta					$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial S} \right)_T = \frac{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 i A_{i,j} S^{i-1} T^j}{\sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 A_{i,j} S^i T^j}$			

R(l)	Cociente de alpha y beta								
Columnas E a la I: cálculo del coeficiente de estabilidad									
	$\frac{P_r + 1}{P_r + S_c} = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 B_{i,j} S^i T^j$								
	$\left(\frac{P_r + 1}{P_r + S_c} \right) \frac{\alpha}{\beta}$		$P_r = \frac{\nu}{\kappa_T}$		$S_c = \frac{\kappa_s}{\kappa_T}$				
			(número de Prandtl)		(relación de difusividades)				
							(Salinidad/Temperatura)		
DSC(l)	Gradiente de salinidad requerido				$\left(\frac{\partial S_i}{\partial z} \right) = \left(\frac{P_r}{P_r + S_c} \right) \alpha \frac{\partial T}{\partial z}$				
SMN(l)	Cálculo del número margen de estabilidad				$SMN = \frac{dS_a}{dz} / \frac{dS_i}{dz}$				
I	C41(l)	D(l)	ALPHA(l)	BETA(l)	R(l)	A1(l)	A2(l)	A3(l)	
0	-9.123E-07	1015.91	0.00029	0.00697	4.098	1.0810	0.00253	2.580E-05	
1	-9.031E-07	1019.93	0.00031	0.00694	4.489	1.0800	0.00253	2.535E-05	
2	-8.937E-07	1023.60	0.00033	0.00691	4.823	1.0791	0.00252	2.495E-05	
3	-8.841E-07	1027.00	0.00035	0.00688	5.108	1.0783	0.00251	2.459E-05	
4	-8.743E-07	1030.21	0.00037	0.00686	5.355	1.0775	0.00250	2.426E-05	
5	-8.642E-07	1033.28	0.00038	0.00685	5.571	1.0768	0.00249	2.396E-05	
6	-8.538E-07	1036.29	0.00039	0.00684	5.762	1.0761	0.00248	2.368E-05	
7	-8.428E-07	1039.30	0.00040	0.00683	5.933	1.0754	0.00246	2.342E-05	
8	-8.312E-07	1042.35	0.00041	0.00682	6.087	1.0747	0.00245	2.316E-05	
9	-8.186E-07	1045.52	0.00042	0.00681	6.229	1.0740	0.00243	2.291E-05	
10	-8.048E-07	1048.85	0.00043	0.00680	6.361	1.0733	0.00242	2.266E-05	
11	-7.895E-07	1052.39	0.00044	0.00680	6.485	1.0725	0.00240	2.241E-05	
12	-7.724E-07	1056.20	0.00045	0.00680	6.604	1.0717	0.00238	2.216E-05	
Masa de sal en cada una de las capas de solución salina									
I	Z3	R2(l)	R3(l)	DSC(l)	SMN(l)	M TOTAL	M sal		
0	82.5	1.161	0.0476	2.197	6.3	94.5	2.54		
1	77.5	1.168	0.0525	2.209	5.8	94.9	3.18		
2	72.5	1.175	0.0567	2.177	5.4	95.2	3.77		
3	67.5	1.181	0.0603	2.119	5.2	95.5	4.33		
4	62.5	1.186	0.0635	2.046	5.2	95.8	4.86		
5	57.5	1.191	0.0664	1.970	5.2	96.1	5.38		
6	52.5	1.196	0.0689	1.896	5.3	96.4	5.88		
7	47.5	1.200	0.0712	1.833	5.5	96.7	6.38		
8	42.5	1.203	0.0732	1.784	5.7	96.9	6.89		
9	37.5	1.207	0.0752	1.755	6.0	97.2	7.41		
10	32.5	1.210	0.0770	1.748	6.3	97.5	7.96		
11	27.5	1.213	0.0786	1.767	6.6	97.9	8.55		
12	22.5	1.215	0.0803	1.813	6.9				
						Total	67.13		

