

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA

ESTUDIO DE UN SISTEMA DE CONCENTRACION DE  
SALMUERAS POR EVAPORACION SOLAR

160

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A

ADOLFO FRANCO MAGADAN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CLAS TOSII  
AGE 7976  
FECHA 7976  
PROC MT

161



QUIN. 0.

...VENGO AL ENTIERRO DE CESAR

MAS NO A ENSALZARLO.

(SHAKESPEARE).

A MI MAESTRO EL ING. ALBERTO BRE-

MAUNTZ COMPLEMENTO IMPORTANTE DE

MI FORMACION JUVENIL, MOTIVO CONS

CIENTE DE SUPERACION CONSTANTE.

EN AGRADECIMIENTO A SU ENSEÑANZA

MORAL Y TECNICA.

EN AGRADECIMIENTO A LA OPORTUNIDAD

QUE ME BRINDO.

MUY RESPETUOSAMENTE.

CON PROFUNDA ADMIRACION Y RESPETO  
PARA EL DR. SERGIO GARCIA RAMIREZ  
POR LA CALIDAD DE LA FINEZA DE --  
SUS ATENCIONES.

QUE DECIR DEL ESCRITOR POLIGLOTA  
Y HOMBRE DE LETRAS, MI AMIGO  
ANTONIO SANCHEZ GALINDO, EN  
RECONOCIMIENTO A LAS EXAGERAD  
DAS ATENCIONES QUE ME BRINDO  
CUANDO COMPARTIO VIVENCIAS Y  
PROBLEMAS LABORALES EN SU --  
INSTITUCION CON UN SERVIDOR.

A MI ASESOR Y AMIGO EL ING. ANTO-  
NIO FRIAS POR LAS INMERECIDAS  
OCASIONES EN QUE ME BRINDO --  
AYUDA EN TODOS LOS ASPECTOS.

A MI PADRE. A MI MADRE.

POR EL PALPITANTE ANHELO DE VER LA REALIZACION  
DE UN FRUTO DE UNA UNION.

POR EL INCANSABLE IMPULSO QUE SE VE Y SE SIENTE  
EN EL FONDO DE UN ALMA FATIGADA.

POR LA FUERZA MAXIMA EXISTENTE EN EL UNIVERSO  
QUE HAN SABIDO FOMENTAR EN MI, LA  
VOLUNTAD.

POR EL PODEROSO DON QUE EJERCE SOBRE EL PENSAR  
AQUELLA FRASE EXACTA EN EL MOMENTO EXACTO  
DE UN CORAZON QUE NO TIENE CABIDA PARA  
LA DUDA.

POR LO QUE PUEDE REPRESENTAR PARA ELLOS UN  
MOMENTO, UN OBJETO O SIMPLEMENTE LA HIS-  
TORIA IMPRESA EN EL TRANSCURSO DEL TIEM-  
PO DE ALGO QUE AL VERLO GENERA EN AQUE--  
LLOS CORAZONES CANSADOS LO QUE QUIZA EN  
SEMEJANZA ES UNA SATISFACCION, O EL TES  
TIMONIO ESCRITO DE UNA ETAPA DE SUS VI-  
DAS QUE LLANA Y CALLADAMENTE, ALLA EN -  
LO ARCANO DE SUS CORAZONES VIVE COMO FUE  
GO INTENSO QUE SE ALIMENTA CON EL RECUER  
DO Y LA AÑORANZA DE AQUEL TIEMPO.

POR TODO LO QUE UN TAL VEZ LISONJERO CORAZON  
AGRADECIDO PUEDA EXPRESAR.

A MI HERMANO.

POR LOS CONSTANTES CONSEJOS

E IMPULSOS POSITIVOS.

A MI HERMANA.

A TODOS LOS MIEMBROS DEL JURADO

A MIS MAESTROS

A MI FACULTAD

A LA U.N.A.M.

# I N D I C E

Página

## CAPITULO I.

Introducción.....	1
-------------------	---

## CAPITULO II.

Pérdidas de Calor por Conducción y Convección.....	7
a).- Como calcular pérdidas de agua.....	26

## CAPITULO III.

Aprovechamiento y absorción de radiación solar.....	33
a).- Propiedades Térmicas.....	46
b).- Aumento de Temperatura.....	55
c).- Energía Disipada.....	69
d).- Eficiencia en cortos intervalos de tiempo.....	79
e).- Variaciones horales de la temperatura media.....	83
f).- Estabilidad Térmica.....	91
g).- Nomenclatura.....	103

## CAPITULO IV.

Análisis Empírico de la Evaporación Solar	
a).- Variación diurna de temperaturas y profundidad.....	107
b).- Absorción de Energía Solar.....	117
c).- Experimentos y observaciones.....	125
d).- Nomenclatura.....	138

## CAPITULO V.

Conclusiones.....	140
BIBLIOGRAFIA.....	150

## C A P I T U L O I

### INTRODUCCION

El siglo XX se ha caracterizado, en lo que a energía se refiere, por la búsqueda incansable del abatimiento del costo de la caloría, el óptimo aprovechamiento de la energía, y la cada vez más realista expresión  $E = mc^2$ .

El tema "Energía" adquiere primordial interés en -- nuestros días, ante la amenaza de la escases de e--nergéticos en la medida en que las ciudades indus--triales dependen de la localización o utilización -- de las fuentes de combustibles fósiles.

Así pues el hablar de energía en la presente introducción implica el discutir las fuentes primordia--les de la misma mencionando como recursos de energía terrestre la solar, salvo la energía nuclear y en su mayor parte la que ha sido acumulada durante millones de años por procesos de fotosíntesis, me refiero al petróleo.

Historicamente el hombre, incorforme con todo, en su búsqueda por nuevas conquistas y posesiones ha --

hecho intentos de utilización de energía solar y -- así la leyenda cuenta que Arquímedes usó la energía solar por medio de colectores y concentradores solares contra las naves romanas que atacaban a Siracusa en el año 320 a.c.

Si el costo de recoger y utilizar la energía solar no puede competir en la mayoría de las aplicaciones con los costos de energía de otras fuentes se dice entonces que el proceso no es rentable.

En las regiones no industrializadas y particularmente en los países áridos, donde la radiación es abundante y los combustibles fósiles son muy costosos, la energía solar posee una posición de competencia más favorable, en especial para instalaciones pequeñas, aisladas, en donde en unos cuantos años puede alcanzar importancia.

Dentro de la gran diversidad de usos en energía solar se encuentran:

- calefacción doméstica
- calentamiento de agua
- generación de energía
- hornos solares
- cocinas

acondicionamiento de aire

secado

refrigeración

destilación

fotosíntesis

evaporación

etc.

Versatilidad de un tema es: presencia en los problemas actuales, proyección en los futuros, fuente de recursos. Actualidad de un tema es: conciencia de una escasez, realidad de una época ...

Por su versatilidad y actualidad de tema la presente tesis enfoca uno de los más antiguos y quizá el más interesante uso de Energía Solar.

"Evaporación Solar para concentración de Salmueras" Abordándose el tema en el capítulo II, se establece el balance de energía de un elemento diferencial de volumen para llegar al establecimiento de las expresiones generales que gobiernan el fenómeno sin atender a efectos de radiación y energía solar. Para posteriormente analizar casos específicos de velocidad de viento y obtener para cada caso particular una expresión para calcular las libras de agua evaporada en función de cantidades fácilmente medibles como son: presión de vapor del agua, temperatura de bulbo seco, temperatura de la superficie del agua y presión de vapor a la temperatura de la superficie del agua. Se trata también otro método para calcular la evaporación solar en  $\text{lb/hft}^2$  en función de la humedad relativa del aire y la presión de vapor

del agua en el aire por medio de factores empíricos y gráficas.

En el capítulo III se estudia la distribución de -- temperaturas en una alberca solar como consecuencia de una radiación solar aprovechada. La influencia -- de las propiedades térmicas de la solución y alrededores sobre el perfil de temperaturas de la superficie al fondo de una alberca solar. Discutiendose el efecto de una zona llamada zona convectiva en el -- fondo de la alberca sobre la estabilidad térmica, -- se hace presente la existencia de perturbaciones como son:

movimientos de masa

cambios de densidad

transferencias de calor

movimientos de onda de la superficie.

Que por medio de la apreciación de gráficas de concentración contra profundidad de albercas se llega a dictaminar o concluir la manera más adecuada de -- captar energía solar por medio de la conservación -- de un gradiente de concentración de sal.

Es en la capítulo IV donde se pone de manifiesto el efecto de los rayos solares, la profundidad y los --

colorantes sobre la evaporación solar, manejo y uso de colorantes para el mejor aprovechamiento de la energía solar, y en base a datos empíricos se hace un análisis estadístico de correlación y regresión que por medio de gráficar ciertos parámetros se llega a encontrar las constantes  $\alpha$  y  $\beta$  que se encuentran en la expresión

$$E = (\alpha + \beta w)(pB - pA)$$

misma que sirve para calcular las libras de agua -- evaporada en cualquier superficie de agua bajo condiciones conocidas.

Como corolario a esta introducción se puede afirmar que tres divisiones importantes destacan en la presente tesis:

- I.- Balance de Calor.
- II.- Efectos de Física y Energía Solar sobre la evaporación.
- III.- Efecto de colorantes, profundidad y ángulo de incidencia de los rayos solares sobre evaporación Solar.

## C A P I T U L O    I I

Perdidas de calor por conducción y convección en Superficies de agua, libres a la atmósfera.

La evaporación en una superficie determinada de agua, (dada en  $\text{lb/hft}^2$ ) es a grozo modo igual a la energía radiante que incide en dicha superficie en  $\text{cal/ft}^2 \text{ h}$  dividida por el calor latente de vaporización ( $\text{cal/lb}$ ); corregida por el calor al macenado en el agua (dado por la ecuación  $Q = mC_p \Delta T$ ) debido a algún cambio en su temperatura.

Estrictamente hablando, lo anterior sería cierto si se despreciaran pérdidas de calor por conducción ( $Q = KA \Delta T$ ) y convección ( $Q = hA (\Delta T)$ ) al medio ambiente, ya que estas pérdidas causan un abatimiento en la temperatura global de una masa de agua, disminuyendo la evaporación por  $\text{ft}^2$  de superficie.

Teóricamente una masa de agua se puede calentar por medio de energía solar hasta la temperatura de equilibrio, es decir hasta la temperatura tal

que el calor ganado por radiación solar sea igual al perdido por evaporación esto es:

$$y \frac{\text{cal}}{\text{h ft}^2} = \frac{\text{cal}}{\text{lb h}}$$

Desde este punto de vista la evaporación solar so lo estaría afectada por la temperatura en una masa dada de agua, y el viento y la humedad del aire no afectarían.

El presente tema tiene como fundamental objetivo evaluar pérdidas por conducción y convección en términos de cantidades fácilmente medibles, y así determinar si ellas son bastante pequeñas para -- ser despreciadas; y si no, como pueden ser corregidas.

Con el objeto de simplificar cálculos, se supon-- dra en la primera parte que los coeficientes de - difusión, conductividades, y densidades son inde-- pendientes de la temperatura.

Se puede escribir para la masa  $m$ , de vapor de --- agua que se transporta por difusividad por unidad

de tiempo a través de un espacio de longitud  $l$ , y área  $a$ ,

$$m = D_1 a (\rho_1 - \rho_2) / l \quad 1$$

$\rho_1$  y  $\rho_2$  son las densidades del vapor de agua en la interface y en el aire respectivamente y  $D_1$  es el coeficiente de difusión de vapor de agua dado en  $\text{ft}^2/\text{h}$  a través del aire.

Si se multiplica ambos lados de esta ecuación por  $L$ , el calor latente de vaporización, (en  $\text{cal}/\text{lb}$ ) se obtiene:

$$Lm = D_1 a (L\rho_1 - L\rho_2) / l \quad 2$$

$$\frac{\text{cal}}{\text{lb}} \times \frac{\text{lb}}{\text{h}} = \frac{\text{ft}^2}{\text{h}} \times \frac{\text{ft}^2}{\text{ft}^3} \left( \frac{\text{cal}}{\text{lb}} \times \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right) \text{ft}^{-1} = \frac{\text{cal}}{\text{h}}$$

y si se representa a  $\theta_1$  y  $\theta_2$  por la energía por ---

unidad de volúmen debido a calor latente,

$$\left( \frac{\text{cal}}{\text{lb}} \times \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} = \frac{\text{cal}}{\text{ft}^3} \right) \text{ la energía que se pierde}$$

por evaporación es:

$$Q_L = D_1 a (\theta_1 - \theta_2) / l \quad 3$$

$$Q_L = \frac{\text{ft}^2}{\text{h}} \times \text{ft}^2 \left( \frac{\text{cal}}{\text{lb}} \times \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right) \times \text{ft}^{-1} = \frac{\text{cal}}{\text{h}}$$

Similarmenete se puede escribir la fórmula para la energía calorífica que se pierde por conducción, a través del mismo espacio anterior a régimen permanente:

$$Q_c = Ca(T_1 - T_2) / l \quad 4$$

Donde C es la conductividad de el aire en el espacio dada en BTU/h ft<sup>2</sup> (°F/ft) y T<sub>1</sub> y T<sub>2</sub> son respectivamente las temperaturas de la interfase y aire.

Sustituyendo  $C = D_2 C_{pd}$ , donde  $D_2$  es el "coeficiente de difusión"

$$\frac{\text{BTU}}{h \text{ ft}^2 (\text{°F}/\text{ft})} = \text{ft}^2/h \times \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \text{°F}} \times \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

o difusividad para la energía calorífica,  $C_p$  es el calor específico a presión constante, dado en  $\frac{\text{BTU}}{\text{lb} \text{°F}}$  y  $d$  es la densidad de el aire dado en  $\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$

la ecuación 4 se hace:

$$Q_s = D_2 a (T_1 C_{pd} - T_2 C_{pd}) / l \quad 5$$

denominando a  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  como las densidades de la energía calorífica específica en las dos faces dadas en

$$\frac{\text{BTU}}{\text{ft}^3} = \text{°F} \times \frac{\text{BTU}}{\text{lb} \text{°F}} \times \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

las pérdidas de calor por convección están dadas - por la ecuación :

$$Q_s = D_2 a (\psi_1 - \psi_2) / l \quad 6$$

Se puede observar que las ecuaciones 3 y 6 son de la misma forma, la única diferencia está en los valores de  $D_1$  y  $D_2$ , los cuales difieren un poco, -- (una relación predecida por la teoría cinética). Esto permite ver que las pérdidas de calor por evaporación, difusión, y por conducción seguirán las mismas leyes y serán afectadas en la misma forma -- que por convección.

Considerese el caso de cualquier superficie de agua libre a la atmósfera sobre la cual está soplando el viento (fig. siguiente)

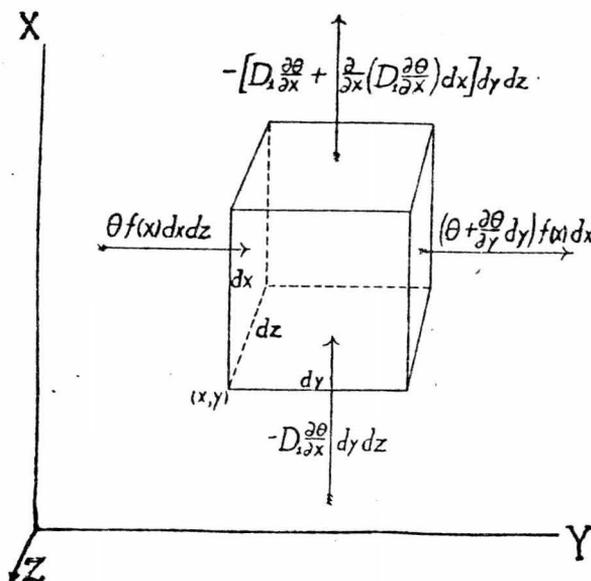


Fig. 1.

Sea "y" la distancia de la trayectoria que sigue el viento en el lago considerado paralela a la dirección del viento. Supongase que la velocidad del viento a una distancia y arriba de la superficie del lago es  $f(x)$  y también que es bastante grande para que la velocidad de difusión horizontal sea despreciable en comparación con la velocidad de difusión vertical. Para cualquier elemento de volumen  $dx dy dz$  la cantidad de energía que entra como calor latente por unidad de tiempo del lado inferior es  $-D_1 \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) dy dz$ , en el lado superior la cantidad de energía que sale como calor latente es:

$$-\left[ D_1 \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( D_1 \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) dx \right] dy dz$$

Si se supone que  $D_1$  es constante, la diferencia es entonces:

$$D_1 \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right) dx dy dz.$$

A régimen permanente, ésta ganancia de energía es arrastrada por el viento que pasa a través de el volúmen en la unidad de tiempo. El aire que pasa a través del volúmen  $dx dy dz$  cambia su densidad de energía en forma de calor latente de  $\theta$  a  $\theta + \left(\frac{d\theta}{dy}\right) dy$  y por consiguiente si el volúmen que pasa por unidad de tiempo es  $f(x) dx dz$  (velocidad por área) - la cantidad total de energía disipada por el viento es  $\left(\frac{d\theta}{dy}\right) f(x) dx dy dz$ .

Iguando esas dos cantidades se tiene:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} f(x) = D_2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \quad 7$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} f(x) = D_1 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad 8$$

que son las ecuaciones generales que determinan  $\theta$  y  $\varphi$  en todos los puntos situados arriba de una superficie de agua libre a la atmósfera (un lago).

Las condiciones a la frontera son  $\varphi = \varphi_1$ ,  $\theta = \theta_1$  en  $x=0$  y  $\varphi = \varphi_2$ ,  $\theta = \theta_2$  en  $y=0$ .  $\varphi_2$  y  $\theta_2$  representan la densidad de energía, en -

la forma de calor específico (capacidad calorífica) y latente respectivamente, de el aire que entra, y  $\varphi_1$  y  $\theta_1$ , representan las correspondientes densidades para la capa de aire en contacto con el agua. Debido a la imposibilidad de obtener una solución general de esas ecuaciones para cualquier función  $f(x)$  se consideraran ciertos valores especiales de  $f(x)$ .

Caso I.

$f(x) = k$  de  $x = 0$  a  $x = a$ ;  $f(x) = 0$  de  $x = a$  a  $x = \infty$

Si "a" y "k" tienen valores pequeños y la superficie de agua es grande, la capa de aire de  $x = 0$  a  $x = a$  tendrá variaciones de temperatura hasta alcanzar la temperatura de equilibrio de saturación del agua, su densidad de calor específico cambiará de  $\varphi_2$  a  $\varphi_1$  y su densidad de calor latente varía de  $\theta_2$  a  $\theta_1$ .

La relación R de calor perdido por conducción al perdido por evaporación es:

$$R = (\varphi_1 - \varphi_2) / (\theta_1 - \theta_2)$$

Esta es la expresión que relaciona dos clases de energía que es captada en cada centímetro cúbico de aire que fluye sobre la superficie de agua libre a la atmósfera.

Caso II.

$$f(x) = 0, \text{ de } x = 0, \text{ a } x = a; f(x) = k \\ \text{de } x = a \text{ a } x = \infty.$$

Si el área del lago es pequeña y la velocidad  $k$  grande, entonces el vapor de agua y el calor difundiendo a través de la capa estacionaria de  $x = 0$  a  $x = a$ , será expulsada inmediatamente y se puede suponer  $\psi = \psi_2$ ,  $\theta = \theta_2$  en la capa  $x = a$ .

Bajo esas condiciones la rapidez a la cual el calor y el vapor de agua se retiran de la superficie de agua son determinados solamente por difusión y la relación entre ellos es simplemente la ecuación 6 dividida entre la 3.

$$R = D_2(\varphi_1 - \varphi_2) / D_1(\theta_1 - \theta_2)$$

Caso III.

$f(x) = kx^n$  de  $x = 0$  a  $x = \infty$ .  
una solución a este valor de  $f(x)$  es

$$\theta = \theta_1 + (\theta_2 - \theta_1) \frac{\int_0^x \left[ \frac{K}{(n+2)^2 D_{1y}} \right]^{\frac{1}{n+2}} e^{-\sigma^{n+2}} d\sigma}{\int_0^\infty e^{-\sigma^{n+2}} d\sigma} \quad (1)$$

La rapidéz de difusión por área unitaria de la superficie de agua a través del plano  $x = 0$  es

$$Q_L = -D_1 \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{D_1 (\theta_1 - \theta_2) \left[ \frac{K}{(n+2)^2 D_{1y}} \right]^{\frac{1}{n+2}}}{N} \quad (2)$$

donde

$$N = \int_0^\infty e^{-\sigma^{n+2}} d\sigma$$

Similarmente

$$Q_2 = -D_2 \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{D_2 (\varphi_1 - \varphi_2) \left( \frac{K}{(n+2)^2 D_2 y} \right)^{\frac{1}{n+2}}}{N} \quad 13$$

lo cual da

$$R = \frac{Q_2}{Q_1} = \left( \frac{D_2}{D_1} \right)^{\frac{n+1}{n+2}} \left( \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\theta_1 - \theta_2} \right) \quad 14$$

Esta relación es independiente de "y" y por consiguiente se cumple tanto para cada  $\text{cm}^2$  de agua como para el lago total.