Tabla XX. Hoja de cálculo para la estimación de temperaturas en la LCZ

Conductividades de los materiales aislantes del estanque experimental		Parametros del estanque			
Agua (W/mK)	0.600	Radio (m)	0.770		
Lana de vidrio (k) (W/m-K)	0.035	Altura (m)	1.05		
Asbesto cemento (W/m-K)	0.319	A area superficial (m2)	1.86		
Concreto-block (W/m-K)	0.290	Area lateral (m2)	5.08		
Conductividad del suelo (W/m-K)	0.040	UCZ (m)	0.150		
h (c+e+r) (W/m ² K)	75	NCZ (m)	0.600		
Dimensiones de los aislantes		LCZ (m)	0.250		
Grosor de lana de vidrio (m)	0.050	Area lateral UCZ (m2)	0.726		
Grosor de asbesto-cemento (m)	0.015	Area lateral NCZ (m2)	2.903		
Grosor de concreto (m)	0.300	Area lateral LCZ (m2)	1.210		
Profundidad manto de agua (m)	5.0	Volumen LCZ (m3)	0.465		
Resistencias calculadas (ecuaciones 2.18 a 2.20)		Datos para calcular temperaturas (ecuacion 2.16)			
R _{asbesto} (K/W) (al suelo, por asbesto)	0.0253	Densidad (Kg/m3)	1051.1		
R _{concreto} (K/W) (al suelo, por concreto)	0.5562	Masa (Kg)	488.8		
R _{arena} (KW) (al suelo arenoso)	67.2043	Calor específico (c _p) [J/kgK]	3852		
R _{LCZ2} (K/W) (total del fondo al suelo)	67.7858	Transmisión	0.31		
R _{LCZ1} (K/W) (al lateral de LCZ)	1.1616	Factor de reflexión f	0.98		
R[LCZ] (K/W) (total, fondo más lateral)	1.1421	Absorbencia alpha	0.95		
R _[NCZ1] Resistencia de NCZ a la pared lateral	0.4840	A _(LCZ) m ²	1.86		
R _[NCZ2] Resistencia de LCZ a UCZ	0.5376	I _T (irradiancia) (W/m2)	469.6		
R _[UCZ] Resistencia de UCZ a la pared lateral	1.9361	K (W)	252.1		
R _[e+r+c] evaporación, radiación y convección	0.0072	RK (Kelvin)	52.7684678		
Valores para sustituir en ecuacion (2.21)		C (J/K)	1882709.3		
1/R _[LCZ]	0.876	RC (s/K)	394099.01		
1/R _[NCZ1]	2.066				
1/R _[UCZ]	0.517				
1/R _[e+r+c]	139.500				
1/[(1/R _[UCZ] +1/R _[e+r+c]) ⁻¹ +R _[NCZ-2]]	1.836				
(1/R _[NCZ1] +1/[(1/R _[UCZ] +1/R _[e+r+c]) ⁻¹ +R _[NCZ2]]) ⁻¹	0.256				

$\frac{1}{(1/R_{[INCZ1]}+1/[(1/R_{[UCZ]}+1/R_{[e+r+c]})-1+R_{[INCZ2]})^{-1}}}$	3.902						
$(1/R_{[LCZ]} + \frac{1}{(1/R_{[INCZ1]}+1/[(1/R_{[UCZ]}+1/R_{[e+r+c]})-1+R_{[INCZ2]})^{-1}})}$	0.209						
$R=R_T$ (K/W)	0.21						
Temperaturas en grados celsius (+/- 0.1)			TLCZ	T Ambiente	TLCZ		
FECHA	NO. DIA	T Ambiente en mañanas	Mañanas	Tardes	Tardes		
02/01/2000	0	25.3	27.2	29.5	36.7		
03/01/2000	1	18.3	35.4	28.0	38.6		
05/01/2000	3	18.9	37.0	30.0	40.0		
07/01/2000	5	18.1	38.4	28.0	41.4		
09/01/2000	7	19.2	40.2	28.0	43.2		
15/01/2000	13	19.6	42.6	29.5	45.6		
16/01/2000	14	19.4	43.3	28.3	46.3		
23/01/2000	21	18.5	48.3	28.0	51.2		
29/01/2000	27	19.0	50.5	27.5	53.3		
05/02/2000	32	20.0	53.1	29.0	55.7		
12/02/2000	39	20.5	57.4	28.0	59.9		
19/02/2000	46	20.3	60.4	29.5	62.8		
26/02/2000	53	20.0	62.5	30.5	64.9		
04/03/2000	60	19.5	62.7	31.0	65.1		
11/03/2000	67	21.4	62.3	30.7	64.6		
Cálculo de temperaturas con base en el modelo elaborado (t = 6 horas de irradiacion promedia)				21,600	segundos		
		Grados Kelvin			Grados Celsius		
			T de LCZ	LCZ	LCZ modelo		
FECHA	NO. DIA	T ambiente promedio	Mañana	modelo (K)	(°C)	Diferencia	
02/01/2000	0	300.6	300.4	303.2	30.0	22.2%	
03/01/2000	1	296.3	308.6	310.7	37.6	2.8%	
05/01/2000	3	297.6	310.2	312.3	39.1	2.2%	
07/01/2000	5	296.2	311.6	313.5	40.4	2.5%	
09/01/2000	7	296.8	313.4	315.3	42.1	2.5%	
15/01/2000	13	297.7	315.8	317.6	44.5	2.6%	
16/01/2000	14	297.0	316.5	318.2	45.1	2.7%	
23/01/2000	21	296.4	321.5	322.9	49.8	2.9%	
29/01/2000	27	296.4	323.7	325.0	51.9	2.8%	
05/02/2000	32	297.7	326.3	327.5	54.4	2.4%	
12/02/2000	39	297.4	330.6	331.6	58.4	2.5%	
19/02/2000	46	298.1	333.6	334.5	61.3	2.4%	
26/02/2000	53	298.4	335.7	336.5	63.3	2.5%	
04/03/2000	60	298.4	335.9	336.7	63.5	2.5%	
11/03/2000	67	299.2	335.5	336.3	63.2	2.2%	

Tabla XXI. Hoja de cálculo para la eficiencia de acumulación de energía y el error de estimación

Día	DELTA T	T.medialCZ	% SAL	DENSIDAD g/cm ³	c _p cal/gr-°C	Intensidad cal/cm ² -min	Insolación Tiempo (min)	Acumulación Eficiencia(%)
0	9.5	36.7	9.13	1.0577	0.92	0.68	450	75.5
1	3.2	38.6	9.13	1.0568	0.92	0.68	561	20.4
3	3.0	40.0	9.13	1.0562	0.92	0.68	561	19.1
5	3.0	41.4	9.13	1.0555	0.92	0.68	561	19.1
7	3.0	43.2	9.13	1.0547	0.92	0.68	561	19.1
13	3.0	45.6	9.13	1.0535	0.92	0.68	561	19.1
14	3.0	46.3	9.13	1.0532	0.92	0.68	561	19.0
21	2.9	51.2	9.13	1.0507	0.92	0.68	561	18.4
27	2.8	53.3	9.13	1.0497	0.92	0.68	561	17.7
32	2.6	55.7	9.13	1.0484	0.92	0.66	544	17.5
39	2.5	59.9	9.13	1.0462	0.92	0.66	544	16.8
46	2.4	62.8	9.13	1.0446	0.92	0.66	544	16.1
53	2.4	64.9	9.13	1.0434	0.92	0.66	544	16.0
60	2.4	65.1	9.13	1.0433	0.92	0.68	535	15.8
67	2.3	64.6	9.13	1.0435	0.92	0.68	535	15.2
Matriz de coeficientes (ecuación 2.22)								
	0	1	2	3				
0	9.999E+02	7.637E+00	7.362E-04	4.709E-04				
1	2.592E-02	-3.395E-02	7.795E-04	-9.307E-06				
2	-5.992E-03	3.742E-04	-1.044E-05	1.482E-07				
3	1.533E-05	-9.386E-07	3.284E-09	4.008E-10				
TEMP	36.7	38.6	40	41.4	43.2	45.6	46.3	51.2
% w	9.13	9.13	9.13	9.13	9.13	9.13	9.13	9.13
g/cm ³	1.058E+03	1.057E+03	1.056E+03	1.056E+03	1.055E+03	1.054E+03	1.053E+03	1.051E+03
i=0	9.999E+02	9.999E+02	9.999E+02	9.999E+02	9.999E+02	9.999E+02	9.999E+02	9.999E+02
	9.513E-01	1.001E+00	1.037E+00	1.073E+00	1.120E+00	1.182E+00	1.200E+00	1.327E+00
	-8.071E+00	-8.928E+00	-9.588E+00	-1.027E+01	-1.118E+01	-1.246E+01	-1.285E+01	-1.571E+01
	7.579E-01	8.818E-01	9.812E-01	1.088E+00	1.236E+00	1.454E+00	1.522E+00	2.058E+00
	9.935E+02	9.929E+02	9.923E+02	9.918E+02	9.911E+02	9.901E+02	9.898E+02	9.876E+02
i=1	6.976E+01	6.976E+01	6.976E+01	6.976E+01	6.976E+01	6.976E+01	6.976E+01	6.976E+01
	-1.138E+01	-1.197E+01	-1.240E+01	-1.284E+01	-1.339E+01	-1.414E+01	-1.436E+01	-1.588E+01
	4.604E+00	5.093E+00	5.469E+00	5.859E+00	6.379E+00	7.108E+00	7.327E+00	8.960E+00
	-4.238E-01	-4.931E-01	-5.487E-01	-6.083E-01	-6.912E-01	-8.129E-01	-8.509E-01	-1.151E+00
	6.256E+01	6.239E+01	6.228E+01	6.217E+01	6.205E+01	6.192E+01	6.188E+01	6.169E+01
i=2	6.142E-02	6.142E-02	6.142E-02	6.142E-02	6.142E-02	6.142E-02	6.142E-02	6.142E-02
	2.387E+00	2.510E+00	2.601E+00	2.692E+00	2.810E+00	2.966E+00	3.011E+00	3.330E+00
	-1.173E+00	-1.297E+00	-1.393E+00	-1.492E+00	-1.625E+00	-1.810E+00	-1.866E+00	-2.282E+00
	1.354E-02	1.576E-02	1.753E-02	1.944E-02	2.209E-02	2.598E-02	2.719E-02	3.677E-02