El caso I representa una condición donde la masa de aire que esta en contacto con el agua cambia -- constantemente de temperatura y contenido de vapor de agua.

Por esta razón la difusión no es el factor limitante y por consiguiente los coeficientes de difusión

no entran en la fórmula para la relación de calores perdidos por los dos mecanismos. Si las condiciones son tales que la difusión no toma parte en el fenómeno, una manera de aumentar las pérdidas de calor por el proceso es teniendo mayor coeficiente de difusión en relación a las pérdidas de energía por conducción. Bajo cualquier condición de viento si  $D_1 > D_2$

$$R \leq (\varphi_1 - \varphi_2) / (\theta_1 - \theta_2)$$

15

## Caso II.

Se representan condiciones donde la difusión es el factor completamente determinante, el calor y el vapor de agua se disipan después de difundirse a través de la capa estacionaria. Si el calor y el vapor de agua no son disipados inmediatamente después de pasar la capa estacionaria, es decir no se crea un régimen permanente, tienden a incrementarse la temperatura y densidad del vapor en la capa

estacionaria disminuyendo el gradiente en la misma. Esto por consiguiente tiende a bajar lentamente la difusión. La energía se perderá más rápido por medio del mecanismo que tenga el coeficiente de difusión más alto y el mecanismo con más bajo coeficiente de difusión transportará energía más lentamente.

Por lo que se puede escribir:

$$R \geq D_2(\varphi_1 - \varphi_2) / D_1(\theta_1 - \theta_2) \quad 16$$

Los resultados del caso III soportan esas conclusiones para todos los valores de  $N \geq 0$

$$\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\theta_1 - \theta_2}\right) \geq R \geq \frac{D_2}{D_1} \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{\theta_1 - \theta_2}\right) \quad 17$$

Los valores negativos de " $\mu$ " estan sin significado físico ya que ellos podrían implicar una velocidad infinita en  $x = 0$ . El limite superior de  $R$  en la ecuación (17) corresponde al caso  $f(x) = k$

ejemplo:

viento con velocidad constante.

Los valores entre éste límite y el límite dado por el caso I corresponde a condiciones donde  $f(x)$  es una función decreciente de  $x$  por lo que no corresponde a las condiciones sobre un lago. La anterior discusión muestra que  $R$  cae bajo todas las condiciones entre los valores dados por el caso I y el caso II.

Para esos dos casos, no es necesario suponer los valores de  $D$ ,  $C$ , y  $\rho$  independientes de la temperatura.

En el caso I si se consideran los cambios en un volumen de aire de  $1 \text{ cm}^3$  a  $0^\circ\text{C}$ , la cantidad de calor necesaria para calentarlo de la temperatura del -- aire,  $T_a$ , a la temperatura del agua  $T_w$  es:

$$Q_s = d_a C_p \frac{P}{760} (T_w - T_a) \quad 18$$

donde  $d_a$  es la densidad del aire a  $0^\circ\text{C}$ , 760mm Hg,  $C_p$  es el calor específico a presión constante, y  $P$  es la presión del aire en mm Hg. La cantidad de calor en forma de calor latente cuando ésta cantidad de aire se satura a la temperatura  $T_w$  es:

$$Q_L = L \left( \frac{\rho_w T_w - \rho_a T_a}{273} \right) \quad 19$$

Donde  $\rho_a$  y  $\rho_w$  son respectivamente las densidades del vapor de agua en el aire de entrada y en la capa de aire en contacto con el agua.

Entonces

$$R = \frac{Q_s}{Q_L} = \frac{d_a C_p \frac{P}{760} (T_w - T_a)}{L \left( \frac{\rho_w T_w - \rho_a T_a}{273} \right)} \quad 20$$

Tomando en cuenta los coeficientes de temperatura conocidos de conducción de calor y difusión, dada para el caso II

$$R = \frac{C_0(T/273)^{\gamma_1}(T_w - T_a)}{LD_{1,0}(T/273)^{\gamma_2}(\rho_w T_w - \rho_a T_a)760/P} \quad 21$$

donde  $C_0$  y  $D_{1,0}$  son los valores de la conductividad y coeficiente de difusión a  $0^\circ\text{C}$ . La teoría cinética da  $\gamma_1 = \gamma_2 = 1/2$ , mientras los datos experimentales indican un valor algo grande, pero se cumple que  $\gamma_1 = \gamma_2$ . Si se substituyen en esas fórmulas los siguientes datos experimentales.

$$d_0 = .001293 \quad D_0 = .206 \quad C_0 = .0000566$$

$$C_p = .241 \quad L = 585 \quad \rho_a T_a/273 = P_a/9.41 \times 10$$

$\rho_w T_w/273 = P_w/9.41 \times 10$  donde  $P_a$  y  $P_w$  son las correspondientes presiones parciales de vapor de agua expresadas en mm de Hg se obtiene:

Caso I

$$R = .501 \left( \frac{T_w - T_a}{P_w - P_a} \right) \frac{P}{760} \quad 22$$

Caso II

$$R = .442 \left( \frac{T_w - T_a}{P_w - P_a} \right) \frac{P}{760} \quad 23$$

El caso III muestra que bajo condiciones ordinarias donde  $f(x)$  es una función creciente de  $x$ , el verdadero  $R$  es más cercano al caso II que al caso I

Se puede tomar como ecuación más probable:

$$R = .46 \left( \frac{T_w - T_a}{P_w - P_a} \right) \frac{P}{760} \quad 24$$

Esta ecuación es, válida solo para valores de  $T_w$  en condiciones que volúmen del aire no se apreciablemente aumentado por el vapor de agua evaporada en él y también que el vapor de agua difundiendo a través de la capa de aire frío arriba de la interfase o capa estacionaria no se condensa para caer a la superficie del agua. Esta última condición es violada bajo condiciones extremas ya que el aire al

calentarse por conducción su punto de rocío aumenta por la difusión de vapor de agua.

Como un ejemplo sea  $T_w = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $T_a = 15^{\circ}\text{C}$ ,  $H_r = .5$   
 $P = 760$  mm Hg. Esto da  $R = .21$  lo cual indica que -  
 mientras la relación es variable y puede ser corregida  
 por ésta fórmula no puede ser despreciada.

$R = -1$ , la fórmula standard para la determinación -  
 de  $P_a$  por medio de la temperatura de bulbo seco y -  
 húmedo.

COMO CALCULAR PERDIDAS DE AGUA Y CALOR EN  
ALBERCAS Y RECIPIENTES CON AGUA.

Transferencia de masa.

La ecuación básica de transferencia de masa de un recipiente con un líquido de área superficial A - expuesto a la atmósfera es:

(1)

$$W = K_g A (pp1 - pp2)$$

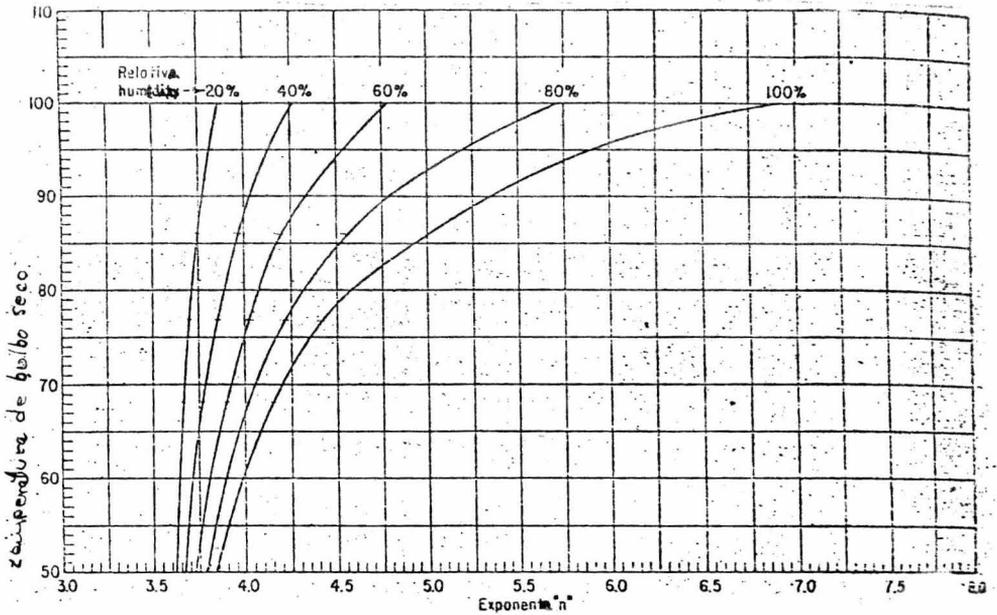
Si la temperatura del agua se grafica logarítmicamente contra los valores en tablas de ( pp1 - pp2 ) la curva es casi una línea recta. La desviación es muy pequeña sobre el rango de temperaturas de 75° a 200° F., y para todos propósitos prácticos la -- curva puede ser considerada una línea recta sobre este rango teniendo la ecuación típica:

(2)

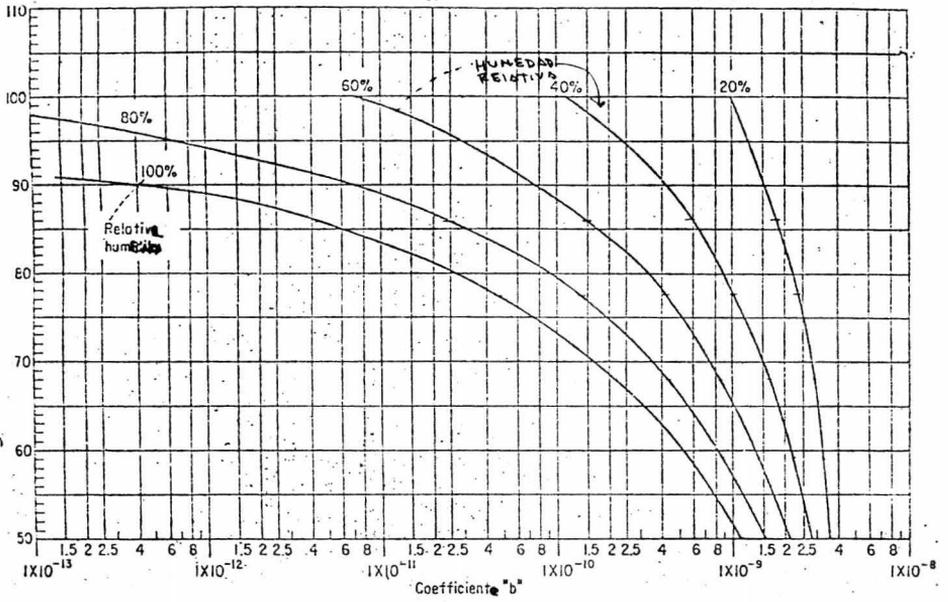
$$(pp1 - pp2) = bT^n$$

Los valores del coeficiente b y el exponente n dependen de la temperatura de bulbo seco y humedad -

relativa. Una familia de curvas mostrada en las siguientes figuras se desarrollaron para varias condiciones atmosféricas y valores apropiados de  $b$  y  $n$  que se pueden leer de esas curvas.



Grafica Humedad Relativa, Temperatura de Bulbo Seco y Exponente .



Substituyendo la ecuación 2 en la 1 se  
obtiene:

$$W = k_p A b T$$

Si  $A$  es una área unitaria y  $\lambda$  es el calor latente de vaporización a la temperatura  $T$ , por substitución:

$$q_s = k_s \lambda b T^n$$

Suma de la pérdida de calor sensible.

En suma a la pérdida de calor por evaporación hay una pérdida de calor sensible por conducción del cuerpo del fluido caliente al aire frío, esto se puede relacionar en una área unitaria por:

$$(q_s = h_s \Delta T) \quad (4)$$

Para aire en movimiento sobre superficies planas:

$$h_s = 1 + 0.330 V \quad (5)$$

Substituyendo en la ecuación 4:

$$q_s = (1 + 0.330 V) (\Delta T) \quad (6)$$

Pérdidas de calor totales combinando las ecuaciones 3 y 6:

$$q_s = k_s \lambda b T^n + (1 + 0.330 V) (\Delta T) \quad (7)$$

El único término desconocido en esta ecuación es - el coeficiente de transferencia de masa  $K_g$ , que se puede calcular del coeficiente de transferencia de calor de la ecuación 5. De acuerdo con la correlación de Lewis para un sistema aire - agua.

$$\frac{h_g}{29 k_g} = 0.26$$

$$k_g = \frac{h_g}{(29)(0.26)} = \frac{1 + 0.330 V}{7.54}$$

Substituyendo ésto en la ecuación 7 y suponiendo - un valor promedio para  $\lambda$  de 18000 BTU / lb mol.

$$\begin{aligned} q_s &= \frac{(1 + 0.330 V)(18,000) bT^*}{7.54} + (1 + 0.330 V)(\Delta T) \\ &= (1 + 0.330 V)(2,387 bT^* + \Delta T) \end{aligned} \quad (8)$$

Esta es una ecuación final que se usa para calcular pérdidas de calor totales de la superficie de una alberca libre a la atmósfera.

Se desprecian las pérdidas de calor por conducción a través de las paredes del recipiente.

Para albercas aisladas o recipientes, las pérdidas de calor a la tierra son despreciables. Si la tem-

temperatura alberca	perdidas de calor	
F.	Calc.	Actual
122	362	285
130	450	450
140	581	655

Esas diferencias son probablemente causadas por inhabilidad para precisas medidas nuevas de la velocidad del aire. Al nivel de la alberca las ecuaciones 3 y 9, la velocidad del viento tiene un efecto marcado sobre vaporización y pérdidas de calor.

Las pérdidas de calor de la superficie de albercas calientes o recipientes está compuesta de dos fenómenos separados.

El primer y mas importante es la vaporización controlada por transferencia de mas y la segunda, son pérdidas por conducción a través de la película de aire sobre la superficie de la alberca. Estos factores forman el 30% - 30% del total de vaporización.

M O M E N C L A T U R A

- A Superficie total del líquido o alberca expuesto a la atmósfera en ft.
- T Temperatura del fluido en alberca o recipiente F
- AT Diferencia de temperatura entre la temperatura de bulbo seco atmosférica y la temperatura del fluido en el recipiente o alberca F.
- V Velocidad atmosférica del viento mph.
- W Rapidéz de transferencia de vapor lb/hr.
- b Coeficiente adimensional.
- hg Coeficiente de transferencia de calor de la interfase del líquido al aire Btu/hrft F.
- Kg Coeficiente de transferencia de calor de la interfase líquida al aire lb-mol/hr ft fracción mol.
- h Exponente adimensional.
- pp1 Presión parcial del vapor de agua a la temperatura de la alberca o recipiente atm.
- pp2 Presión parcial del vapor de agua en el aire a temperatura ambiental.
- qc Perdidas de calor unitarias por conducción.

### C A P I T U L O   I I I

#### Aprovechamiento y absorción de radiación solar en albercas.

La energía solar que incide sobre un plano horizontal a la superficie terrestre depende de la latitud, el día del año y de las condiciones climatológicas y atmosféricas del día en cuestión.

En términos mucho muy generales se puede afirmar que la energía solar captada por la atmósfera terrestre puede ser:

- 1.- Radiación directa.
- 2.- Radiación difusa.

La segunda distribuyéndose sobre el espectro en ultravioleta visible e infrarojo.

La radiación global total que incide sobre una superficie cualquiera se mide en función de la situación meteorológica del lugar en cuestión. Analizando el caso específico de superficies de agua libres a la atmósfera la radiación que alcanza a -

llegar a éstas sigue dos caminos que son: reflexión y absorción por la alberca.

La fracción de radiación que penetra durante un determinado día puede ser calculada en base a las ecuaciones de Fresnel siguientes:

$$\begin{aligned} E &= 2n(a^2 + b^2) \cos i \cos r \\ a &= 1/(\cos r + n \cos i) \\ b &= 1/(\cos i + n \cos r) \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $E$  es el cociente de la radiación que penetra una superficie de agua y la total que incide en la misma superficie, consideradas en un plano horizontal arriba de la superficie del agua;  $i$  es el ángulo que forman la radiación total incidente con la normal. (la distancia al zenit solar).  $n$  es el índice de refracción de la solución de agua salada en la superficie (por lo regular éste valor fluctua al rededor de 1.33 para soluciones muy diluidas) y  $r$  es el ángulo hecho por el rayo refractado con la normal.

De la ley de Snell.

$$\text{seni} = n \text{ sen r}$$

La radiación difusa, y la directa, son dependientes direccionalmente. En lo consiguiente para propósitos de deducción de ecuaciones y estudio se considerará a la radiación difusa que llega con igual intensidad en todas las partes de la atmósfera.

La fracción de radiación difusa que penetra una superficie de agua es:

$$2 \int_0^{\pi/2} E \cos i \sin i \, di \approx 0.93$$

La distancia solar al Zenit se puede medir directamente o hacer un cálculo aproximado por:

$$\cos i = \cos (\text{latitud}) \cos \delta \sin 2\pi (t-6) / 24 + \sin (\text{latitud}) \sin \delta$$

$t$  = tiempo en horas (tarde = 12)

$\delta$  = declinación del sol  $\approx \delta_0 \sin 2\pi D / 365.25$

$\delta_0$  = declinación del sol en el equinoccio  
= 23 27'

$D$  = número de días medidos a partir del equinoccio de primavera.

La figura 1(b) muestra la radiación diaria que atraviesa una superficie de agua durante el año y la figura 2(a) la radiación por horas en días de solsticio (época en que el sol está más distante del Ecuador) que penetra en una superficie de agua calculada de acuerdo a la ecuación 1 incluyendo la radiación difusa y directa. Los datos para la radiación horal que llega a la superficie del agua han sido tomados de medidas experimentales y corregidos por condiciones climáticas. Las figuras 1 y 2 están calculadas bajo la suposición de que la solución en la superficie es agua casi pura. Las soluciones en la superficie con altas concentraciones de sal tendrán pérdidas por reflexión. Las perturbaciones, tales como ondas, sobre la superficie del agua causan pequeñas desviaciones de la transmisión calculadas en base a las ecuaciones de Fresnel.

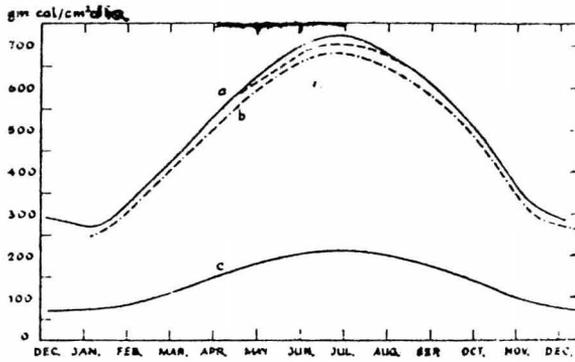
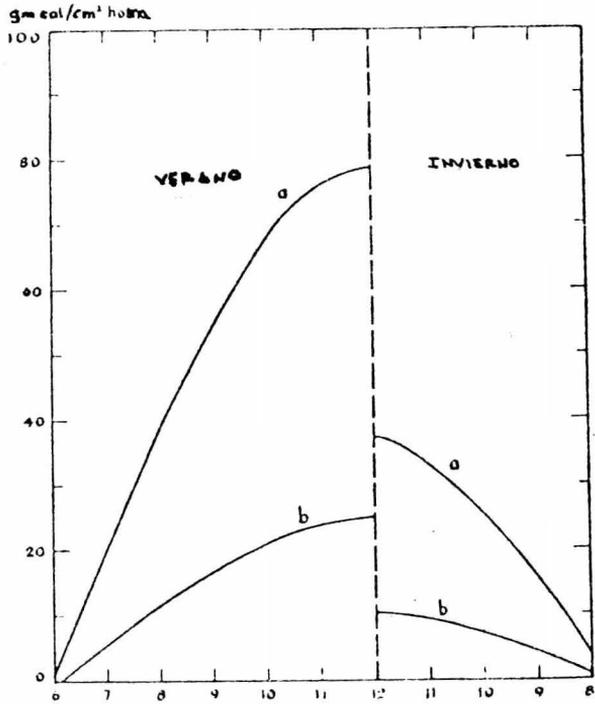


Fig. 1

- a) Radiación que incide diariamente sobre una superficie de agua en el mar muerto;
- b) Radiación solar diaria que penetra una superficie de agua
- c) Radiación solar diaria que llega a penetrar a la profundidad de 1m en una alberca de transmisividad similar al agua de mar # 3 de la Fig. 3



tiempo en horas (medio día = 12)

Fig. 2

Radiación solar horal que alcanza a penetrar una superficie de agua - en el mar muerto (-b) Radiación solar horal que penetra a un metro de profundidad en una alberca con transmisividad al agua de mar # 3 en la - Fig. 3

La radiación solar que penetra una superficie de agua se atenúa más y más por absorción conforme sigue su trayectoria y solo una fracción alcanza a llegar al fondo de una masa de agua. La absorción de energía se debe parcialmente a la absorvitividad natural de la solución y parcialmente a la absorbi ti vi dad de partículas en suspensión.