	1.289E+00	1.290E+00	1.287E+00	1.281E+00	1.268E+00	1.243E+00	1.233E+00	1.146E+00	
i=3	3.588E-01	3.588E-01	3.588E-01	3.588E-01	3.588E-01	3.588E-01	3.588E-01	3.588E-01	
	-2.603E-01	-2.738E-01	-2.837E-01	-2.936E-01	-3.064E-01	-3.234E-01	-3.284E-01	-3.631E-01	
	1.521E-01	1.682E-01	1.806E-01	1.935E-01	2.107E-01	2.348E-01	2.420E-01	2.960E-01	
	1.510E-02	1.757E-02	1.955E-02	2.167E-02	2.463E-02	2.896E-02	3.032E-02	4.100E-02	
	2.657E-01	2.709E-01	2.753E-01	2.804E-01	2.878E-01	2.991E-01	3.028E-01	3.327E-01	
TEMP	53.3	55.7	59.9	62.8	64.9	65.1	64.6		
% w	9.13	9.13	9.13	9.13	9.13	9.13	9.13		
	1.050E+03	1.048E+03	1.046E+03	1.045E+03	1.043E+03	1.043E+03	1.044E+03		
i=0	9.999E+02	9.999E+02	9.999E+02	9.999E+02	9.999E+02	9.999E+02	9.999E+02		
	1.382E+00	1.444E+00	1.553E+00	1.628E+00	1.682E+00	1.687E+00	1.674E+00		
	-1.702E+01	-1.859E+01	-2.150E+01	-2.363E+01	-2.524E+01	-2.540E+01	-2.501E+01		
	2.322E+00	2.650E+00	3.295E+00	3.797E+00	4.191E+00	4.230E+00	4.133E+00		
	9.866E+02	9.854E+02	9.832E+02	9.817E+02	9.805E+02	9.804E+02	9.807E+02		
i=1	6.976E+01	6.976E+01	6.976E+01	6.976E+01	6.976E+01	6.976E+01	6.976E+01		
	-1.653E+01	-1.727E+01	-1.857E+01	-1.947E+01	-2.012E+01	-2.019E+01	-2.003E+01		
	9.711E+00	1.060E+01	1.226E+01	1.348E+01	1.440E+01	1.449E+01	1.426E+01		
	-1.298E+00	-1.482E+00	-1.843E+00	-2.123E+00	-2.344E+00	-2.365E+00	-2.311E+00		
	6.165E+01	6.161E+01	6.161E+01	6.165E+01	6.169E+01	6.170E+01	6.168E+01		
i=2	6.142E-02	6.142E-02	6.142E-02	6.142E-02	6.142E-02	6.142E-02	6.142E-02		
	3.466E+00	3.622E+00	3.896E+00	4.084E+00	4.221E+00	4.234E+00	4.201E+00		
	-2.473E+00	-2.701E+00	-3.124E+00	-3.434E+00	-3.667E+00	-3.690E+00	-3.633E+00		
	4.148E-02	4.734E-02	5.888E-02	6.785E-02	7.489E-02	7.558E-02	7.385E-02		
	1.096E+00	1.030E+00	8.919E-01	7.797E-01	6.898E-01	6.809E-01	7.031E-01		
i=3	3.588E-01	3.588E-01	3.588E-01	3.588E-01	3.588E-01	3.588E-01	3.588E-01		
	-3.780E-01	-3.951E-01	-4.248E-01	-4.454E-01	-4.603E-01	-4.617E-01	-4.582E-01		
	3.208E-01	3.503E-01	4.051E-01	4.453E-01	4.756E-01	4.785E-01	4.712E-01		
	4.625E-02	5.278E-02	6.565E-02	7.565E-02	8.350E-02	8.427E-02	8.235E-02		
	3.478E-01	3.668E-01	4.047E-01	4.343E-01	4.576E-01	4.599E-01	4.542E-01		
Cálculo de la propagación de error: Cálculo de error por conversión de salinidad a densidad (ecuaciones 2.23 y 2.24)									
Propagación de error por coeficientes a _i			$\rho = a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3$						
			$a_1 = 9.999x10^2 + 7.6374S + 7.3624x10^{-4}S^2 + 4.7088x10^{-4}S^3$						
			$a_2 = 0.02592 - 0.033946S + 7.7952x10^{-4}S^2 - 9.3073x10^{-6}S^3$						
			$a_3 = -5.9922x10^{-3} + 3.7422x10^{-4}S - 1.0436x10^{-5}S^2 + 1.4816x10^{-7}S^3$						
			$a_4 = 1.5332x10^{-5} - 9.3860x10^{-7}S + 3.2836x10^{-9}S^2 + 4.0083x10^{-10}S^3$						
delta-x			$a_1' = 7.6374 + 1.4725x10^{-3}S + 1.4126x10^{-3}S^2$						
Raiz			$a_2' = -0.033946 + 1.5590x10^{-3}S - 2.7922x10^{-5}S^2$						
delta a 1			$a_3' = 3.7422x10^{-4} - 2.0872x10^{-5}S + 4.4448x10^{-7}S^2$						
delta a 2			$a_4' = -9.3860x10^{-7} + 6.5672x10^{-9}S + 1.2025x10^{-9}S^2$						
delta a 3									
delta a 4									
Tmedia+/- 0.1			T ²	T ³	a2Tmedia	a3T ²	a4T ³	total	
Día			% error	% error	% error	% error	% error	% error	
0			0.27	0.54	0.82	0.27	0.54	0.82	1.25