Medidas hechas en laboratorio indican que la absorci ón de luz, en soluciones saturadas de sal y agua pura no difiere apreciablemente. El agua de océano muestra diferencias en absorbi ti vi dad.

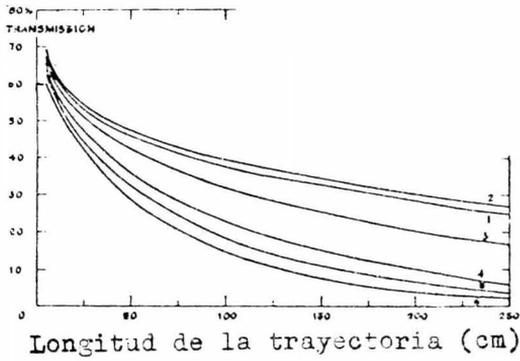


Fig. 3

Porcentaje de radiación solar --  
transmitida a través de seis mues-  
tras de agua de mar.

En la figura 3 se muestra el porcentaje de radiación solar transmitida a través de diferentes longitudes en 6 diferentes muestras de agua de océano. La absorbitividad de esas aguas varía para diferentes longitudes de onda de luz. La figura 3 se calculó midiendo la absorbitividad en diferentes longitudes de onda para esas muestras de agua de mar y suponiendo la distribución espectral de el sol a la dada por Moon (masa aire = 2) (la absorbitividad de las aguas del océano se midió de .37 a  $.8\mu$ ). Esos valores han sido extrapolados cerca del infrarrojo en el cálculo de la figura 3, introduciendo una pequeña incertidumbre (factor error) en las -- curvas para profundidades <sup>de</sup> menos de 30 cm.).

La radiación diaria durante el año se muestra en la figura 1c. La radiación horal en días de solsticio que llega a un metro de profundidad en una alberca cuyas propiedades de absorción son similares a las de agua de océano 3 de la fig. 3 se tienen en la fig. 2b. La radiación diaria se presenta en

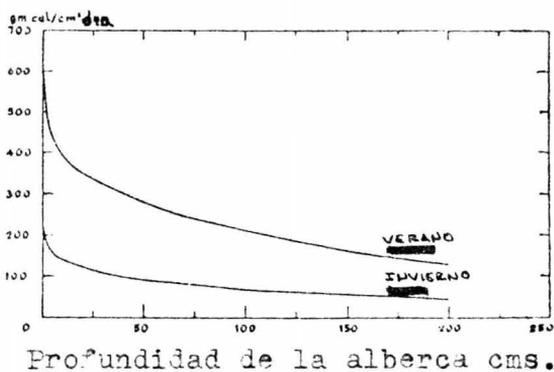


Fig. 4

Radiación total que penetra a va  
 rias profundidades diariamente en -  
 una alberca de transmisividad simi  
 lar al agua de mar # 3 de la Fig.

la figura 4. La radiación solar a las 12 del día que llega a diferentes profundidades de la alberca en verano e invierno suponiendo una transparencia en la solución similar al agua de océano 3 son mostradas en la figura 5. La distancia de la trayectoria de la radiación que penetra a una profundidad  $x$  en la alberca es  $x \sec r$  donde  $r$  es el ángulo refractado de la ley de snell (Eq 1). Por lo que en la evaluación de las curvas 1c, 2b, 4 y 5 se consideró que la distancia de la trayectoria de la radiación es función del tiempo (hora del día) y la estación del año.

Las diferencias entre las aguas de mar desaparece por filtración. Esto indica que las diferencias son debidas principalmente a suspensiones por lo que se puede concluir que entre mas clara y limpia sea una alberca la posibilidad de que sea altamente absorbente de energía solar es baja, sin embargo no se descarta la posibilidad de que, aunque la alberca estuviera transparente ésta sea absorbente

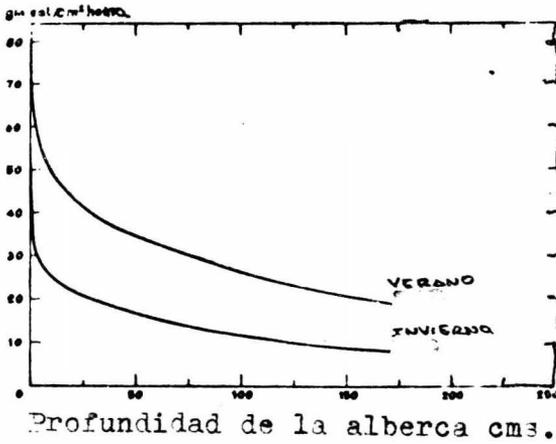


Fig. 5

Radiación solar que llega a diferentes profundidades en una alberca de --- transmisividad similar al agua de mar - # 3. Medida en días de solsticio a las 12 del día.

La suciedad que cae en un lago transparente y homogéneo si es mas densa que el agua se hunde, y si es menos densa que agua flota en la superficie.

Las partículas flotantes se pueden sacar y las que se hunden permanecieran residentes sin cambiar la transparencia de la solución.

La suciedad que cae continuamente en una alberca solar no necesariamente cae al fondo si no que puede permanecer flotante o suspendida a un nivel que corresponde a su densidad, permaneciendo residente en ese lugar. Las medidas hechas dependen de la calidad y cantidad de la suciedad que cae en el lugar.

Propiedades Térmicas de la Alberca y del Medio Ambiente.

Con el objeto de evaluar la distribución de temperaturas y el flujo de calor en una alberca solar - debido a o como consecuencia de una radiación aprovechada y a las condiciones de operación deseadas es esencial que se conozcan las propiedades térmicas de la solución; y la tierra que limita o rodea la masa de agua bajo estudio y la rapidez de transferencia de calor a la atmósfera en el sitio de la alberca.

La tabla 1 da valores de  $K$  = conductividad Térmica  $\alpha$  ( $=K/\rho c$ ) difusividad térmica,  $\rho$  densidad y  $c$  = el calor específico para soluciones salinas a temperaturas y concentraciones cerca de los valores - extremos que se presentan en una alberca solar bajo estudio.

La variación de las propiedades térmicas de la solución de agua salada en relación a las propiedades del agua pura esta dentro del 17%. Las propie-

TABLA I.

## PROPIEDADES TERMICAS DE SALMUERAS

20 °C				90 °C			
K	$\alpha$	$\rho$	$c$	K	$\alpha$	$\rho$	$c$
124	124	0.998	0.999				
119	128	1.006	0.85	134	148	1.065	0.85
115	129	1.11	0.803	129	146	1.085	0.833
105	134	1.215	0.617	113	145	1.119	0.637

que respectivamente son las propiedades que corresponden a:

Agua Pura

$$\text{NaCl}_q = 0.15$$

$$\text{MgCl}_2q = 0.15$$

$$q = 0.30$$

donde  $q$  = es la concentración de la sal en gramos - por centímetro cúbico.

dades térmicas de la tierra varían ampliamente de lugar a lugar dependiendo de la estructura física y química (tabla 2).

Para una evaluación adecuada de la distribución de temperatura en la alberca y tierra es necesario -- que las propiedades de la tierra se conozcan en el lugar de la alberca bajo las condiciones que existen en la operación real.

De la tabla 2 se observa que la conductividad de la arena de cuarzo húmeda es cercana a la del agua pero la difusividad es mayor. Faltando valores apropiados para las propiedades de el agua, saturada en el fondo de la alberca, como primer evaluación, se escojen las propiedades de la tierra iguales a las del agua.

El cambio que se espera para diferentes propiedades de la tierra sera tambien considerada. Debido a que el efecto de otras variables es grande en -- comparación al efecto de la variación de las propiedades térmicas con la temperatura y concentra--

TABLA II.

VALORES MEDIDOS DE DIFERENTE TIPO DE  
SUELOS A 20°C.

K	$\alpha$	$\rho$	c
-147	164	1.67	0.53
-54.5	173	1.65	0.19
-121	285	1.75	0.24
-190	320	1.78	0.33
-34-68	175-260		
-260-680	340-865		
-176	190	1.5	0.6
-645	980	2.6	0.12

que respectivamente son las propiedades que corresponden a:

Tierra calcarea 43% H<sub>2</sub>O

Arena de cuarzo seca

Arena de cuarzo seca 8% humedad

Arena de ladrillo 15% humedad

Suelo muy seco

solidos mojados

Lodo humedo

Arena de piedra

ción, se tiene como propósito de este análisis escoger valores constantes para las propiedades de la solución agua-sal.

El calor que se pierde en la superficie de una alberca solar es principalmente por evaporación, convección al aire y radiación de gran longitud de onda al medio ambiente.

Las fórmulas empíricas desarrolladas para describir la rapidez de transferencia de calor de la superficie de un cuerpo de agua son válidas para sistemas convectivos de temperaturas constantes y casi iguales. En un sistema convectivo cada pequeño volumen de agua puede ser visto o tratado como un cambiador de calor directamente con la atmósfera. Cualquier superficie de agua en contacto con la atmósfera pierde calor por medio de los siguientes mecanismos:

- 1.- Pérdida de calor debido a la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fondo de un volumen de agua.

- 2.- Pérdida de calor latente debido a la evaporación de agua en la superficie.
- 3.- Pérdida de calor por convección de la superficie del agua hacia la atmósfera.
- 4.- Pérdida de calor por radiación de longitud de onda larga.

Debido a la capacidad calorífica despreciable de la superficie comparada con la del sistema convectivo, la temperatura de la superficie de la alberca solar es menor que la temperatura de bulbo seco.

La temperatura del mar es generalmente mayor que la de bulbo seco (medio ambiente) como se muestra en las figuras 6 y 7. En el análisis posterior se supone que la temperatura de la superficie de la alberca es casi igual a la de bulbo seco, la cual es mas fría. Las corrientes inferiores de agua, debido a diferencias en densidades cercanas al fondo de la alberca, pueden transportar una cantidad significativa de calor de la alberca. La cantidad de calor perdido por la alberca debido al transporte

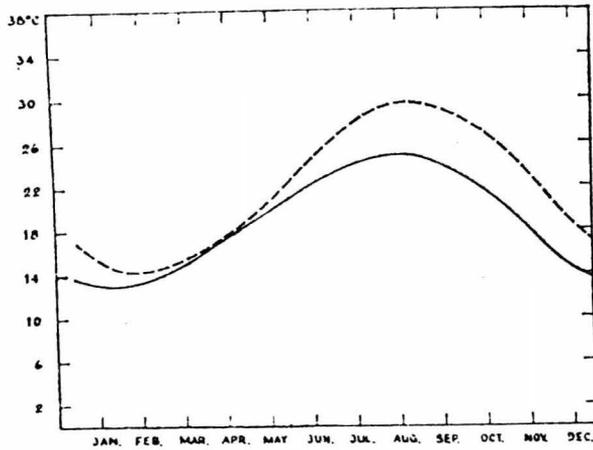


Fig. 6

Promedio diario de temperaturas del aire (bulbo seco) y superficie del mar en una costa del Mar Mediterraneo. (línea sólida, temperatura del aire (bulbo seco); línea --punteada temperatura del mar)

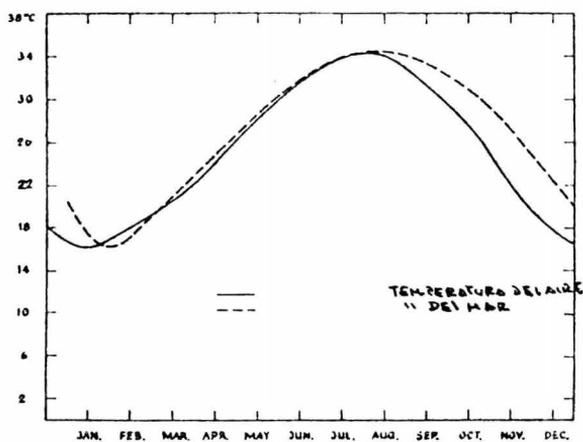


Fig. 7

Temperatura promedio diaria de ai  
re y superficie del mar en el Mar -  
Muerto.

laminar de agua como corrientes puede ser estimada si sus profundidades y rapidéz de flujo son conocidas.

"Aumento de Temperatura en la Alberca"

La temperatura  $T(x, \tau)$  en un sistema unidimensional no convectivo (ejem: la alberca solar cuyas dimensiones horizontales son extremadamente grandes comparadas con su profundidad, y consecuentemente, el flujo térmico a través de las paredes de los alrededores es despreciable comparado al flujo vertical de calor) conteniendo fuentes internas de calor  $H(x, \tau)$  por unidad de longitud estará gobernada por la ecuación de difusión.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} - H(x, \tau) \quad 3$$

El tiempo  $\tau$  es medido en horas del comienzo de operación;  $x$  es la dimensión lineal (la profundidad - en la alberca).

Si se supone que  $K$  y  $c$  son constantes e independientes de la temperatura o concentración de sal, y consecuentemente independientes de la profundidad en la alberca. La ecuación 3 toma la forma lineal:

$$\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{\alpha}{K} H(x, \tau) \quad 3'$$

Como se dijo previamente se supondrá que la difusividad térmica de la alberca y tierra son iguales.

Integrando 3' para las condiciones\*

- a) La energía solar  $\Phi (h, \tau)$  que llega al fondo - de la alberca ( $x=h$ ) es absorbida completamente
- b)  $H (x, \tau) = - \left[ \frac{\partial \Phi (x, \tau)}{\partial x} \right]$ , la energía solar absorbida a la profundidad  $x$  en la masa de agua - de la alberca.
- c) La energía es eliminada o disipada a una rapidez  $U (t)$  del fondo de la alberca.
- d) La temperatura de la superficie de la alberca - es igual a la temperatura ambiente  $\overline{T_d}(0) + \tilde{T}_d(0, \tau)$  donde  $\overline{T_d}$  es la temperatura media anual y  $\tilde{T}_d(\tau)$  la variación periódica.
- e) Para la temperatura inicial de la alberca  $T_e (x)$  se tiene:

$$T(x, \tau) = T_a + T_b + T_c + T_d + T_e \quad (4)$$

$$T_a(x, \tau) = \frac{\sqrt{\alpha}}{2K\sqrt{\pi}} \int_0^\tau \frac{\phi(h, \tau')}{\sqrt{\tau - \tau'}} \left[ \exp \frac{-(h-x)^2}{4\alpha(\tau - \tau')} - \exp \frac{-(h+x)^2}{4\alpha(\tau - \tau')} \right] d\tau' \quad (5)$$

$$T_b(x, \tau) = \frac{-\sqrt{\alpha}}{2K\sqrt{\pi}} \int_0^h \int_0^\tau \frac{\partial \phi(y, \tau')}{\sqrt{\tau - \tau'}} \quad (6)$$

$$\left[ \exp \frac{-(y-x)^2}{4\alpha(\tau - \tau')} - \exp \frac{-(y+x)^2}{4\alpha(\tau - \tau')} \right] d\tau' dy$$

$$T_c(x, \tau) = \frac{-\sqrt{\alpha}}{2K\sqrt{\pi}} \int_0^\tau \frac{U(\tau')}{\sqrt{\tau - \tau'}} \left[ \exp \frac{-(h-x)^2}{4\alpha(\tau - \tau')} - \exp \frac{-(h+x)^2}{4\alpha(\tau - \tau')} \right] d\tau' \quad (7)$$

$$T_d(x, \tau) = \hat{T}_d \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{\chi}}^\infty \hat{T} \left( \tau - \frac{x^2}{4\alpha t^2} \right) \exp(-t^2) dt \quad (8)$$

$$T_e(x, \tau) = \frac{1}{2\sqrt{\pi\alpha}} \int_0^\infty T_e(x', 0) \left[ \exp \frac{-(x-x')^2}{4\alpha\tau} - \exp \frac{-(x+x')^2}{4\alpha\tau} \right] dx' \quad (9)$$

$$** \chi = \sqrt{x/\alpha\tau}.$$

Para los propósitos de análisis se puede reemplazar la radiación medida (o estimada)  $\Phi(x, t)$  por -

series:

$$\phi(x, t) = \frac{1}{24} F(D, x) + \sum_{i,n} M_{i,n} \exp(-\mu_{i,n}x) \sin \frac{2\pi n(t-6)}{24} + \sum_{i,n} N_{i,n} \exp(-\nu_{i,n}x) \cos \frac{2\pi n(t-6)}{24} \quad (10)$$

Los valores de  $F(D, x)$ , el flujo diario total alcanzando la profundidad  $x$  en una alberca en la fecha  $D$  se muestran en las figuras 1 y 4 para condiciones climáticas en Israel y para una agua de mar teniendo la absorvitividad similar a la muestra de agua de mar # 3 (fig. 3).  $M, N, \mu, \gamma, \beta$  dependen de la fecha  $D$ .

Considerando el aumento de temperatura debido al flujo total de energía solar y la variación debido a componentes sinusoidales de el flujo de energía cada hora se puede escribir:  $F(D, x)$ .

como series:

$$F(D, x) = \sum A_i \exp(-a_i x) + \sum B_{i,\alpha} \exp(-b_{i,\alpha} x) \sin 2\pi n D / 365 \quad (11a)$$

Donde  $D$  es medida a partir de el equinoccio de primavera.

El flujo de energía en los figuras 1 y 4 se pueden aproximar por

$$\begin{aligned} A_1 &= 229 & a_1 &= 0.0018 \\ A_2 &= 102.8 & a_2 &= 0.0633 \\ A_i &= 0 \quad i > 2 & & \\ B_{11} &= 71.3 & b_{11} &= 0.000937 \\ B_{21} &= 79.4 & b_{21} &= 0.0314 \\ B_{i,\alpha} &= 0 \quad i > 2, \alpha > 1; & & \end{aligned} \quad (11b)$$

Integrando la ecuación 5 para el flujo de energía  $F(D, x)$  se encuentra para la temperatura  $T_a$  en el fondo de la alberca

$$\begin{aligned}
 T_a(h, \vartheta) = & \sum A_i \exp(-a_i h) \left\{ \frac{\sqrt{\alpha \vartheta}}{K \sqrt{\pi}} \left( 1 + \exp \frac{-h^2}{\alpha \vartheta} \right) \right. \\
 & \left. + \frac{h}{K} \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{h}{\sqrt{\alpha \vartheta}} \right) \right\} + \frac{\sqrt{\alpha}}{2K \sqrt{\pi}} \sum B_{i,n} \exp(-b_i h) \\
 & \cdot \left\{ \frac{\sqrt{365}}{\sqrt{2n\pi}} \left[ \sin \frac{2n\pi}{365} (\vartheta + \epsilon) C \left( \frac{2n\pi \vartheta}{365} \right) - \cos \frac{2n\pi (\vartheta + \epsilon)}{365} \right. \right. \\
 & \left. \left. \cdot S \left( \frac{2n\pi \vartheta}{365} \right) \right] - \int_0^{\vartheta} \frac{\sin \frac{2n\pi}{365} (\vartheta' + \epsilon)}{\sqrt{\vartheta - \vartheta'}} \exp \frac{-h^2}{\alpha (\vartheta - \vartheta')} d\vartheta' \right\} \quad (12)
 \end{aligned}$$

$D$  es el número de días medidos a partir de la fecha  $\xi$  cuando la alberca fué expuesta a la radiación solar por primera vez.  $\xi$  es medida en días a partir -

del equinoccio de primavera. (Cz) y (Se) son integrales de Fresnel que se encuentran en tablas.

El último término de la ecuación 12 y el de la ecuación 6 no son expresables en términos de funciones tabuladas por lo que se deben integrar numéricamente.

Las figuras 8a y b muestran el aumento de temperatura  $T_a$  en el fondo de una alberca de 100cm de profundidad calculado con todos los términos de la ecuación 12 de  $D = 0$  a  $D = 400$ . Se puede mostrar -- que la contribución del último término de la ecuación (12) es menor de  $14^\circ\text{C}$  a  $T_a$  y que  $T_b$  es pequeña para los primeros meses de operación; por lo -- tanto estas figuras se pueden usar como una medida del aumento de la temperatura inicial en la alberca. La figura 8 (a) es para  $\xi = 0$ ; una alberca expuesta al sol en la primavera y la figura 8 (b) -- es para  $\xi = 182$ ; una alberca expuesta al sol en -- otoño.