1	0.26	0.52	0.78	0.26	0.52	0.78	1.21
3	0.25	0.50	0.75	0.25	0.50	0.75	1.18
5	0.24	0.48	0.72	0.24	0.48	0.72	1.15
7	0.23	0.46	0.69	0.23	0.46	0.69	1.12
13	0.22	0.44	0.66	0.22	0.44	0.66	1.09
14	0.22	0.43	0.65	0.22	0.43	0.65	1.08
21	0.20	0.39	0.59	0.20	0.39	0.59	1.02
27	0.19	0.38	0.56	0.19	0.38	0.56	1.00
32	0.18	0.36	0.54	0.18	0.36	0.54	0.98
39	0.17	0.33	0.50	0.17	0.33	0.50	0.95
46	0.16	0.32	0.48	0.16	0.32	0.48	0.93
53	0.15	0.31	0.46	0.15	0.31	0.46	0.92
60	0.15	0.31	0.46	0.15	0.31	0.46	0.92
67	0.15	0.31	0.46	0.15	0.31	0.46	0.92
Proopagación de error de la ecuación para la eficiencia (2.22)							
Variable	$T_{\text{tarde}} - T_{\text{mañana}}$	cp	Profundidad	Intensidad	Tiempo (min)	Eficiencia(%)	
	Delta T (°C)	cal/gr-°C	L (25.0 cm)	cal/cm ² -min	Delta t		
delta-x	0.1	0.02	0.1			Suma	
Día	% error	%error	% error	% error	% error	cuadrados	% error
0	0.64	2.2	0.4	20	5	431.8	20.8
1	0.54	2.2	0.4	20	5	431.6	20.8
3	0.52	2.2	0.4	20	5	431.5	20.8
5	0.50	2.2	0.4	20	5	431.5	20.8
7	0.48	2.2	0.4	20	5	431.4	20.8
13	0.45	2.2	0.4	20	5	431.3	20.8
14	0.45	2.2	0.4	20	5	431.3	20.8
21	0.40	2.2	0.4	20	5	431.1	20.8
27	0.39	2.2	0.4	20	5	431.0	20.8
32	0.37	2.2	0.4	20	5	431.0	20.8
39	0.34	2.2	0.4	20	5	430.9	20.8
46	0.32	2.2	0.4	20	5	430.9	20.8
53	0.31	2.2	0.4	20	5	430.8	20.8
60	0.31	2.2	0.4	20	5	430.8	20.8
67	0.32	2.2	0.4	20	5	430.8	20.8

Figura 28. Vista del sitio de experimentación desde el noreste



Figura 29. Vista del sitio de experimentación desde el oeste



Figura 30. Depósitos del primer ensayo de medición de temperaturas



Figura 31. Vista del sitio de experimentación desde el sureste



Figura 32. Ensayo con estanques cubiertos



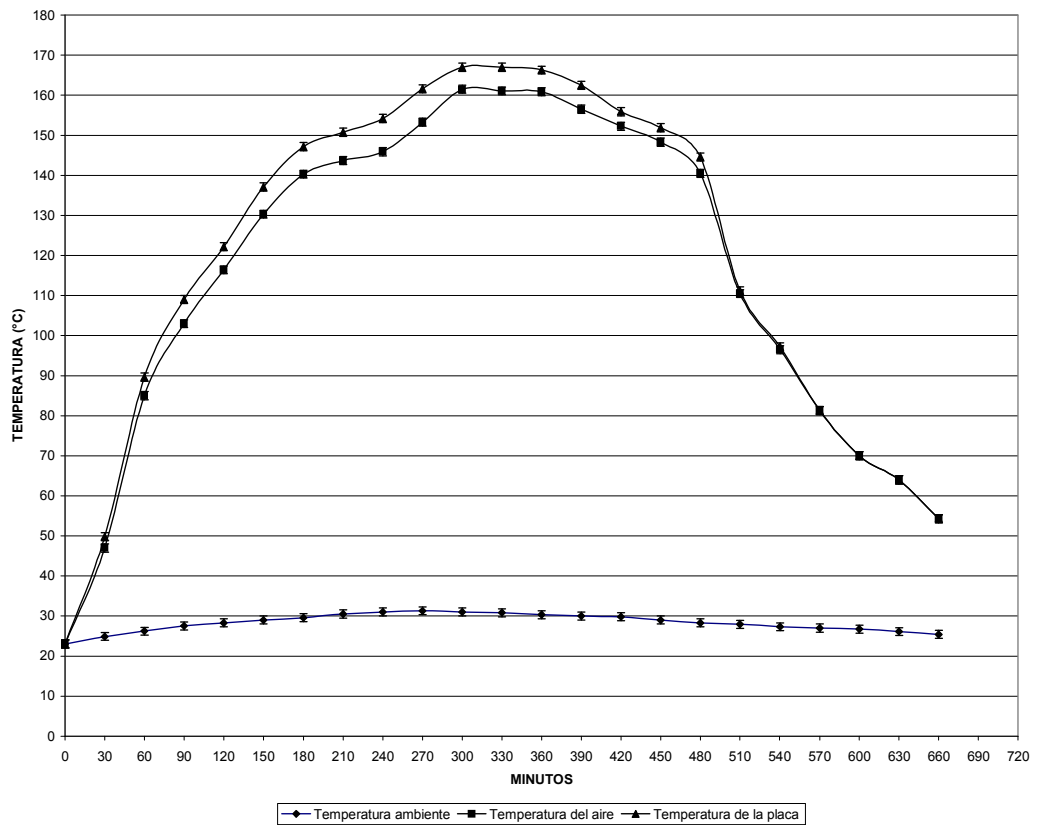
Figura 33. Vista de la transparencia de los estanques