Para grandes incrementos de tiempo,  $T_a(x,D)$  toma

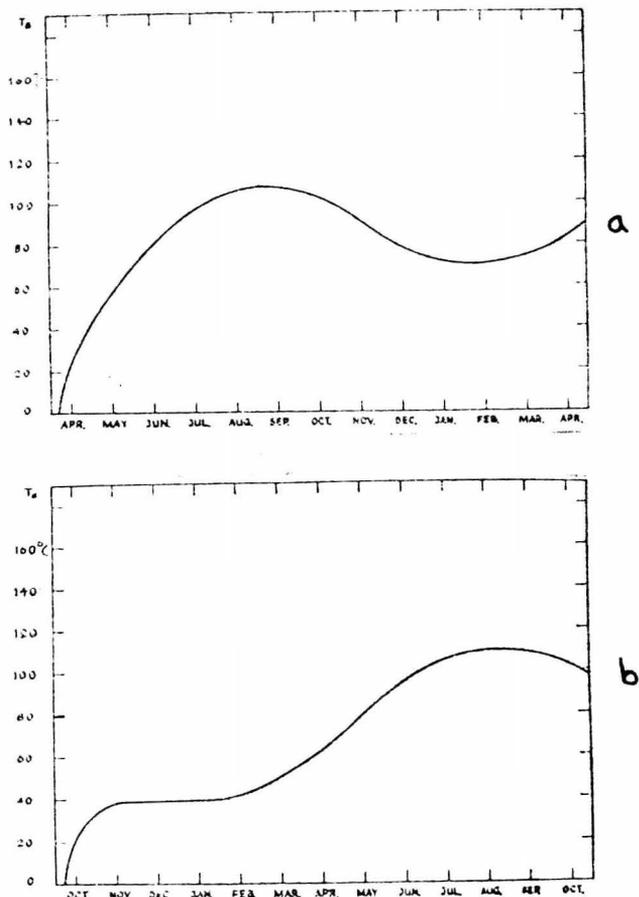


Fig. 8

Incremento de temperatura inicial arriba de la temperatura ambiente en el fondo de una alberca de prueba de 1 m. de profundidad, debido al flujo de energía solar absorbida en el fondo.

- a) alberca expuesta a radiación solar en primavera.
- b) alberca expuesta a radiación solar en otoño.

la forma siguiente:

$$\begin{aligned}
 T_a(x, \mathfrak{D}) = T_a(x, D) &= \frac{x}{K} \sum A_i \exp(-a_i h) \\
 &+ \frac{\sqrt{2}}{4K} \sum \frac{B_{i,n}}{S} \exp(-b_{i,n} h) \left\{ \exp[-(h-x)S] \sin \left[ \frac{2n\pi D}{365} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{\pi}{4} - (h-x)S \right] - \exp[-(h+x)S] \sin \left[ \frac{2n\pi D}{365} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{\pi}{4} - (h+x)S \right] \right\} \quad (13)
 \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned}
 S &= (n\pi/365\alpha)^{1/2} \\
 T_b(x, \mathfrak{D}) = T_a(x, D) &= \frac{1}{K} \sum \left[ \frac{A_i}{a_i} [1 - \exp(-a_i x)] \right. \\
 &\quad \left. - x A_i \exp(-a_i h) \right] + \frac{\sqrt{2}}{4K} \sum \frac{B_{i,n} b_{i,n}}{S} \\
 &\quad \cdot \left\{ \frac{\exp(-b_{i,n} x)}{\sqrt{\{S^2 + (b_{i,n} - S)^2\}}} \sin \left( \frac{2n\pi D}{365} - \frac{\pi}{4} + \beta_1 \right) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\exp(-Sx)}{\sqrt{\{S^2 + (b_{i,n} - S)^2\}}} \sin \left( \frac{2n\pi D}{365} - \frac{\pi}{4} - Sx + \beta_1 \right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\exp[S(x-h) - b_{i,n} h]}{\sqrt{\{S^2 + (b_{i,n} + S)^2\}}} \right. \\
 &\quad \cdot \sin \left( \frac{2n\pi D}{365} - \frac{\pi}{4} + S(x-h) + \beta_2 \right) \quad (14) \\
 &\quad \left. - \frac{\exp(-b_{i,n} x)}{\sqrt{\{S^2 + (b_{i,n} + S)^2\}}} \sin \left( \frac{2n\pi D}{365} - \frac{\pi}{4} + \beta_2 \right) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{\exp[S(x+h) - b_{i,n} h]}{\sqrt{\{S^2 + (b_{i,n} + S)^2\}}} \right. \\
 &\quad \cdot \sin \left[ \frac{2n\pi D}{365} - \frac{\pi}{4} - (x+h)S + \beta_2 \right] \\
 &\quad \left. + \frac{\exp(-Sx)}{\sqrt{\{S^2 + (b_{i,n} + S)^2\}}} \sin \left( \frac{2n\pi D}{365} - \frac{\pi}{4} - Sx + \beta_2 \right) \right\} \\
 \beta_1 &= \tan^{-1} \frac{-S}{-(b_{i,n} - S)} \quad \beta_2 = \tan^{-1} \frac{S}{-(b_{i,n} + S)}
 \end{aligned}$$

Ta y Tb dependen solo de la fecha del calendario - "D" tomala después del equinoccio de primavera. Sumando los términos independientes de las ecuaciones 13 y 14 tenemos para el aumento de temperatura media anual a una profundidad x ( h) en la alberca:

$$\bar{T}_a(x) + \bar{T}_b(x) = 1/K \sum (A_i/a_i) [1 - \exp(-a_i x)] \quad (15)$$

Para grandes valores de tiempo la temperatura a -- una profundidad x en una alberca es independiente de su profundidad total h. La ecuacion 15 es válida aun cuando las propiedades térmicas de la tierra difieran de las de la alberca, el aumento de temperatura  $\bar{T}_a + \bar{T}_b$  depende de las propiedades térmicas de la alberca.

La figura 9 muestra  $\bar{T}_a + \bar{T}_b$  para los valores de --  $A_i$  y  $a_i$  de la ecuación 11b.

Sumando los términos correspondientes sinusoidales de las ecuaciones 13 y 14 para obtener una expresión de la forma siguiente:

$$\bar{T}_a(x, D) + \bar{T}_b(x, D) = \sum \Gamma_n(x) \sin(2n\pi/365) \cdot [D - W_n(x)] \quad (16)$$

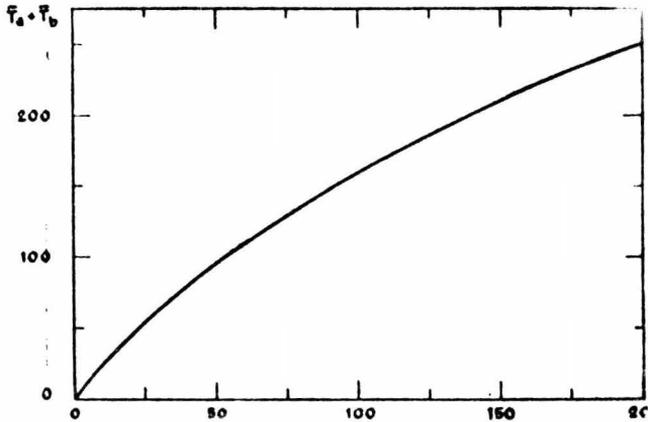


Fig. 9

Aumento promedio de temperatura a régimen permanente arriba de la temperatura promedio ambiente en una alberca solar (el aumento de temperatura a una profundidad  $x$  - menor a  $h$  independiente de la profundidad de la alberca  $h$ ).

$V_n(x)$  es la amplitud y  $W_n(x)$  es la fase a la profundidad  $x$  del término sinusoidal de período  $365/n$ . Para los valores de  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $a_i$  y  $b_i$  de la ecuación 11b se encuentra el aumento de temperatura debido al flujo de energía solar absorbida en el fondo de una alberca de 1 metro de profundidad

$$T_a(100) + T_b(100, D) = 15.8 + 28.5 \operatorname{sen} 2\pi(D - 65)/365 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 17$$

Expresando la temperatura media ambiente diaria -- por las series.

$$T_a(0, D) = T_a + T_b(0, D) = \bar{T}_a + \sum E_n \sin 2\pi n(D - \psi_n)/365 \quad (18)$$

Integrando la eq. 9

$$T_d(x, D) = T_a(0) + \sum E_n \exp \left[ \left( \frac{n\pi}{365} \right)^2 x \right] \sin \left[ \frac{2n\pi(D - \psi_n)}{365} - \left( \frac{n\pi}{365} \right)^2 x \right] \quad (19)$$

La aproximación de la temperatura media ambiente -- diaria durante el año mostrada en las figs. 6 y 7 dada por el término sinusoidal con período de 365 días.

De las figs. 6 y 7 se tiene:

	$T_m$ , °C	$E_m$ , °C	$\phi$ , DÍAS
Tel-Aviv.	19	6	32
MAR MUERTO	26	10	22

Dando en el fondo de una alberca de 1 metro de profundidad.

Tel-Aviv

$$T_d(100, D) = 19 + 2.1 \sin 2\pi(D - 80)/365 \quad 20$$

Mar Muerto

$$T_d(100, D) = 26 + 1 \sin 2\pi(D - 70)/365$$

Para una distribución de temperatura inicial de la masa de agua contenida en una alberca de profundidad constante y tierra que rodea a la alberca  $T_e$ , integrando la ecuación 10

$$T(x, D) = T_e \operatorname{erf} x / 2\sqrt{aD} \quad 21$$

Si  $T_e$  es igual a la temperatura media ambiente  $\overline{T_d}$ , la suma de la ecuación 21 y el primer término de la derecha de la ecuación 9 (el aumento de temperatura en la masa de agua contenida en una alberca debido a la temperatura media ambiente) es constante e igual a  $\overline{T_d}$  para todos los valores de tiempo. Por lo que el primer término del lado derecho de la ecuación 18 puede considerarse como la temperatura en la alberca debido a la temperatura media ambiente y temperatura inicial de la tierra que limita el sistema para todos los valores del tiempo. Para una distribución inicial arbitraria  $T_e(x)$  en la ecuación 10 se puede resolver numericamente. La contribución de  $T_e$  a  $T$  disminuye con el tiempo y cuando  $D \rightarrow \infty$  desaparece. La temperatura a estado estacionario en la alberca

sin pérdida ó disipación de energía es:

$$T_m = T_a(x, D) + T_b(x, D) + T_c(x, D)$$

$$T_m = \bar{T}_m + \tilde{T}_m$$

$T_m$  es la suma de la ecuación 15 y la Temperatura - Media ambiente.

$$\bar{T}_m = T_a(x, D) + T_b(x, D) + T_c(x, D) \quad 22$$

El valor para  $\bar{T}_m$  dado por la ecuación 22 es válido aún cuando las propiedades térmicas de la tierra - que rodea el sistema difieren de las de la solu---ción en la alberca.

La temperatura media a régimen permanente depende solamente de las propiedades térmicas de la solu---ción contenida en la alberca en cualquier profundidad  $x$  tal que ( $x < h$ ).

La variación periódica de la temperatura  $\tilde{T}_m$  esta - dada por la suma de la ecuación 15 y la componente sinusoidal de la ecuación 18.

Para una alberca de 1 m. de profundidad:

$$\begin{aligned} \text{El Avila: } T_w &= 177 + 30 \sin 2\pi(D - 68)/365 & (23a) \\ \text{MAG. HUERTO } T_w &= 181 + 32.5 \sin 2\pi(D - 66)/365 & (23b) \end{aligned}$$

Las temperaturas dadas por la ecuaciones 23 (a,b) no se pueden alcanzar físicamente cuando el punto de ebullición de la solución es del orden de  $117^{\circ}\text{C}$  a menos que la temperatura media de la alberca cuando  $D \rightarrow \infty$  sea considerable para determinar la cantidad de energía que puede ser disipada o perdida, y la mínima temperatura que se puede conseguir para que la alberca trabaje en su punto de mayor eficiencia. A continuación se considerara la energía que se puede perder o disipar de una alberca en operación, considerando la variación de la temperatura diaria en la alberca, la temperatura media y la relación de energía que se recupera.

"Energía eliminada (o disipada) en la alberca"

Después de un cierto período de tiempo de exposición al sol, la alberca se equilibra a una temperatura

ra tal donde comenzara a perder energía en forma de calor. El calor que se pierde se puede usar directamente para purificación de agua, propósitos industriales, o convertirlo directamente a energía eléctrica.

La temperatura de trabajo de la solución se considera que permanece constante durante todo el año. Con ésta restricción la ecuación 4 para grandes valores de D (tiempo) da lugar a:

$$T(h, D) = T_c(h, D) + T_p(h, D) + T_s(h)$$

Separando el abatimiento de temperatura debido a la energía disipada en componentes constantes y periódicos

$$T_c = \bar{T}_c(h) + \hat{T}_c(D, h)$$

Para  $T_w$  constante

$$T_c(D) = T_c(h) \quad 24$$

expresando la velocidad de energía disipada por:

$$Q = T_c - T_w$$

para la temperatura de trabajo en el fondo de la alberca ( $x = h$ ) y para grandes valores de tiempo ( $D$  grandes):

$$T_m = T_a + (T_s - T_a) e^{-\frac{h}{D}} \quad (25)$$

Como  $\bar{T}_m$  es independiente de las propiedades térmicas de la tierra que rodea el sistema, se tiene un valor medio a régimen permanente de  $U$  es decir  $\bar{U}$ . Si se desea extraer energía calorífica de la alberca a baja temperatura, de la ecuación 22 para  $\bar{T}_m - (h)$  y de la ecuación 25, para cada valor particular de  $T_w$  hay una profundidad para la cual  $\bar{U}$  es máxima. De la ecuación 25 y la condición de que  $U$  es máxima  $\frac{dU}{dx} = 0$  :

$$J = K \left( \frac{dT_m}{dh} \right) \quad (26)$$

Substituyendo  $\bar{T}_m$  en la ecuación 26 y comparando el resultado para  $K \left( \frac{dT_m}{dx} \right)$  con la ecuación 11a, la rapidez de energía disipada.  $U$  es igual a la radiación solar que llega a la profundidad  $h$ .

En condiciones ideales toda radiación que llega a la profundidad  $h$  se disipa a la temperatura  $T_w$  y la

alberca se calienta solo por la Energía Solar absorbida por la masa de agua de la alberca.

El valor óptimo de  $\bar{U}$  y  $T_w$  como una función de  $h$  para una temperatura media ambiente de  $26^\circ\text{C}$  se muestra en la figura número 10.

Expresando a  $U(D)$  en series:

$$U(D) = \sum U_n \sin \frac{2\pi n(D - \sigma_n)}{365} \quad (26)$$

Para grandes valores de tiempo  $\tilde{T}_c(x, D)$  estará dado por:

$$\begin{aligned} T_c(x, D) = & \frac{\sqrt{\alpha}}{2K} \sum U_n \frac{\sqrt{365}}{\sqrt{2\pi n}} \exp[-(h-x)S] \\ & \cdot \sin \left[ \frac{2\pi n(D - \sigma_n)}{365} - \frac{\pi}{4} - (h-x)S \right] - \exp[-(h+x)S] \\ & \cdot \sin \left[ \frac{2\pi n(D + \sigma_n)}{365} - \frac{\pi}{4} - (h+x)S \right]. \end{aligned} \quad (27)$$

De la condición de que  $\tilde{T}_c = \tilde{T}_m$  (ecuación 24) y para  $\tilde{T}_w$  dado por la ecuación 23b se encuentra en la ecuación 27:

(27a)

$U(D) = 74 \sin(2\pi/365)(D-24)$  gm cal/cm<sup>2</sup> día en una alberca de 100cm.

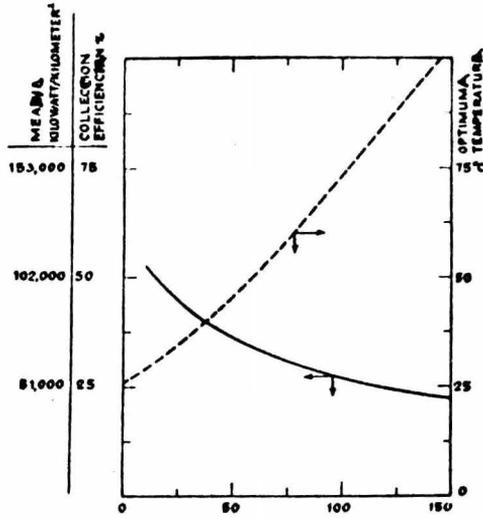


Fig. 10

Eficiencia de colección y profundidad ideal de la alberca como una función de la temperatura de energía disipada.

La energía total disipada de una alberca de 100cm. de profundidad operando a su temperatura más eficiente  $T_w$  de las ecuaciones 25, 26 y 27a resulta ser:

$$U(D, 100) = 136 + 71 \operatorname{sen} (2\pi/365) (D-21) \text{ gm cal/cm}^2 \text{ día} \quad (28)$$

$$U(D, 100) = 66000 + 34400 \operatorname{sen} (2\pi/365) (D-21) \text{ kw/km}^2$$

para  $T_w = 73^\circ\text{C}$ .

La Energía Solar media anual recibida sobre una superficie horizontal de agua es: 505 gm cal/cm<sup>2</sup> día con una eficiencia de captación de Energía Solar del 27%. Es más fácil disipar energía a temperaturas mayores de la temperatura óptima para una profundidad dada; por ejemplo se puede disipar calor a la temperatura de 90°C de una alberca de 100 cm de profundidad a una rapidéz:

$$U(D, 100) = 117 + 71 \operatorname{sen} (2\pi/365) (D-21) \text{ gm cal/cm}^2 \text{ día.} \quad (29)$$

Con una eficiencia de colección de 23%. La profundidad óptima para recuperar calor a 90°C es 120 cm con una eficiencia de 24.6%.

Para convertir la energía térmica de la solución salina a energía mecánica o eléctrica  $J, (D)$  por medio de un ciclo de carnot:

$$J(D) = J + \dot{J}(D) = (C + C_D) \left( 1 - \frac{T_s + 273}{T_w + 273} \right) \quad (30)$$

donde  $T_s + 273$  es la temperatura, debida a la energía calorífica que entra a la masa de agua en la alberca en grados kelvin, y para razones prácticas constante.

La condición de máxima rapidéz de conversión de energía a una profundidad particular es:

$$dJ/dD = 0$$

de donde sustituyendo  $T_w$  en la ecuación 30 por:

$$T_w = \tilde{T}_m + hU/K \quad (\text{Eq. 25})$$

$$hU/K = \tilde{T}_m + 273 - (\tilde{T}_s + 273)(T_s + 273)^{-1} \quad (31)$$

$$J = (K/h) \{ (\tilde{T}_m + 273)^2 - (T_s + 273)^2 \} \quad (32)$$

4

$$T_w = (\tilde{T}_m + 273)(T_s + 273)^{-1} - 273 \quad (33)$$

La energía media que se puede recuperar  $\bar{J}$  y la temperatura del líquido disipado en el fondo de la alberca como una función de la profundidad para :

$T_s + 273 = 300^\circ \text{K}$  se muestra en la figura 11.

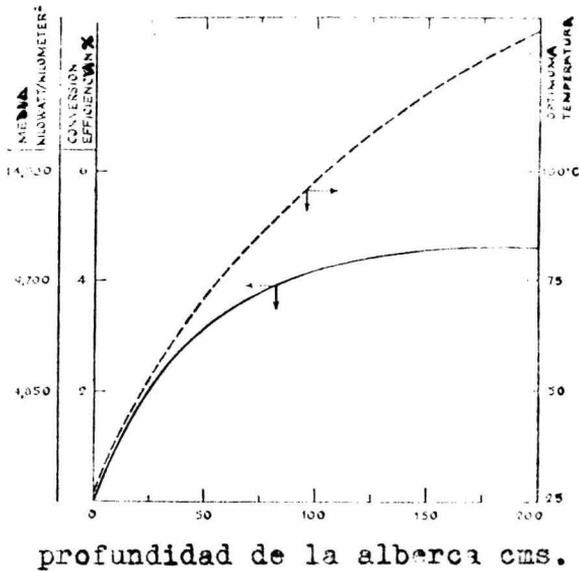


Fig. 11

Energía media que se puede recuperar de varias profundidades, por medio de un ciclo de carnot a la temperatura de operación más eficiente.

El valor máximo de J estará a una profundidad de - 200 cm y a una temperatura mayor que la del punto de ebullición de la solución en el fondo de la alberca. Como la función de energía recobrada J aumenta de valor lentamente despues de 100 cm de profundidad, es probable que la profundidad óptima de aprovechamiento de energía solar para una alberca cuya transmisión de radiación solar es similar a la del agua de océano # 3 de la Fig. 3 este en los límites de 100 cm. De las ecuaciones 32 y del valor de U (D) dado por la ecuación 27a para una alberca de 1 metro de profundidad:

$$\begin{aligned}
 J(D) &= 20.8 + 13.5 \sin \frac{2\pi(D - 21)}{365} \text{ gm cal/cm}^2 \\
 &= 10,100 + 6,550 \sin \frac{2\pi(D - 21)}{365} \text{ kw/km}^2
 \end{aligned}
 \tag{34}$$

Para una eficiencia media anual de 4.2% en energía solar absorbida y que se puede recuperar.

La temperatura de trabajo esta dada por la ecuación 33.

$$T_w = 98 \text{ }^\circ\text{C}$$

y de las ecuaciones 31 y 27a:

$$\begin{aligned}
 U &= 109 + 71 \sin \frac{2\pi(D - 91)}{365} \text{ gm cal/cm}^2 \\
 &= 52,900 + 34,400 \sin \frac{2\pi(D - 91)}{365} \text{ kw km}^2
 \end{aligned}$$

"Eficiencia para cortos intervalos de tiempo"

En la anterior discusión se supuso, en el modelo, que las condiciones de temperatura en la alberca -  $T(x, D)$  y tierra que rodea el sistema se alcanzan después de un considerable período de insolación. Se considerará que fracción de la energía máxima y recuperable cuando  $D \rightarrow \infty$  puede ser recuperada de la alberca a partir del principio de la operación, Si la alberca se calienta sin pérdida de energía - durante  $D_0$  días alcanzara una temperatura  $T(h, D_0)$  (temperatura en el fondo de la alberca) igual ó ma yor que la temperatura de trabajo  $T_w$ , y si de  $D_0$  - en adelante se deja al sistema que pierda energía. De las figuras 8a y 8b, se puede observar que la - temperatura de trabajo sera alcanzada en 2 meses - en una alberca, expuesta a radiación solar en la - primavera y en mas o menos 7 meses en una alberca expuesta a insolación en otoño. La temperatura --  $T(x, D_0)$  en cualquier punto de la alberca



QUÍMICA

que  $x \leq h$  sera similar a la temperatura alcanzada -- después de un largo período de operación, con energía disipada, debido a la profundidad sombreada de la alberca. La temperatura  $T(X, D_0)$  en la alberca en un punto tal, que  $x > h$ , (tierra que rodea el -- sistema) sera cercana a  $T_w$  solo en una vecindad de puntos tales que  $X = h + \Delta h$ . Como consecuencia del gradiente de temperaturas que habra en la tierra, un flujo de energía se presentará del agua a la -- tierra. Esta energía se perdiera hacia los alrededores del sistema. La energía  $U(D)$  que pierde la alberca de  $D_0$  en adelante puede ser separada en una cuasi media parte  $\overline{U(D)}$  igual a la energía media  $\bar{U}$  discutida en la sección precedente, menos la cantidad de energía para reemplazar la energía difundida a través de la tierra y una cuasiperiódica parte  $\tilde{U}(D)$ , la energía necesaria para compensar la variación de temperatura debido a los componentes sinusoidales de el flujo de energía solar y la temperatura atmosférica. (temperatura de bulbo seco). --

Suponiendo la temperatura inicial de la tierra que rodea a el sistema igual a la temperatura media ambiente entonces:

$$T(\overline{D}) = \bar{T} - \frac{\sqrt{\rho c K}(T_w - \bar{T}_a)}{\sqrt{\pi(\overline{D} - D_0)}} + \frac{K}{2\pi k(\overline{D} - D_0)^2} \int_h^\infty (c - h)[T(x, D_0) - \bar{T}_a] \cosh \frac{(x-h)^2}{4k(\overline{D} - D_0)} dx \quad (35)$$

Los últimos dos términos de la ecuación 35 dan la cantidad de energía requerida para mantener la temperatura  $T_w$  en  $x = h$  (en el semi-infinito de la tierra  $x > h$ ) lo cual se calentó a la temperatura  $T(x, D_0)$  por la radiación solar absorbida en la alberca de  $D = 0$  a  $D = D_0$ .

La tabla 3 da los valores para la relación  $\overline{U(D)}/U$ , la cual igual a la relación  $\overline{J(D)}/J$  donde  $\overline{J(D)}$  es un cuasi valor medio de la energía convertida por medio de un ciclo de carnot, definida en una manera similar a  $\overline{U(D)}$ , para propiedades térmicas de diferentes tierras de la tabla 2 y para tres profundidades de alberca como una función del tiempo. -- (en la evaluación de la tabla 3 se ha aproximado -

$\overline{U(D)}$  por los primeros dos términos de la ecuación 35).

TABLA III.

RELACION DE LA RAPIDEZ DE ENERGIA DISIPADA COMO UNA FUNCION DEL TIEMPO POSTERIOR AL INICIO DE LA OPERACION A LA RAPIDEZ -- MAXIMA DE ENERGIA DISIPADA ALCANZABLE -- DESPUES DE UN LARGO PERIODO DE OPERACION

$h = 50 \text{ cm}$ $T_w = 72 \text{ C}$ $\eta_f = 3.2\%$				$h = 75 \text{ cm}$ $T_w = 84 \text{ C}$ $\eta_f = 3.8\%$				$h = 100 \text{ cm}$ $T_w = 98 \text{ C}$ $\eta_f = 4.2\%$			
182	365	730	1160	182	365	730	1160	182	365	730	1160
0.82	0.87	0.91	0.94	0.78	0.81	0.89	0.92	0.69	0.78	0.84	0.89
0.89	0.92	0.94	0.96	0.86	0.90	0.93	0.95	0.80	0.86	0.90	0.93
0.83	0.88	0.92	0.94	0.79	0.85	0.90	0.93	0.70	0.79	0.85	0.90
0.80	0.86	0.90	0.93	0.76	0.83	0.88	0.91	0.65	0.75	0.83	0.88
0.86	0.90	0.93	0.95	0.83	0.88	0.91	0.93	0.75	0.82	0.87	0.91

tiempo en días despues del inicio del removimiento de energia:

- 1.- tierra calcarea 43% H O
- 2.- cuarzo y arena 8% humedad
- 3.- arena de barro 17% humedad
- 4.- lodo húmedo
- 5.- solución concentrada  $\text{MgCl}_2$

- h - profundidad de la alberca
- $T_w$  - Temperatura de la alberca a la profundidad h.
- $n_j$  - eficiencia de la conversión media máxima.

Los valores verdaderos de  $\overline{U(D)}/U$  y  $\overline{J(D)}/J$  son, por esto mayores que los mostrados en la tabla.

No se ha estudiado la parte cuasi periódica  $\widetilde{U(D)}$  de el calor perdido.

"Variaciones horales de la temperatura media y rapidéz de energía recobrada".

Se examinarán las variaciones de aumento de temperatura y rapidéz de energía perdida asociada con el flujo diario medio de energía solar. Las variaciones de esos valores debidas a las componentes periódicas del flujo solar estar dadas por la ecuación 10.

Integrando la ecuación 5, 6 y 8 para valores de  $\tau$  - grandes (en la práctica pocas semanas) para los componentes sinusoidales de la ecuación 10 y la tempe-

ratura ambiente diaria se pueden despreciar todos los términos de la ecuación 5 excepto el primero para el cálculo de la variación de temperatura horal en el fondo de una alberca de 1 metro de profundidad (evaporimetro).

Partiendo de la base anterior la variación horal de temperatura es:

$$T_s(h, \tau) = \frac{\sqrt{\alpha}}{2K\sqrt{\pi}} \int_0^\tau \frac{\bar{\phi}_s(\tau, h)}{\sqrt{\tau - \tau'}} d\tau \quad (36)$$

La ecuación 36 da la temperatura en el plano  $h$  en un medio infinito recibiendo la insolación  $\bar{\phi}_s(h, \tau)$  (la energía absorbida en el cuerpo de la alberca y los cambios horales en la temperatura de superficie no afectan grandemente los cambios de temperatura horal en el fondo de la alberca).

$\bar{\phi}_s(x, \tau)$  esta dado por los componentes periodicos de la ecuación 10:

$$\begin{aligned} \bar{\phi}_s(x, \tau) = & \sum M_{i,n} \exp(-\mu_{i,n}x) \sin 2\pi n(t - 6)/24 \\ & + \sum N_{i,n} \exp(-\nu_{i,n}x) \cos 2\pi n(t - 6)/24 \end{aligned}$$

Para la energía solar o insolación correspondiente a las condiciones de solsticio de verano (fig. 2 y 5) que causaran la máxima variación de temperatura con respecto a la media diaria:

$$\begin{aligned} \bar{\phi}(x, \tau) = & \sum_{i=1}^4 M_i \exp(-\mu_i x) \left[ \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi(t-6)}{24} \right. \\ & \left. - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\pi(4n^2-1)} \cos \frac{4n\pi(t-6)}{24} \right] \text{ gm cal/cm}^2 \text{ hr} \quad (37) \\ & M_1 = 9.5 \quad \mu_1 = 0.0048 \\ & M_2 = 4.25 \quad \mu_2 = 0.0633 \\ & M_3 = 3.1 \quad \mu_3 = 0.00937 \\ & M_4 = 3.33 \quad \mu_4 = 0.0314 \end{aligned}$$

Para integrar la ecuación 36, se considera la presencia de una zona convectiva de temperatura uniforme y altura  $d$ , que está en la parte superior del plano  $x = h$ . Todos los métodos prácticos para recuperar energía de la alberca requieren la consideración de tal zona convectiva en el fondo de la alberca. La influencia de esa zona convectiva sobre el aumento medio diario de temperatura no sería importante si se considera la profundidad efectiva de la alberca a la parte superior de ésta zona convectiva. Siempre y cuando la zona convectiva no tenga dimensiones grandes, ya que entonces habría variaciones

horales al rededor de la temperatura media, considerables en las ecuaciones de diseño de intercambio de calor y abatimiento de la variación de conversión de energía durante un día particular.

Se puede detallar más el sistema físico bajo estudio, dependiendo del alcance que se le quiera dar a la variación de temperatura horal. La cual puede -- ser analizada en un medio infinito, y poder refinar la aproximación a la variación de temperatura; considerando las propiedades térmicas de la alberca y tierra diferentes. La ecuación energética de la zona convectiva esta dada por

$$\rho_p c_p d \frac{dT}{d\tau} + K_p \frac{\partial T_p}{\partial x} \Big|_{x=h-\delta} - K_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \Big|_{x=h} = \phi_p(\tau) \quad (38)$$

Donde las letras p y g se refieran a la alberca y tierra respectivamente. Integrando la difusión de temperatura de la ecuación 3' para las condiciones en los alrededores dadas por la ecuación 33 y con --

la condición que la temperatura es continua en los límites o alrededores del sistema, se encuentra para el flujo  $\Theta(x, \tau)$  de la ecuación 10 y para grandes valores de tiempo.

$$\begin{aligned}
 T_v = & \sum \frac{M_{i,n} \exp(-\mu_{i,n}h) \sin \left[ \frac{2n\pi(t-6)}{24} - \delta_n \right]}{\sqrt{\left\{ \left( \frac{2n\pi}{24} \rho_p c_p d + S_n' \right)^2 + S_n'^2 \right\}}} \\
 & + \sum \frac{N_{i,n} \exp(-\nu_{i,n}h) \cos \left[ \frac{2n\pi(t-6)}{24} - \delta_n \right]}{\sqrt{\left\{ \left( \frac{2n\pi}{24} \rho_p c_p d + S_n' \right)^2 + S_n'^2 \right\}}} \quad (39) \\
 S_n' = & \left( \frac{n\pi}{24} \right)^2 \left( \frac{K_p}{\sqrt{\alpha_p}} + \frac{K_g}{\sqrt{\alpha_g}} \right) \\
 \delta_n = & \cot^{-1} \frac{S_n'}{\frac{2n\pi}{24} \rho_p c_p d + S_n'}
 \end{aligned}$$

La figura 12 muestra  $T_v$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), variación horal de la temperatura media diaria para un espesor de la zona convectiva de  $d=0$  y  $d=20$  cm considerando las propiedades de alberca y tierra que limitan el sistema, - iguales a las de una solución de  $\text{MgCl}_2$  para la radiación dada en el solsticio de verano según la ecuación 37.

En el solsticio de verano habrá una diferencia de -

--- Con Zona Convectiva de 20 cm.  
 Sin Zona Convectiva.

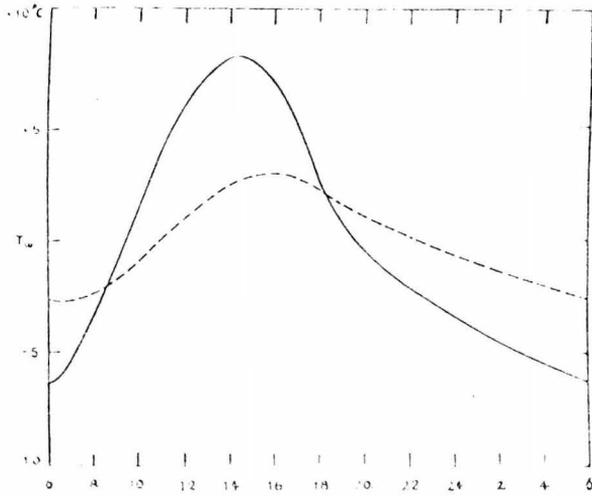


Fig. 12

Variación horal de la temperatura media en el fondo de una alberca de un metro de profundidad con y sin la zona convectiva en el fondo.

$\pm 14^{\circ}\text{C}$  entre las temperaturas máxima y mínima en el fondo de una alberca que no tiene una zona convectiva, mientras que en la alberca con una zona convectiva de 20 cm se puede ver una diferencia de temperaturas menor a  $6^{\circ}\text{C}$ .

La variación horal en la energía extraída de la alberca durante el día dependiera del método de explotación. En función, a lo discutido, una manera de extraer energía de la alberca es hacer que la capa del fondo de la alberca fluya a través de toda la longitud de la alberca, removiendo el líquido caliente por un lado, extrayendo algo de energía calorífica por medio de intercambio de calor y regresando el fluido frío por otro lado para repetir el proceso.

La energía extraída sera proporcional a:

$$e_c V (\tau) \Delta T$$

$V(\bar{T})$  es el flujo de volúmen y  $\Delta T$  la caída de temperatura del líquido caliente.  $V(\bar{T})$  se mantiene constante, ( $\text{ft}^3/\text{h}$ ),

si  $\Delta T$  se mantiene constante, la energía  $U(\bar{T})$  removida durante el día será constante, pero la temperatura de la energía variará de acuerdo a la ecuación 39. La variación fraccional de la energía convertida extraída de la alberca esta dada por:

$$\frac{1}{J} \delta J = \frac{1}{T_c} \cdot \frac{dJ}{dT_c} \delta T_c = \frac{1}{J} \frac{dJ}{dT_c} T_c = \frac{0.1463}{0.1463 T_c - T_c} \cdot T_c$$

donde  $J$  esta dada por la ecuación 30 y  $T_w$  por la ecuación 33.

Para una masa de agua de 1 m. de profundidad sin una zona convectiva en el fondo substituyendo el valor extremo de  $T_w$  de la figura 12 en la ecuación anterior y para la temperatura media óptima de trabajo de  $98^\circ\text{C}$ , la máxima rapidéz horal de conversión de energía sera de 9.1% mayor que la media diaria, y la rapidéz mínima, 5.8% menor. Para una

alberca con una zona convectiva de 20 cm. la rapidéz horal máxima de conversión de energía es 3.4% mayor que la rapidéz media diaria y la rapidéz mínima 3.2% menor.

### "Estabilidad Térmica"

La operación eficiente de la alberca solar depende de la estabilidad con respecto al movimiento vertical de salmuera, ya que capta y almacena la radiación solar incidente.

Las perturbaciones originadas por una transferencia de masa causan también una transferencia de calor destruyendo el efecto de absorción de Energía Solar de la solución sal-agua. Las ondas de la superficie del agua, el movimiento horizontal de la zona convectiva en el fondo, (necesario para disipar el líquido calentado) la expansión térmica que sufre el líquido caliente y la evaporación en la superficie del líquido (que aumenta la concentración de la sal y la densidad de la solución de la superficie) son todas perturbaciones que dan lugar a --

transporte de masa en sentido vertical, en un volúmen de agua contenido en una alberca, razón por la que se presentan diferentes densidades a lo largo del plano vertical a una alberca o volúmen de agua expuesto a la atmósfera.

La condición de que las regiones bajas permanecen más densas que las superiores se puede establecer como:

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{\partial\rho}{\partial q} \cdot \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial\rho}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \geq 0 \quad (39)$$

Donde  $q$  es la concentración de sal en  $\text{g/cm}^3$

La condición expresada por la ecuación 40 es suficiente para prevenir el movimiento convectivo ordinario. Sin embargo, puede ser mostrado que para prevenir un movimiento oscilatorio que aumenta con el tiempo, es necesario que la relación entre el gradiente de densidad y concentración de sal esté dado por:

$$(\rho + \alpha) \frac{\partial\rho}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + (\rho + \alpha) \frac{\partial\rho}{\partial q} \cdot \frac{\partial q}{\partial x} \geq 0 \quad (41)$$

donde  $\nu$  es la viscosidad de la solución y  $\alpha'$  el coeficiente de difusión de sal ( $ft^2/h$ ).

El gradiente de concentración de sal puede ser determinado de la ecuación de difusión correspondiente a la sal en solución.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha' \frac{\partial q}{\partial x} \right) = \frac{\partial q}{\partial t} \quad (42)$$

El coeficiente de difusión de sal depende de la temperatura en relación de un centésimo con respecto al coeficiente de conductividad térmica. Por lo que se puede suponer que las variaciones de temperatura diarias de poca magnitud en la alberca no afectan considerablemente el valor de  $q$  por lo que para grandes valores de tiempo en una alberca solar en operación la concentración de sal es independiente de el tiempo, por lo que el miembro derecho de la ecuación 42 desaparece.

Integrando la ecuación 42 para  $\frac{dq}{dt} = 0$

$$\alpha' \left( \frac{dq}{dx} \right) = Q$$

Donde  $Q$  es el flujo de sal de el fondo a la superficie de la alberca en (lb/hft<sup>2</sup>)

Integrando la ecuación 43

$$q(x) = Q \int_0^x \frac{dx'}{\alpha'} + q(0)$$

Si se mantiene la concentración del fondo de la alberca en  $q(h)$  y la superficie en  $q(0)$

$$Q = \frac{q(h) - q(0)}{\int_0^h \frac{dx'}{\alpha'}} \quad (14)$$

Substituyendo por  $Q$  en la ecuación 43

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{q(h) - q(0)}{\alpha' \int_0^h \frac{dx'}{\alpha'}} \quad (15)$$

El criterio de estabilidad dado por la ecuación 41 obtiene por substitución para  $\partial q / \partial x$  de la ecuación 45:

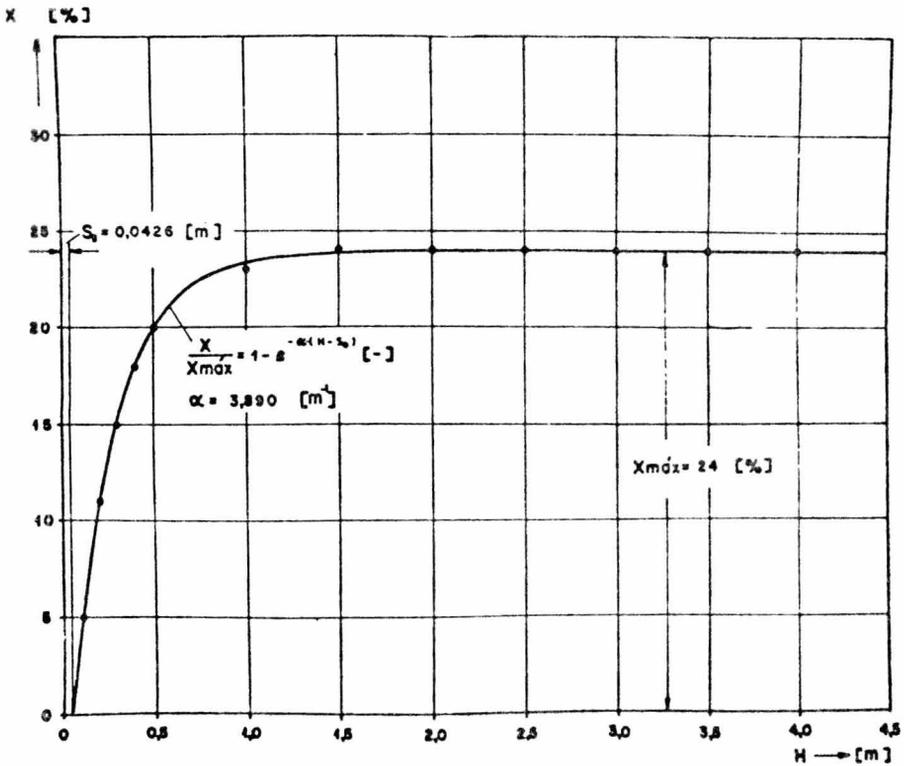
$$\Delta T = q(h) - q(0) \approx \frac{\partial q}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{q(h) - q(0)}{\alpha' \int_0^h \frac{dx'}{\alpha'}} \int_0^h \frac{dx'}{\alpha'} \quad (16)$$

Usando valores extremos de  $\frac{dc}{dq}$ ,  $\frac{dc}{dT}$  y  $\alpha'$  tomados de las tablas críticas internacionales Tomo III pag. 71 - 1927, y para valores máximos de  $\frac{dT}{dx}$  se encuentra, de la ecuación 46, que una diferencia en concentración de .34 g/cm se requiere para mantener estabilidad en una alberca de 100 cm de profundidad de  $MgCl_2$  del cual la energía no esta siendo disipada y en la cual se permite una zona convectiva de 20 cm en el fondo de la alberca. Una alberca de NaCl es inestable si la energía no es renovada del fondo durante períodos de radiación intensa. La diferencia de concentración puede ser mantenida en la alberca adicionando sal a la capa del fondo y lavando la superficie de la alberca con agua clara. Para una diferencia de concentración de .34 g/cc se encuentra de la ecuación 44 y para valores estimados de  $\alpha'$  se deben disipar de la superficie y almacenar en el fondo .0063 g/cm de sal por día con objeto de retener la concentración deseada en los extremos (superficie y fondo de la alberca). En una alberca

ca de 1 Km<sup>2</sup> esto requiere el control de 60 toneladas métricas de sal por día.