Figura 34. Vistas del horno solar tipo caja con reflector en operación

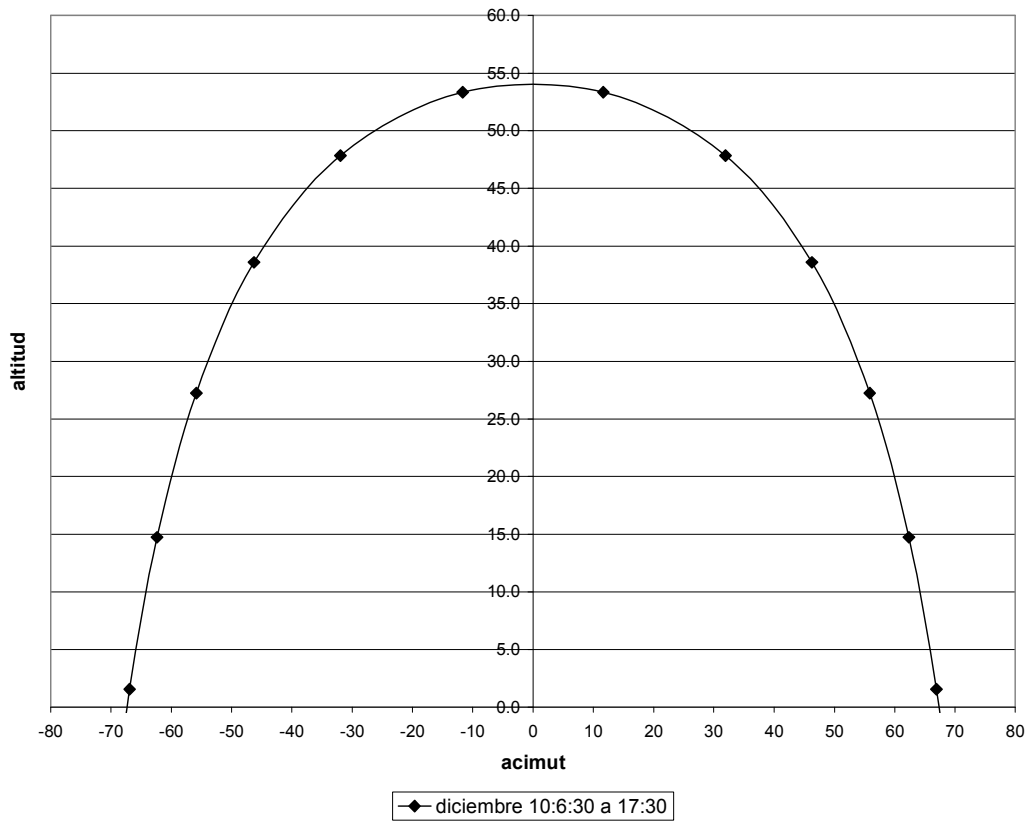


Figura 35. Evolución de la temperatura ambiente, del aire del interior y de la placa absorbente del horno solar tipo caja



Las mediciones se realizaron entre 8:00 a.m. a 7:00 p.m. El horno se cubrió con la tapa reflectora a partir de las 5:30 p.m. La precisión es de +/- 1 grado.

Figura 36. Altitud y Acimut durante el 10 de diciembre, 6:30 a.m. a 17:30 p.m., tiempo solar (+/- 20 %)



Los especialistas sugieren este día como promedio para el mes de diciembre (Duffie y Beckmann, 1980)

Figura 37. Evolución de la temperatura de 2 kg de agua en un recipiente dentro del horno solar, de 10:00 a. m. a 14:00 p.m (+/- 1 grado)