Experimentos han demostrado que el valor de  $A_q$  (la diferencia de concentración entre el fondo y la su perficie de la alberca) requerido para prevenir la convección, dada anteriormente contiene un grande margen de seguridad y que considerablemente bajo - gradientes aseguran estabilidad.

El estudio de albercas de agua salada de concentración variable como captadores de energía solar está basado sobre el mantenimiento del gradiente de concentración de sal (al cual crece de la superficie al fondo de la alberca, figura siguiente) previniendo la convección natural.



Dependencia de concentración de sal (x) -  
a través de una alberca solar con respecto  
a su profundidad H.

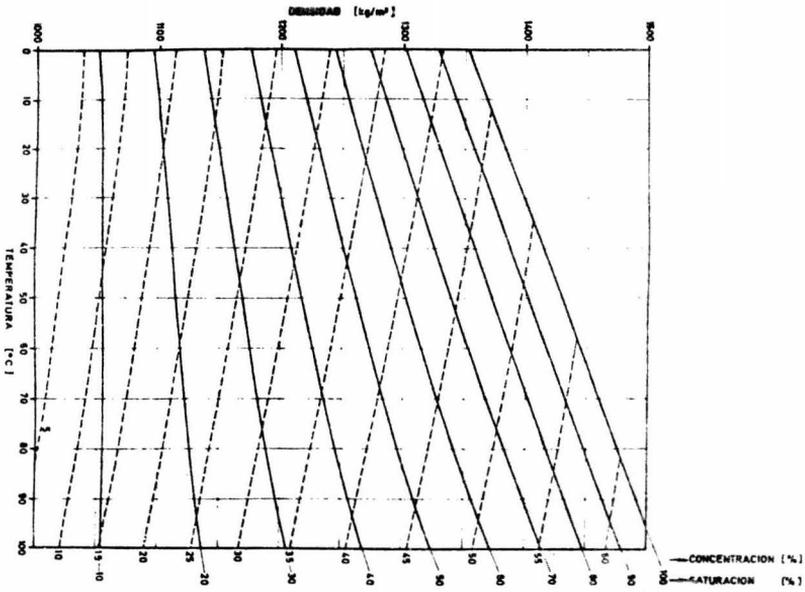
La supresión de la convección dentro de la alberca permite que cerca del 50% del calor solar sea co--lectado o almacenado para propósitos industriales. El calor anual de  $182.2 \text{ K cal/cm}^2$  está de acuerdo con las isotermas generalizadas de radiación total dadas en el mapa mundial, las cuales caen entre --180 y  $200 \text{ K cal/cm}^2$ .

En cualquier alberca solar destinada a coleccionar energía calorífica obtenida por radiación inciden--tal, un gradiente de concentración debe conservarse causando una continua aunque débil difusión de sal del fondo hacia arriba. La sal que llega a la superficie de esa forma tiene que ser eliminada, --lo que es posible por medio de agua de lavado la --cual fluye sobre la alberca. Esta no es la única agua requerida, sino también el agua que puede reem--plazar las pérdidas por evaporación. Deberá exis--tir la cantidad necesaria de agua para al menos --llenar 1.5 m. aproximadamente de altura antes de --que se comience la operación.

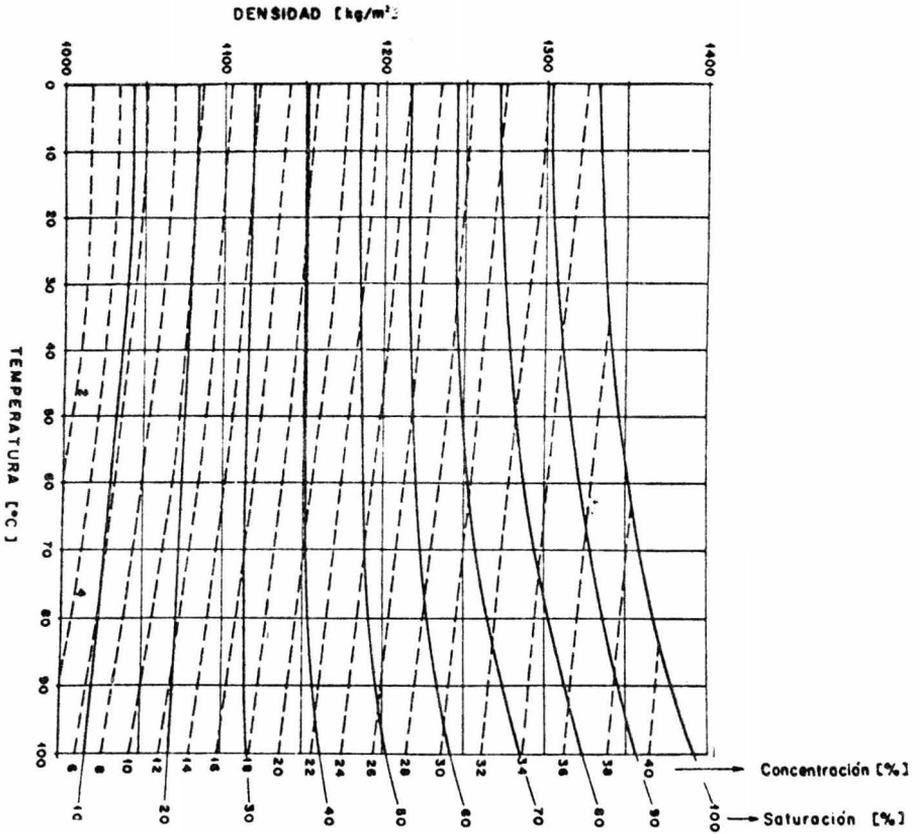
En las siguientes figuras se muestra la dependen--cia de la densidad sobre la temperatura y concen--

tracción para diferentes sales.

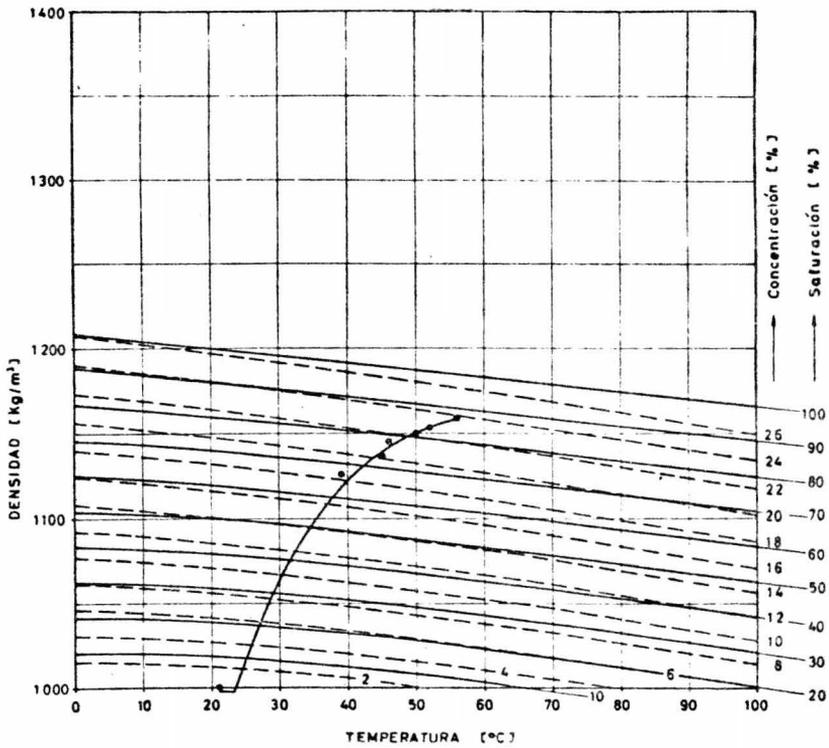
Se muestra también la variación en la densidad de una alberca natural solar, la dependencia de profundidad con densidad dando una función lineal permitiendo determinar fácilmente el consumo inicial



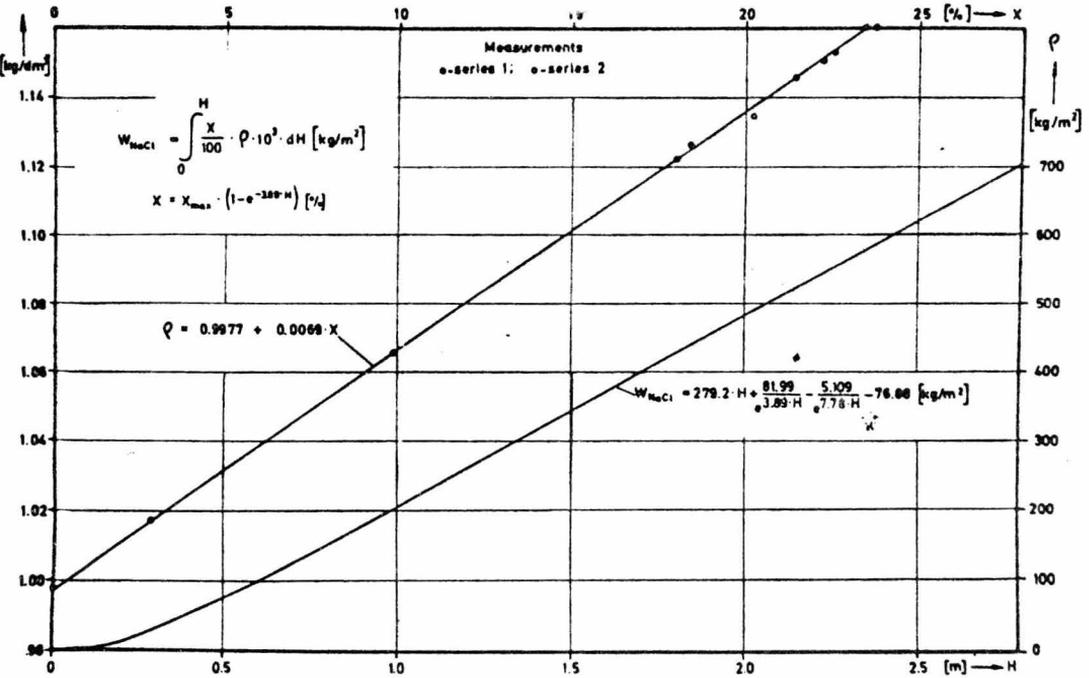
Dependencia de la densidad sobre temperatura y concentración de soluciones de  $\text{NaNO}_3$ .



Dependencia de la densidad sobre la temperatura y concentración de soluciones de MgCl<sub>2</sub>



Dependencia de la densidad sobre la temperatura y concentración de soluciones de NaCl.



Dependencia de la densidad sobre la profundidad de una alberca solar con NaCl y el -- consumo inicial de sal.

N O M E N C L A T U R A

- A<sub>i</sub>** Componentes del valor medio del flujo solar  $F(D)$  que penetra una superficie de agua lisa.
- a<sub>i</sub>** Coeficientes de absorción de la solución agua-sal para los componentes  $A_i$  de  $F(D)$ .
- $\alpha_i$**  Coeficiente de difusividad térmica.
- $\alpha'_i$**  Coeficiente de difusividad de sal.
- B<sub>iu</sub>** Coeficiente de los componentes sinusoidales del flujo solar  $F(D)$ .
- b<sub>iu</sub>** Coeficientes de absorción del agua de sal para las componentes sinusoidales del flujo solar  $F(D)$ .
- c** Calor específico.
- d** Altura de la zona convectiva en el fondo de la alberca.
- D** Fecha del año. Medida en días después del equinoccio de primavera.
- $F(x, D)$**  Flujo solar. Energía radiante por día que penetra a la profundidad  $x$  en la alberca en la fecha  $D$ .
- $\mathcal{L}$**  Número de días después de la exposición de la alberca a la radiación solar.

$\phi(x, t)$  Flujo solar. Energía radiante por hora que --  
penetra a la profundidad  $x$  en la alberca en --  
el tiempo  $t$ .

$$\phi_v(x, t) = \phi(x, t) - \frac{F(x, D)}{24}$$

$h$  = Profundidad total de la alberca medida en cm  
a partir de la superficie.

$J(D)$  Energía eléctrica o mecánica recobrable de la  
alberca suponiendo la conversión a través del  
ciclo de Carnot.

$k$  Conductividad térmica.

$M_{1n}, N_{1n}$  Coeficientes de los componentes sinusoidales  
de el flujo

$\mu_{1n}, \mu_{2n}$  Coeficientes de absorción de la solución agua  
-sal para los componentes sinusoidales de

$\nu$  Viscosidad.

$\rho$  Concentración de la sal en  $\text{gr/cm}^3$ .

$\rho$  Densidad.

$t$  Tiempo de el día (tarde solar 12).

$T$  Número de horas después del tiempo de exposi-  
ción de la alberca a radiación solar.

$T(x, D)$  Temperatura a una profundidad  $x$  en la alberca  
a un tiempo  $(o D, T, t)$  en  $^{\circ}\text{C} = T_a + T_b + T_c + T_d + T_e$

$T_a(x,D)$  Contribución a  $T(x,D)$  debida a la radiación solar absorbida en el fondo de la alberca.

$T_b(x,D)$  Contribución a  $T(x,D)$  debida a la radiación absorbida en el cuerpo de la alberca.

$T_c(x,D)$  Contribución a  $T(x,D)$  debido a la energía extraída del fondo de la alberca.

$T_d(x,D)$  Contribución a  $T(x,D)$  debida al intercambio de calor con la atmósfera en la superficie de la alberca.

$T_e(x,D)$  Contribución a  $T(x,D)$  debida a la temperatura inicial de la alberca.

$$T_w(x,D) = T(x,D) - T_c(x,D)$$

$T_s$  Temperatura debida al calor que penetra a la alberca solar debida a un ciclo de Carnot en C

$T_v(h,t)$  Variación horal al rededor de la temperatura promedio diario  $T(h,D)$  en el fondo de la alberca.

$T_w(h)$  Temperatura del líquido extraído del fondo de la alberca.

$\tilde{T}_i(x)$   $i = (a, b, \dots, m)$  Valor medio a régimen permanente de  $T_i(x,D)$ .

$\tilde{T}_i(x,D)$  Componentes sinusoidales del valor de  $T_i(x,D)$  a régimen permanente.

$U(h, D)$  Pericés de extracción de energía del fondo de la alberca.

$\tilde{U}(h, D)$  Componentes sinusoidales de  $U(h, D)$  en régimen permanente.

$\alpha$  Profundidad en la alberca medida en cm a partir de la superficie.

$\bar{U}(h)$  Valor medio en régimen permanente de  $U(h, D)$ .

## C A P I T U L O    I V

### Analisis Empírico de la evaporación Solar

#### Profundidad y variaciones diurnas de temperatura

La expresión para calcular la rapidéz de evaporación de superficies de agua libres a la atmósfera, está dada por:

(1)

$$E = (\alpha + \beta w)(p_s - p_A)$$

Los valores de las constantes  $\alpha$  y  $\beta$  hallados en la literatura difieren considerablemente, por lo que tomando como base a Rower a una presión de 750 mm Hg - (29.9 in Hg) y 30°C  $\alpha = .00128$  y  $\beta = .00021$  ( $\alpha = .067$  y  $\beta = .018$  si la evaporación es medida en lb H<sub>2</sub>O/ft<sup>2</sup> la velocidad del viento en millas por hora y las presiones de vapor en pulgadas de mercurio).

La velocidad del viento y la presión de vapor del agua en el aire son variables que no se pueden alternar en la práctica, una manera de aumentar la cantidad de agua evaporada es aumentando la presión de va

por de la salmuera. P<sub>b</sub> depende esencialmente de la cantidad de calor dado a la salmuera por radiación solar y como la absorción de radiación por salmueras saturadas es incompleta, un aumento en la evaporación se puede causar añadiendo apropiados tintes a la salmuera (ejemplo: verde de 2 naftol).

El presente estudio trata la influencia de este factor (colorantes) y la variación de la profundidad de la salmuera sobre la rapidez de evaporación.

Por lo regular, la rapidez de evaporación se mide en tanques de diferentes dimensiones, colocados arriba del nivel de la tierra, enterrados en ella, o flotando en una gran superficie de salmuera libre a la atmósfera.

La rapidéz de evaporación medida en tales tanques, no es igual a la evaporación de grandes superficies de agua libres a la atmósfera, por lo que se deben usar factores empíricos para estimar a partir de datos de tanques pequeños la evaporación correcta que se lleva a cabo en grandes superficies de salmuera.

Las discrepancias en resultados son causadas por -- las condiciones físicas prevalectentes en los tan--ques experimentales, comparadas con las condiciones en que se encuentran las grandes superficies respecto a:

- a) Transferencia de calor a traves de las paredes.
- b) Absorción de radiación.
- c) Movimiento de onda de la superficie de evaporación.

"Variación diurna de la temperatura de salmueras y - la influencia de la profundidad sobre la rapidéz de evaporación"

El siguiente desarrollo teórico se presenta con el proposito de fijar los parámetros principales que - determinan la evaporación solar en albercas donde - puede haber precipitados de sal.

Se discuten en primer lugar, la influencia de la -- salmuera sobre la variación diaria de temperatura y evaporación.

La segunda sección teórica trata de la absorción de

energía solar en salmueras libres a la atmósfera, - con el propósito de estimar la magnitud de la concentración de colorantes, necesario para asegurar una absorción de energía solar prácticamente completa en capas de diferentes profundidades.

Se supone que:

Una cantidad suficiente de colorante se añade a la salmuera para asegurar la absorción completa de radiación; que la temperatura de la salmuera es uniforme; y que el calor transferido a través de las paredes se puede despreciar.

El balance de energía en ( $\text{cal cm}^{-2}$ ) en el intervalo de tiempo  $dt$  de una columna líquida de área unitaria involucra los siguientes términos:

Radiación Absorbida.- La radiación es una función del tiempo y está compuesta de radiación directa e indirecta. En el intervalo de tiempo  $dt$  el calor absorbido por la salmuera es:

$$I_0(t) dt$$

$$\frac{\text{cal}}{h \text{ cm}^2} \times h = \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2}$$

Radiación emitida por la Salmuera.- La radiación de la salmuera es proporcional a  $(273 + TB)^4$ . Ya que la máxima variación diurna de temperatura de la salmuera, rara vez excede de  $10^{\circ}\text{C}$ , la radiación emitida se puede expresar como una función lineal

$$(y + zTB) dt$$

Evaporación de agua.- El calor consumido por evaporación de  $dE$  gramos de agua por  $\text{cm}^2$  es:

$$hw \frac{dE}{dt} dt \quad \left( \frac{\text{cal}}{\text{lb}} \times \frac{1}{h} \times h = \text{cal} \right)$$

Intercambio de calor entre salmuera y suelo.- Se supone que el suelo en el fondo de la alberca está cubierto por una delgada capa de sal. El intercambio de calor entre salmuera y suelo es:

$$\frac{K_{sa}}{Z_{sa}} (TB - T_s) dt$$

$$\frac{1}{\text{cm}} \times \frac{\text{cal}}{\text{cm sec } ^{\circ}\text{C}} \times ^{\circ}\text{C} \times \text{sec} = \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2}$$

Intercambio de calor entre salmuera y aire.- La rapidez de intercambio de calor entre la salmuera y el aire depende de la velocidad del viento y es:

$$hw (TB - TA) dt$$

$$\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ sec } ^{\circ}\text{C}} \times ^{\circ}\text{C} \times \text{sec} = \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2}$$

Cambio de temperatura de la salmuera.- El calor tomado o almacenado por la salmuera es:

$$Z_s c_s dT_s$$

Cambio de temperatura de la sal.- Cuando la capa de sal es muy delgada, la variación diaria de  $T_s$  es pequeña. Consecuentemente  $dT_s$  puede ser despreciada en comparación con  $dT_b$ . Las variaciones promedio de la temperatura de la salmuera y sal no son iguales y existe una diferencia de fase y de amplitud entre ellos. Como primera aproximación para capas de sal delgadas el cambio de temperatura promedio de la capa de sal se supone que es:  $1/2 dT_b$  durante el período  $dt$  y la energía calorífica almacenada por este cambio es:  $1/2 Z_s c_s dT_b$ .

Calor de cristalización y de disolución.- Los efectos de cristalización de  $\text{NaCl}$  y disolución de sales disueltas se pueden considerar se los comparemos con los otros términos en el balance de energía, y por consiguiente se desprecian.

Sumando todos los términos:

$$I_0(t) = \gamma + zT_B + \frac{k_{ev}}{Z_{ev}} (T_B - T_A) + h(w) (T_B - T_A) + \\ \left( Z_B C_B + \frac{Z_{ev}}{2} C_{ev} \right) \frac{dT_B}{dt} + \lambda_w \frac{dE}{dt} \quad (2)$$

Con el objeto de expresar la evaporación en términos TB la ecuación 1 queda

$$\frac{dE}{dt} = F(w) (p_B - p_A) \quad (3)$$

y  $p_B$  sustituido en términos de TB.

La relación  $\frac{h(w)}{F(w)}$  es constante sobre un largo --

rango de velocidades del viento.

$p_B$  es una función exponencial del recíproco valor absoluto de la temperatura. Para pequeños intervalos de temperatura, se puede suponer una relación de la forma:

$$p_B = i + jTB$$

Rearreglando la ecuación 2

$$K \frac{dT_B}{dt} + l(t) T_B + m(t) = 0 \quad (4)$$

donde

$$K = Z_B C_B + \frac{Z_{sa}}{2} C_{sa} \quad (5)$$

$$l(t) = \frac{k_{sa}}{Z_{sa}} + \lambda_{oj} F(w) + z + h(w)$$

$$m(t) = \lambda_{oj} F(i - p_A) - h T_A - \frac{k_{sa}}{Z_{sa}} T_B + y - I_a(t)$$

En  $l(t)$  los dos términos que dependen del tiempo -- son  $h(w)$  y  $F(w)$ .

En la primera aproximación  $l(t)$  se sustituye por -- su valor de tiempo promedio diurno  $\bar{l}(t)$ .

Esta simplificación introduce un pequeño error en el cálculo si la velocidad del viento es baja o -- constante sobre el período de evaporación. Durante las estaciones no lluviosas,  $p_A$ ,  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $I_a(t)$ , --  $h(w)$  y  $F(w)$  son funciones periódicas de tiempo casi iguales en un período de 24 horas, por lo que --  $m(t)$  se puede expresar como series de Fourier

$$m(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos \frac{2n\pi}{s} (t - \theta_n)$$

Substituyendo este valor de  $m(t)$  en la ecuación 4 se obtiene:

$$K \frac{dT_B}{dt} + iT_B + \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos \frac{2n\pi}{s} (t - \theta_n) = 0 \quad (6)$$

La solución a régimen permanente de ésta ecuación se puede escribir como:

$$T_B = \sum_{n=0}^{\infty} - \frac{a_n \cos \frac{2n\pi}{s} (t - \theta_n - \theta'_n)}{\sqrt{i^2 + \frac{4n^2\pi^2}{s^2} \left( Z_B C_B + \frac{Z_{in}}{2} C_{in} \right)^2}} \quad (6A)$$

donde

$$\theta'_n = - \frac{s}{2n\pi} \tan^{-1} \frac{2n\pi}{i s} \left( Z_B C_B + \frac{Z_{in}}{2} C_{in} \right) \quad (6B)$$

Las ecuaciones 6A y 6B muestran que la variación - periódica diaria de TB depende de la profundidad - de la salmuera  $Z_B$ . La influencia de este factor - se aprecia como sigue:

La amplitud de cada término en las series de cose- no 6A disminuye cuando aumenta  $Z_B$ .

El atraso de fase de cada término aumenta con  $Z_B$ .

Por consiguiente, en capas de salmuera de diferen- te profundidad, si la cantidad de energía absorvi- da por unidad de área de superficie libre es cons-

tante, la amplitud de la variación diaria de la temperatura aumenta cuando aumenta la profundidad de la salmuera.

Mejor dicho  $T_s$  alcanza su máximo después de  $m(t)$ , y como el principal término de  $m(t)$  es  $l_0(t)$  se concluye que a mayor profundidad de la alberca de evaporación el tiempo entre la intensidad de radiación máxima y la temperatura máxima alcanzable en la salmuera aumenta es decir que los cambios periódicos de radiación causan una periodicidad diaria en la temperatura de la salmuera como consecuencia, pero la profundidad actúa como un factor de amortiguamiento para la amplitud y causa un adelantamiento de fase.

Para evaluar la evaporación diaria, la ecuación 3 se integra:

$$E_{24} = \int_0^{24} F(w) (i - p_A) dt + \int_0^{24} F(w) T_s dt \quad (7)$$

La primera integral depende solo de las condiciones meteorológicas, y la segunda depende de la tem

peratura de la salmuera y de la velocidad del viento.

Si  $F(w)$  es constante, el segundo término de la ecuación 7 es:

$$jF \int_0^z T_{rad} dt - jF \bar{T}_B$$

donde  $\bar{T}_B$  es la temperatura promedio diaria de la salmuera. Para este caso la evaporación diaria depende solo de la temperatura promedio  $\bar{T}_B$  de la salmuera, la cual no depende de la profundidad de  $Z$  como se puede ver de la ecuación 6A.

#### "Absorción de Energía Solar en Salmueras."

La energía solar es parcialmente absorbida por agua o soluciones de sal transparentes e incoloras.

Aunque la radiación infrarroja es completamente absorbida, la radiación visible la cual es cerca del 35% de la energía total solar atraviesa tramos de capas de tales soluciones sin apreciable pérdida.

En soluciones de poca profundidad expuestas a la atmósfera que tenga una cara brillante de sol en el fondo, hay considerable pérdida de radiación --

por reflexión. Con el objeto de determinar la cantidad de colorante necesario para asegurar una utilización práctica de energía solar completa en tales superficies se estimó, la absorción de radiación solar en salmueras de diferente profundidad y concentración de colorante como sigue:

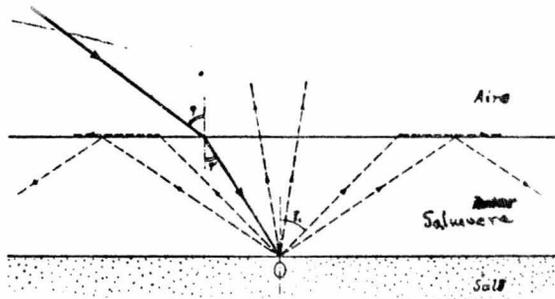


Fig. 1

Absorción de radiación solar en salmueras expuestas a la atmósfera.

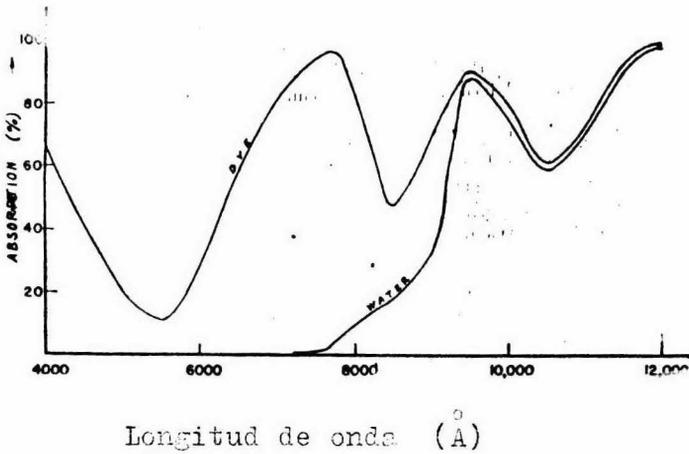


Fig. 2

Espectro de absorción de solución acuosa de colorante.

Concentración 10g por longitud de la celda 5cm.

Considerese un conjunto de rayos de luz monocromática de longitud de onda  $\lambda$  que inciden sobre una superficie de salmuera con un ángulo  $\varphi$  y que es refractado a un ángulo  $\varphi'$  con respecto a la vertical (Fig. 1).

La energía  $I$  que llega a la capa de sal esta dada por:

$$I = I_0(\lambda) e^{-kx} \frac{2n \cos \varphi'}{n + \cos \varphi} = I_0 e^{-kx} \cos \varphi'$$

donde  $I_0(\lambda)$  es la energía del haz original de rayos solares menos la fracción reflejada en la superficie de la salmuera, y "a" la densidad óptica de la salmuera.

Se supone que la capa de sal refleja la radiación difundiendo idealmente de acuerdo a la ley del coseno de Lambert.

La radiación reflejada se compone de 2 fracciones:

1.- Radiación dentro de un cono crítico con origen en O (fig. 1) y un ángulo  $\gamma_c$ . La energía de esos rayos se absorbe parcialmente en su trayectoria hacia arriba a través de la salmuera y una fracción (fig.1) pasará a través de la interface aire-salmuera para perderse. Como primera aproximación la reflexión en la interface salmuera - aire de esta fracción de la radiación se desprecia.

2.- Energía reflejada a grandes distancias o a un ángulo mayor de  $\gamma_c$ . Esta energía radiante se refleja totalmente en la interface salmuera - aire para después sufrir una absorción parcial y una segunda reflexión difusa en la capa de sal.

La energía que llega a la capa de sal para una segunda reflexión difusa se denota por  $f_2 I$ . Este proceso se repite hasta que la radiación llega a las paredes de la alberca; despreciando las pérdidas de calor sobre esas paredes, la cantidad de radiación de longitud de onda  $\lambda$  que se pierde al aire es:

$$L(\lambda) = I(f_1 + f_1 f_2 + f_1 f_2^2 + \dots) = \frac{f_1}{1 - f_2} I$$

la pérdida total  $L_T$ , de la radiación que incide en la salmuera es:

$$L_T = \sum \frac{f_1}{1 - f_2} I(\lambda) e^{-a/\cos \gamma'} \quad (8)$$

La fracción  $f_1$  de la energía  $I$  que pierde al aire después de la primera reflexión difusa es:

$$f_1 = 2 \int_0^{\gamma_c} \sin x \cos x e^{-a/\cos x} dx = \int_1^{1/\cos \gamma_c} \frac{e^{-ay}}{y^2} dy$$

Integrando parcialmente:

$$f_1 = -\cos^2 \gamma_c e^{a/\cos \gamma_c} + e^{-a} + a [\cos \gamma_c e^{-a/\cos \gamma_c} - e^{-a} - a Ei(-a) + a Ei(-a/\cos \gamma_c)]$$

donde  $Ei(-x)$  es la integral logaritmica definida como:

$$Ei(-x) = - \int_x^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du$$

de donde:

$$\int_x^{\infty} \frac{e^{-ay}}{y} dy = - Ei(-ax)$$

La fracción  $f_2$  es:

$$f_2 = 2 \int_{\gamma_c}^{\pi/2} \sin x \cos x e^{-a/\cos x} dx$$

la cual resulta

$$f_2 = \cos^2 \gamma_c e^{-2a/\cos \gamma_c} - 2a [\cos \gamma_c e^{-2a/\cos \gamma_c} + 2a Ei(-2a/\cos \gamma_c)]$$

$f_1$  y  $f_2$  depende del ángulo crítico y por lo tanto son funciones del índice de refracción  $n_B$  de la -- salmuera.

La variación de  $n_B$  con la longitud de onda no afecta los valores de  $f_1$  y  $f_2$  apreciablemente. Basando los cálculos en un valor de  $\gamma_c = 45^\circ$  ( $n_B = 1.41$ ). La variación de  $L$  con el ángulo de incidencia no -

es grande en salmueras de poca profundidad, ya que el ángulo de refracción varía de  $45^\circ$  a  $0^\circ$ .

Los valores de  $L$  para ángulos de incidencia  $7^\circ$  y  $-30^\circ$ , respectivamente, como funciones de  $K' \lambda Z_0$  se representan en la siguiente tabla

PORCENTAJE EN PERDIDAS DE RADIACION  $100\% I_0$   
 COMO FUNCION DE LA DENSIDAD OPTICA (TABLA  
 1).

$K' \lambda Z_0$	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	3.0
For $\varphi = 7^\circ$	58.3	40.5	23.2	14.6	9.4	5.9	3.6	2.5	1.6	1.0	0.7	0.08
For $\varphi = 30^\circ$	58.0	40.0	22.5	13.7	8.9	5.5	3.3	2.2	1.4	0.9	0.6	0.06

Si el  $\log_e L$  para  $\varphi = 7^\circ$  se grafica contra " $a$ ", la curva tiende a una línea recta, dada por  $\log_e L = .54 - 2.2a$  en la región  $.1 < a < 2$ .

Este resultado, se puede escribir como  $L = .58 e^{-2.2a}$

lo que se puede comparar con la pérdida h-ipotética que resultaría si la reflexión difusa generada en el fondo de la alberca de sal fuera provocada por un espejo ideal.

En este caso las pérdidas se pueden calcular por -

La Ley de Beer:

$$L = e^{-2a/\cos \theta'} = e^{-2.01a}$$

Esto significa que para densidades opticas entre .1 y 2 la perdida de energia en el sistema reflectante difuso es agrosso modo la mitad de las perdidas que se verian en una alberca con un espejo hipotetico en el fondo.

## EXPERIMENTACION

Cuatro vasijas de experimentación se colocaron en línea con el fondo sumergido 30 cm. abajo del nivel de la tierra, a pocos metros una estación meteorológica, se llevó un record de temperaturas de bulbo húmedo y seco por medio de termómetros meteorológicos (con precisión de  $\pm .1^{\circ}\text{C}.$ ). La velocidad del viento se midió por medio de un anemómetro a una altura estandar (2 metros arriba del nivel de la tierra). Los recipientes eran hexagonales de 1.20 m. de diámetro y 1 m. de altura.

Aunque la distribución horizontal de radiación en tales recipientes no es la misma que en una superficie grande de líquido, cada película o capa de altura unitaria recibe la misma cantidad de energía en un tanque de área pequeña que en una alberca. Las medidas mostraron que la variación horizontal de la temperatura no excedía de  $.2^{\circ}\text{C}.$

Los recipientes se llenaron con la salmuera que se iba a investigar. La evaporación de las salmueras se estudio en varias profundidades de solución saturada de NaCl y agua tomada del mar Muerto a una

profundidad de 50 m.

La solución de NaCl es más apropiada para investigar la influencia de la profundidad de la película de salmuera sobre la rapidez de evaporación, debido a que su concentración permanece prácticamente constante durante el experimento.

La salmuera del mar Muerto estaba cerca del punto de saturación con respecto a sal común y tenía la composición mostrada en la tabla siguiente:

Gramos por 100 gramos de agua

CaCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub>	NaCl	KCl
5.2	17.6	10.6	1.6

### RESULTADOS

Tres series experimentales se llevaron a cabo, se describen en detalle.

Soluciones saturadas de sal con una profundidad de 20, 35 y 55 cm. y una concentración de colorante de 20 gramos/cm<sup>3</sup>.

Soluciones saturadas de sal con una profundidad de 20, 35 y 70 cm. del 1.6 gramos de colorante por cm<sup>2</sup> de superficie libre.

Agua del Mar Muerto, sin color y con color en capas de 20 y 50 cm. de profundidad.

La figura 3 muestra la variación diaria de la temperatura de la salmuera a diferentes profundidades, - junto con la temperatura de la sal y el suelo.

Conforme el sol avanza a la posición del zenit la temperatura de la superficie aumenta rápidamente -- mientras la temperatura en las capas bajas aumenta lentamente. A mayor profundidad de la salmuera el -- gradiente de temperaturas el mayor. Las temperatu-- ras de superficie más altas se registraron a la 1.30 P.M. En la tarde la temperatura de la salmuera disminuye rápidamente y el gradiente de temperatura -- vertical se hace pequeño. En la noche la superficie es ligeramente más fría que la de la solución total.

- = temperatura de la superficie
- = sal
- ▣ = salmuera a 13 cm. bajo la superficie de la sal (15 cm bajo la superficie, donde la profundidad de la salmuera es 35 cm.)
- ⊖ = temperatura del aire.

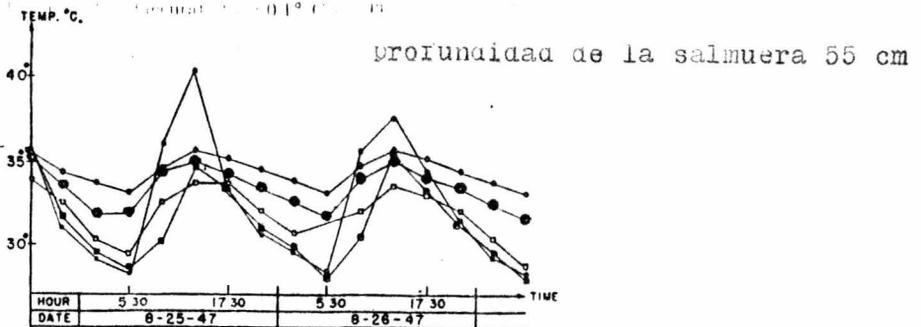
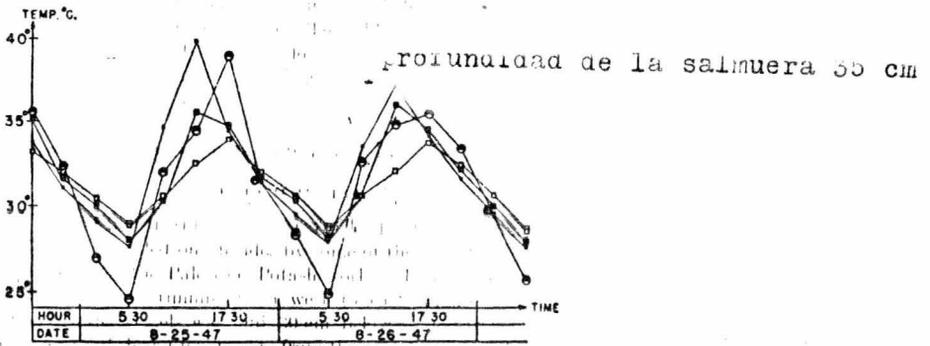
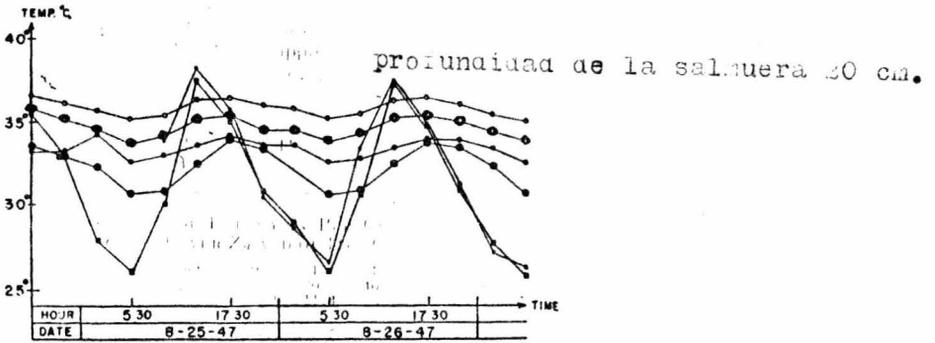


Fig. 3 Datos meteorológicos y temperaturas de salmuera, sal y suelo por soluciones saturadas coloreadas de cloruro de sodio. cm. al suelo bajo la superficie de la salmuera; ○ = 11, ◯ = 7, △ = 5, ● = 1.

Las temperaturas de sal y suelo también varían periódicamente.

La temperatura diaria promedio de las capas mas bajas de solución en cada tanque es mayor que en las capas superiores, mientras que la amplitud de la variación de temperatura diaria disminuye cuando aumenta la profundidad.

La rapidez de evaporación diaria de las soluciones es prácticamente independiente de la profundidad de la capa de salmuera, la tabla siguiente muestra datos de evaporación para un intervalo de 2 días.

La rapidez de evaporación de capas de diferente profundidad es constante dentro del 5%. El error para la determinación del nivel del líquido es .2 mm.