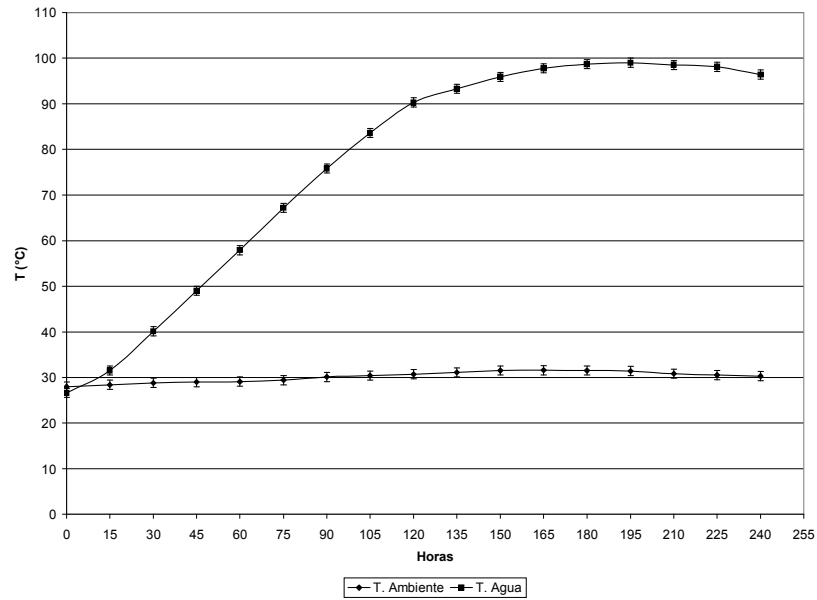


Figura 38. Potencia del horno solar cada 15 minutos (+/- 5 % W).

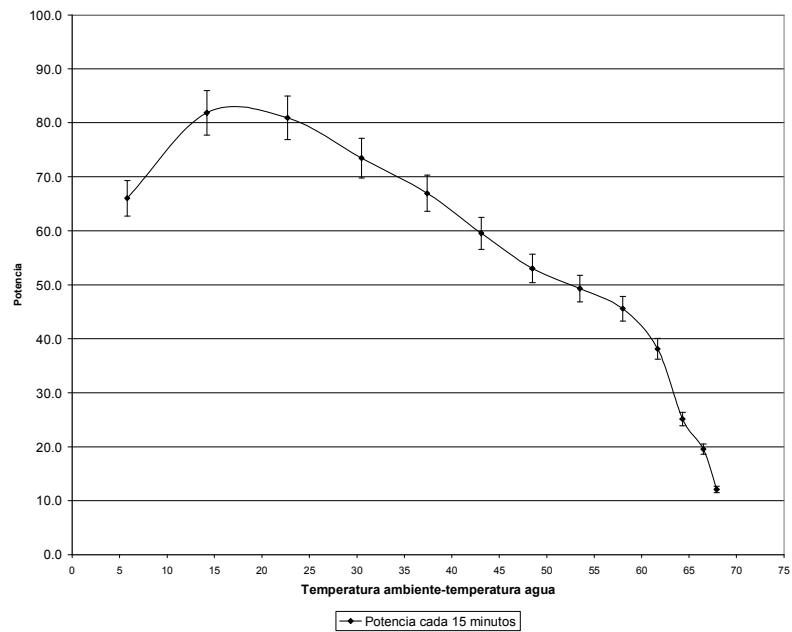


Figura 39. Vista de ensayos con secador solar tipo chimenea



Figura 40. Instrumentos para mediciones externas del secador solar



Figura 41. Fotografías de la ubicación de los termómetros en el interior del secador solar tipo chimenea



La fotografía superior a la derecha de la figura 45 muestra al medidor de temperatura de inmersión cuya lectura se ha podido realizar a través de la chimenea cuando la puerta ha estado cerrada. Un termómetro similar se ha colocado en la parte inferior del gabinete de secado. Los dos termómetros se observan en la fotografía inferior izquierda. La fotografía de la derecha inferior muestra el termómetro para hornos para medir la temperatura del flujo de aire que sale del colector.

También se estimó la eficiencia del secador a través de la cantidad de agua perdida por 1 kg de carne de coco luego de haber permanecido 2 días en el secador. El peso final de la carne de coco fue de 0.65 kg. La eficiencia resultó ser de 4.3 %. Este valor es muy cercano al que proponen los especialistas para este tipo de secadores, es decir 5.8 +/- 0.6%.

La temperatura del gabinete de secado ha resultado de aproximadamente 39 °C, que es cercano a lo adecuado según los especialistas (ICAITI, 1,985). La velocidad del viento se esperaba alrededor de 1 m/s y solamente se obtuvo la mitad, en el mejor de los casos. Para mejorar el flujo de aire hay que rediseñar el prototipo, probablemente utilizando un ventilador asociado a una celda fotoeléctrica.

Figura 42. Voluntarias de Monterrico ensayando el horno solar