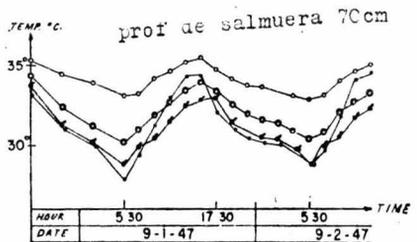
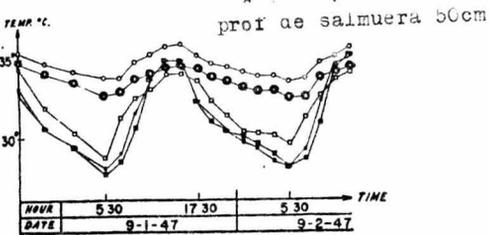
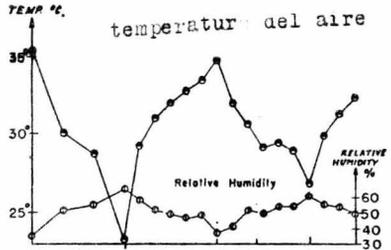
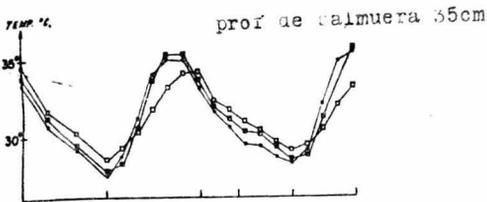
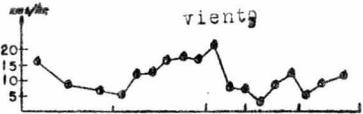
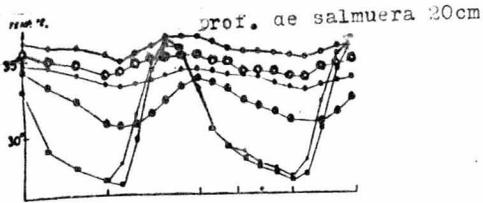
TABLE IV  
EVAPORACION DE DIFERENTES SALMUERAS

Solución	cantidad de colarante añadida.	profundidad promedio de la salmuera		evaporación promedio.	
		cm	in	mm/día	lb agua /ft /día
A. Agosto 24 a 26 5.30pm					
sal común	20°	20	7.9	8.6	1.55
saturada	(1.3)°	35	13.8	8.8	1.58
		55	21.6	9.0	1.62
Agosto 25 a 27 5.30pm					
sal común	20°	20	7.9	8.5	1.53
saturada		35	13.8	8.5	1.53
		55	21.6	8.6	1.55
B. Agosto 31 a Septiembre 2 1.30pm					
sal común	1.8°	20	7.9	8.3	1.51
saturada	(1.3)°	35	13.8	8.8	1.61
		55	21.6	8.6	1.55
		70	27.6	8.9	1.60
Agosto 31 a Septiembre 2 5.40am					
sal común	1.6°	20	7.9	8.1	1.46
saturada		35	13.8	8.1	1.46
		55	21.6	8.8	1.56
		70	27.6	8.9	1.60
C. Septiembre 26 a 29 5.40am					
salmuera	0	20	7.9	5.0	0.92
natural del	4.4°	20	7.9	5.9	1.10
Mar Muerto.	(6.3)°	50	19.7	5.8	1.07
		60	19.7	6.1	1.13

- a).- Todos los valores estan corregidos por convección térmica.  
b).- Reducido m a volúmen a 20°C.  
c).- Gramos por cada metro.  
d).- Gramos por galón.  
e).- Gramos por metro cuadrado.  
f).- Gramos por pie cuadrado.  
g).- Salmuera concentrada hasta el comienzo de precipitación de sal.

Datos meteorológicos y temperaturas del suelo sal y salmuera para soluciones saturadas y coloreadas de cloruro de sodio. 1.6 gramos de colorante por metro cuadrado de superficie libre. cm. al suelo abajo de la superficie de la salmuera.

- = 25
- = 55
- = 75
- = 90
- = temperatura de la superficie cn. de salmuera bajo la superficie
- = 15
- = 55
- = sal
- = temperatura del aire
- = humedad relativa
- = velocidad del viento

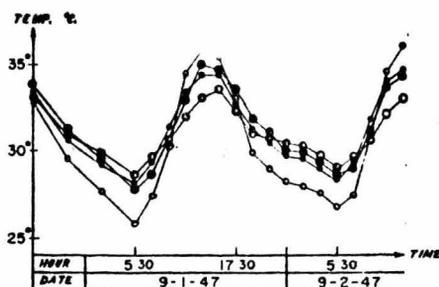


Evaporación de solución saturada de sal con 1.6 - gramos de colorante por metro cuadrado.

En esta serie de experimentos la concentración de colorante varía en proporción inversa a la profundidad de la de salmuera. Por lo que, la radiación solar llega al fondo de la solución y la absorción de energía se distribuye homogéneamente. La figura siguiente (fig. 4) muestra las variaciones diarias de temperatura de salmuera, sal, suelo y datos meteorológicos.

Se observan los mismos cambios en la amplitud de la temperatura promedio diaria con respecto a la profundidad, el gradiente de temperatura es mas chico que en las primeras series de experimentos. La superficie de la salmuera de profundidad de 70 cm. es mas fría que el resto de la solución en la mayor parte del día.

La variación diaria de la temperatura promedio de salmueras en tanques de profundidad variable se muestra en la siguiente figura:



Variación promedio diaria de temperaturas correspondientes a diferentes profundidades de soluciones saturadas de sal.

"Profundidad de la capa en cm."

- = 20
- = 35
- = 50
- = 70

1.6 gramos de colorante por metro cuadrado de superficie libre.

La amplitud de la variación disminuye cuando aumenta la profundidad de la solución y hay también un

retraso de faces con el aumento de la profundidad. La tabla IV B muestra la rapidez de evaporación de salmueras de profundidades variables. La evaporación aumenta lentamente con la profundidad, el máximo aumento es de 10%. Este efecto es debido a -- que la cantidad de colorante es insuficiente para absorción completa de la energía solar y un pequeño porcentaje de él no actúa como absorbente en -- partes sombreadas.

Evaporación del agua del Mar  
Muerto coloreadas y sin colorear.

La figura siguiente muestra la variación de temperaturas de esas salmueras. Las salmueras coloreadas tienen alta temperatura de superficie en comparación con las incoloras durante el día, mientras que en la noche pasa lo opuesto. La diferencia de temperaturas entre la superficie y el fondo de salmueras coloreadas es mas alta que las incoloras -- entre las 8 A.M. y 12 P.M.

La temperatura del suelo bajo la salmuera incolora es mas alta que bajo la coloreada.

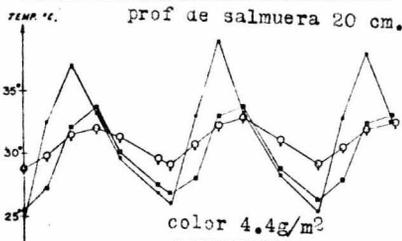
Datos meteorológicos y temperaturas de salmuera y suelo para agua del mar Muerto coloreada y sin colorear.

Centímetros al suelo abajo de la superficie de la salmuera

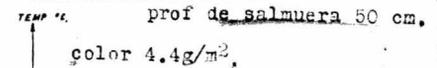
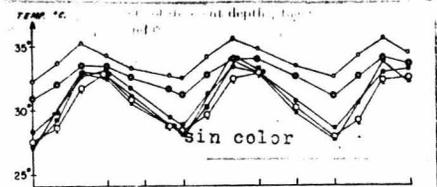
- = 37
- = 57
- = 77
- = 93

Temperatura de la superficie centímetros de salmuera bajo la superficie

- ◻ = 17
- ◕ = 37
- ◐ = temperatura del aire.



HROR	17 30	5 30	17 30	5 30	TIME
DATE	9-26-47	9-27-47	9-27-47	9-28-47	



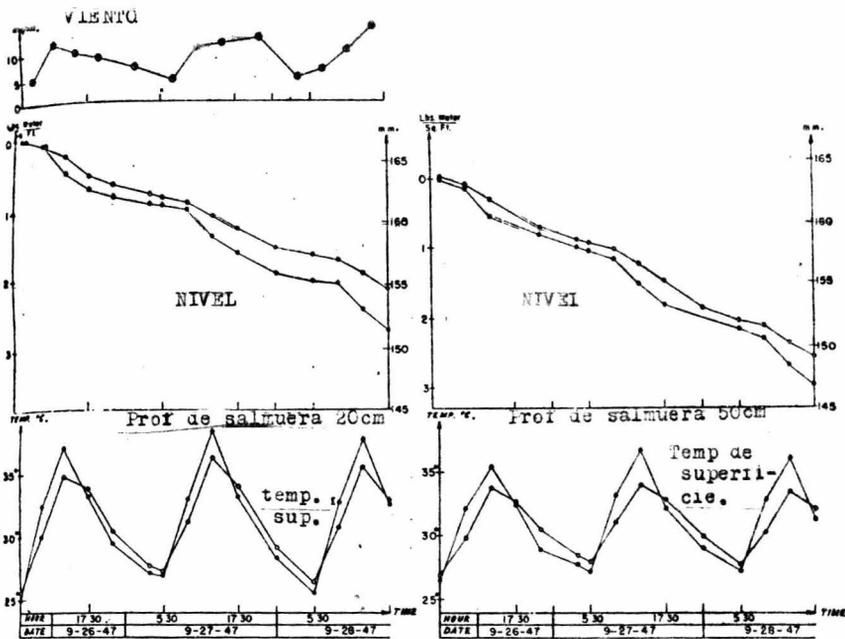
HROR	17 30	5 30	17 30	5 30	TIME
DATE	9-26-47	9-27-47	9-27-47	9-28-47	

La figura siguiente muestra una comparación de temperaturas de superficie y niveles entre salmuera - colora e incolora (figura 10).

En esta figura el nivel de la salmuera es tambien expresado en términos de la evaporación (en lb de  $H_2O$  a  $30^{\circ}C$  por  $ft^2$ ) lo cual causa una disminución. La disminución del nivel de salmuera por un período de 3 días (esta en la tabla IV C.)

COMPARATIVOS DE TEMPERATURAS DE SUPERFICIE Y DISMINUCION DE NIVELES EN SALINERAS NATURALES DEL MAR - PUERTO COLORADO S Y SIN COLOREAR.

- NATURAL
- COLOREADA
- ⊙ VELOCIDAD DEL VIENTO



- $a_n, v_n$  Coeficiente y diferencia de fase (en segundos de tiempo) respectivamente del  $n$ -ésimo término de una serie de fourier expresada en cosenos solamente.
- $B$  - Presión barométrica en mm de Hg.
- $C_s, C_{ss}$  - Capacidades caloríficas de salmuera y sal respectivamente referidas a volumen unitario --- cal cm<sup>3</sup> C.
- $E, E_{12}, E_{24}$  - Evaporación en gr/cm<sup>2</sup> para 1, 12 y 24 horas -- respectivamente, para superficies libres grandes.
- $E_{24}^v$  - Evaporación gr/cm<sup>2</sup> para 24 horas en vasijas pequeñas.
- $F$  - Coeficiente de evaporación gr/cm<sup>2</sup> sec mmHg en la ecuación 3.
- $\kappa_{ss}$  - Coeficiente de transferencia de calor de sal --- cal/cm<sup>2</sup> sec°C.
- $k_1$  - Coeficiente de absorción de salmuera con respecto a la base e.

- $k(w)$  - Coeficiente de transferencia de calor de salmuera aire cal/cm sec $^{\circ}$ C.  
 $I_0$  - Radiación solar incidente cal/cm sec.  
 $I$  - Radiación que llega al fondo del recipiente -- cal/cm $^2$  sec.  
 $n$  - Cualquier real.  
 $n_B$  - Índice de refracción de la salmuera.  
 $P_B$  - Presión de vapor de la salmuera mm Hg.  
 $P_A$  - Presión parcial del vapor de agua en el aire - mm Hg.  
 $S$  - Número de segundos en un día.  
 $t$  - Tiempo en segundos.  
 $T_A, T_B, T_S$  - Temperaturas del aire, salmuera y suelo respectivamente  $^{\circ}$ C.  
 $w$  - Velocidad del viento en el suelo Km/h.  
 $Z_B, Z_{SA}$  - Profundidad de la salmura y capa de sal respectivamente cm.  
 $\gamma_c$  - Angulo crítico de la salmuera en grados.  
 $\lambda$  - Longitud de onda de la radiación solar A.  
 $\lambda_w$  - Calor latente de evaporación de agua cal/gr.  
 $\phi, \phi'$  - Angulos de incidencia y refracción respectivamente en grados.

## C A P I T U L O V

### CONCLUSIONES

El aprovechamiento y captación de energía solar en superficies de agua libres a la atmósfera se ve afectada entre otros factores por perturbaciones y movimientos de onda en la superficie del agua, y por una característica inherente de las soluciones que es la absorbitividad, la que varia para diferentes longitudes de onda de luz y que va a definir la magnitud de la longitud de la trayectoria que sigue un haz de luz a travez de un volúmen dado de agua.

Esta longitud de la trayectoria es función del tiempo y de los solutos en suspensión.

La distribución de temperaturas en un volúmen de agua, debida a una radiación solar aprovechada es función de las propiedades térmicas de la solución, alrededores del sistema, y de los movimientos internos de agua debidos a diferencias de densidades de un sitio a otro.

La temperatura e incrementos de la misma en un volúmen dado de agua expuesto a la atmósfera es afecta-

da y esta formada por contribuciones que son: radiación solar absorvida en el fondo de la alberca, radiación solar absorvida en el cuerpo o masa de agua de la alberca, calor disipado en el fondo, calor disipado a la atmósfera, temperatura inicial de la masa de agua. En base a estas variables se puede conocer aproximadamente el aumento de temperatura debido al flujo total de energía solar y la variación de la misma debido a variaciones de tiempo, hora, etc. (componentes sinusoidales) del flujo total de energía.

Para grandes valores de tiempo la temperatura en la alberca tiende a ser independiente de la profundidad de la alberca y entonces la temperatura de la salmuera depende solo de las propiedades térmicas de la alberca en cualquier punto donde  $x < h$  (en cualquier punto que este entre la superficie y el fondo de la alberca).

La contribución de la temperatura inicial ( $T_e$ ) a la temperatura total ( $T(x,D)$ ) disminuye con el tiempo y cuando  $D \rightarrow \infty$  (tiempo infinito) desaparece.

Teóricamente toda energía debida a radiación que llega al fondo de la salmuera se disipa (o pierde)

a la temperatura en el fondo ( $t_w$ ) y entonces la alberca se calienta solo por la energía solar absorbida por el volúmen de agua.

Las variaciones de la temperatura media en la salmuera tienen gran dependencia en una zona convectiva -- considerada en el fondo de la salmuera, del tamaño de ésta y del movimiento de la misma a través de el fondo de la salmuera. Cabe aquí hacer la semejanza de ésta zona a la zona convectiva que se presenta en las paredes de un tubo por el cual fluye un líquido, la caída de temperaturas es grande y la conductividad térmica baja, evitándose el adecuado intercambio de energía.

La variación de temperaturas horal se puede detallar más y profundizar más considerando las propiedades térmicas de la salmuera y alrededores.

La estabilidad térmica de la alberca (mantener una temperatura ó perfil de temperaturas constante durante un lapso de tiempo determinado), depende de la estabilidad del movimiento vertical de la salmuera y del gradiente de concentraciones vertical mismo que actúa como captador y almacenador de energía solar incidente en una superficie de agua.

La radiación solar puede causar un considerable aumento de temperatura en albercas de 1 m. de profundidad con una zona convectiva en el fondo.

La eficiencia de la alberca como un colector de energía solar es mayor del 20% y mas o menos el 4% de la energía incidente se puede convertir por medio de un ciclo de Carnot a otro tipo de energía. La alberca se mantiene como un sistema no convectivo cuando existe un gradiente de temperaturas, con la temperatura mayor en el fondo y la menor en la superficie, generado por un gradiente de concentración de sal que asegura la mayor densidad de las regiones bajas.

La transferencia de masa destruye el efecto de absorción de energía ya que genera transferencia de calor. Las ondas en la superficie del agua, el movimiento horizontal de la zona convectiva en el fondo (disipa líquido caliente), la evaporación en la superficie del agua (aumenta la concentración y la densidad de la solución en la superficie), y la expansión térmica de la salmuera, son todas perturbaciones que afectan el perfil de densidades.

La evaporación de salmueras saturadas coloreadas e incoloras en profundidades de 8 a 27 pulgadas se midió

para determinar la influencia de la profundidad de la salmuera y concentración de colorante sobre la rapidéz de evaporación.

La adición del verde de 2 naftol a profundidades de 8 pulgadas aumentó la evaporación considerablemente Si se añade suficiente colorante para causar absorción completa de energía solar la evaporación no de pende de la profundidad de la salmuera.

La variación diaria de la temperatura de la salmuera (TB) depende de la profundidad de la salmuera y la amplitud de la variación aumenta cuando aumenta la profundidad.

Si el coeficiente de evaporación es constante la -- temperatura promedio de la salmuera es constante y la evaporación depende solo de la temperatura y no de la profundidad.

En soluciones de poca profundidad expuestas a la at mósfera con una capa brillante de sal en el fondo - hay considerable perdida de radiación por reflexión

### Usos y Aplicaciones.-

El presente estudio de un Sistema de Concentración - de Salmueras, enfoca su uso hacia todo lo que tenga que ver con evaporación aprovechando la Energía Solar.

El estudio se hace de una manera general del fenómeno de la evaporación enfocando algunos casos particulares más comunes en cuanto a condiciones del medio ambiente para que por medio de parámetros o variables fácilmente medibles se pueda conocer y mejorar la función de algún sistema encargado de evaporar alguna solución.

La presente tesis, aunque inspirada en el evaporador solar llamado "El Caracol" que se encuentra ubicado en la planta de Sosa Texcoco S.A., no pretende estudiar el caso específico de como mejorar, o si trabaja bien o mal éste evaporador, si no que la información que se encuentra en éste estudio sirva para dictaminar o mejorar las condiciones de trabajo de éste evaporador solar, siendo de ésta forma uno de tantos usos (que se mencionan posteriormente) que se darían al tema.

En la introducción se expone el motivo del tema mismo que caba aquí señalar, "Versatilidad de Tema", implica diversidad de usos y aplicaciones siendo un tema tan actual.

Dentro de los usos inmediatos se pueden señalar:

1.- El poder calcular las libras de agua que se evaporan en cualquier volúmen de agua expuesto a la intemperie, ya sea por hora o por pie cuadrado de superficie que éste volúmen de agua presenta al aire libre. Se lee sencillo pero lo difícil de éste cálculo reside en poder calcular estas pérdidas de agua - en base a variables facilmente medibles como lo son La temperatura de bulbo seco del lugar, la temperatura de la solución, la presión de vapor del agua a la temperatura de bulbo seco, la presión de vapor del agua a la temperatura de la solución a evaporar. Todas estas cantidades posibles de conocer con solo tener un termómetro a la mano, y conociendo la expresión final que relaciona estas variables calcular el agua que se evapora de un sistema dado.

2.- Purificación de agua negra salada o agua de mar. Poder determinar en un momento dado el tamaño (longi

tud y espesor) de algún recipiente o lago artificial para evaporar agua a su máxima rapidez para posteriormente por medio de alguna placa de choque juntar el vapor y así obtener agua pura, como ejemplo de esto se tiene la planta de purificación de agua de mar que esta en Mexicali, en esta planta aparte de funcionar evaporadores de multiple efecto en serie, tienen charcas expuestas al sol, arriba de las cuales se colocan campanas de vidrio inclinadas por donde baja el vapor a un conducto central que va a dar finalmente a un tanque almacen (Información obtenida en el Centro de Investigación de Materiales U.N.A.M.).

3.- Generación de Vapor.

4.- Captación y acumulación de Energía Solar.

El capítulo III versa sobre la manera en que por medio de la conservación de un gradiente de concentración de sal (no necesariamente cloruro de sodio) se puede almacenar Energía Solar en forma de calor hasta un cierto límite. Este almacenamiento de energía en salmueras de cierto tipo ¿para que sirve?. Sirve para que en cualquier proceso de cualquier planta se pueda disponer de una manera económica y "rápida" de un flu

ido de calentamiento con un alto poder calorífico. La palabra "rápida" en el párrafo anterior se puso - entre comillas para hacer resaltar que la rapidez de este calentamiento depende del diseño de la charca o por que no, de un tanque, diseño en cuanto a propiedades físicas de la solución y alrededores.

#### 5.- Concentración de Salmueras.

El capítulo IV contiene información de la forma en - que las variables del medio (temperaturas, humedad, velocidad del viento, etc.), las variables intrínsecas de la solución (absorvitividad, densidad, viscosidad, capacidad calorífica, etc.) y las variables - que se pueden controlar (profundidad del recipiente, color de la solución, forma del recipiente, concentración de la sal, etc.) actúan sobre la evaporación y la concentración de salmueras para en base a un estudio comparativo poder en un momento dado hacer que un sistema de concentración de salmueras por evaporación solar funcione optimamente.

De esta manera poder amortizar costos de evaporación o concentración en algún proceso donde el evaporador sea una etapa indispensable.

Los usos en general son variados y se han discutido y mencionado los mas inmediatos de aplicación, sin embargo no se puede descartar usos mas sofisticados como son:

cocinas solares

aire acondicionado

turbinas de vapor

termo electricas

motores de vapor etc.

## B I B L I O G R A F I A

- I.- Solar Evaporation of Salt Brines  
Industrial and Engineering Chemistry  
Vol. 43 No. 7  
Pags. 1544 - 1554  
Bloch, Farkas and Splegler.
- II.- How to calculate heat, Water Losses  
Chemical Engineering 8 - VIII - 1960.  
Pags. 128 - 132
- III.- The Physics of the Pond Solar.  
Solar Energy  
The Journal of solar energy science and  
engineering.  
Abril - Junio 1964  
Pags. 45 - 55
- IV.- Enciclopedia de Tecnología Química Kirk - Othmer:  
Energía Solar.  
Pags. 917 - 939

V.- Carslaw and Joeger

"The conduction of heat in solids"

Capítulo III.

Pags. 139 - 160.

VI.- Physical - Review

Marzo 1974

Pags. 75 - 93

VII.- Heat Transmission

William H Mc. Adams

Radiant - Heat Transmission

VIII.- Unit Operations of chemical Engineering.

Warren L. McCabe

Capítulo III

IX.- Process Heat Transfer

Donald Q. Kern

Capítulos I a V

Pags. 1 - 85