

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA

SISTEMAS DE GENERACION DE POTENCIA A PARTIR DE LA
ENERGIA SOLAR POR MEDIOS TERMODINAMICOS

T E S I S

Para obtener el título de Ingeniero Químico

Presenta:

ALFREDO FLORES GÓMEZ

1 9 8 3



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

INDICE GENERAL

Pág.

CAPITULO I

1.1	INTRODUCCION	1
1.2	ANTECEDENTES HISTORICOS.....	5
1.3	FUNDAMENTOS	8

CAPITULO II

2.1	SISTEMA DE CONVERSION INDIRECTA.....	10
2.2	DESCRIPCION GENERAL.....	14
A)	Subsistema Concentrador.....	14
1.	Colectores Planos.....	14
	Concentradores.....	21
2.	Concentradores sin seguimiento del sol.....	22
3.	Concentradores con seguimiento de sol.....	29
a)	De foco lineal.....	30
b)	De foco puntual.....	38
B)	Subsistema de generación de fuerza eléctrica.....	46
	Ciclo Rankine.....	46
	Ciclo Brayton.....	49
	Ciclo Brayton con Regeneración.....	50
	Ciclo Stirling.....	51
C)	Subsistema de Almacenamiento de Energía.....	54
	Químico-Termal.....	55
	Físico.....	58
	Localización del subsistema del almacenamiento.....	59
D)	Subsistema de Control.....	62
	Mecanismo de Seguimiento Solar.....	67

Para concentradores de foco lineal.....	67
Para concentradores de foco puntual.....	69

CAPITULO III

3.1 PROTOTIPOS SOLARES PARA GENERAR FUERZA ELECTRICA.....	74
Torre Central.....	75
Disco Parabolóide.....	92
Parabólico Lineal.....	95
Otros.....	97
3.2 PANORAMA COMPARATIVO ENTRE LAS FUENTES DE ENERGIA MAS UTILIZADAS.....	100
3.3 CONCLUSIONES.....	104

CAPITULO IV

PARTE EXPERIMENTAL

Tanque de almacenamiento Térmico.....	106
Indice de la parte experimental.....	107

CAPITULO V

CONCLUSIONES FINALES.....	210
BIBLIOGRAFIA.....	211

CAPITULO I

1.1 INTRODUCCION

En la actualidad el consumo de energía en el mundo va en aumento, cada día crece la población, la tecnología se amplía y la demanda de energéticos se hace más grande.

Los recursos de energía con que se cuenta actualmente, al no ser renovables y debido al gran crecimiento del consumo energético, están en un proceso de extinción.

El hombre está abusando de sus fuentes orgánicas de energía de las que tanto depende hoy en día; carbón, petróleo, madera, desechos, etc., tanto que se han hecho estimaciones en base a datos actuales del crecimiento del consumo energético, llegando a la conclusión que las reservas de hidrocarburos se agotarán aproximadamente en 20 años (año 2002), con una declinación muy profunda de la producción de hidrocarburos antes de que se agoten totalmente dichas reservas.

Por lo que tenemos que buscar y hacer uso de nuevas fuentes de energía e iniciar la substitución de los energéticos no renovables por estas fuentes de energía.

La energía solar, energía que nos llega diariamente en grandes cantidades, ha despertado una inquietud mundial para ser utilizada como un reemplazo de los recursos no renovables.

La luz solar incide sobre el planeta en cantidades tales, que en sólo dos días, los Estados Unidos, reciben tanta energía como el total de sus reservas de combustibles fósiles, pero el problema es aprovecharla.

Se están desarrollando varios dispositivos que permiten el aprovechamiento de energía solar, como por ejemplo las llamadas Células Fotovoltaicas las cuales utilizan el efecto fotovoltaico para la conversión directa de energía solar a energía eléctrica, o bien para la conversión de la luz solar en calor por medio de los llamados concentradores, los cuales concentran los rayos solares en un punto por medio de espejos o lentes, lográndose alcanzar temperaturas desde algunos grados arriba del ambiente, hasta temperaturas de 3000°C.

Estos dispositivos están siendo utilizados para fines domésticos e industriales aunque no a gran escala comercial, porque aun no pueden competir económica y eficazmente, con los sistemas convencionales de producción de energía eléctrica y calorífica, pero en un futuro próximo se superará esta desventaja.

Dentro de los usos de estos dispositivos están:

- 1) Calentamiento de agua.

- 2) Acondicionamiento en general.
- 3) Hornos solares.
- 4) Producción de vapor y gas a altas temperaturas.
- 5) Conversión termodinámica de calor en energía mecánica y electricidad.
- 6) En la industria química para: Destilación, Refrigeración, Secado, -- Evaporación, Cristalización, Metalurgia, etc. .

En el presente trabajo se explican las diferentes formas de transformar la energía radiante en calor mediante sistemas logrados hasta ahora, -- así como la conversión del calor en electricidad, es decir, el proceso de transformar la energía radiante en calor, ésta en mecánica y finalmente en electricidad por medios termodinámicos.

Por otro lado, actualmente, el calentamiento de agua por medio de la -- energía solar utilizando colectores, está ampliándose en el mercado.

En dichos colectores el agua absorbe la energía solar en forma de ca-- lor y eleva su temperatura, después se envía hacia tanques forrados -- con fibra de vidrio u otro material aislante térmico, en donde queda -- almacenada hasta que se requiera de su utilidad.

En los tanques a pesar de estar forrados con aislante térmico, se pre-- sentan pérdidas de calor durante el período de almacenamiento (noche, -- días nublados, etc.), por lo que al final de esta tesis se describe -- una parte experimental sobre la llamada "Estratificación en tanques de almacenamiento térmico", la cual consiste en formar dentro del tanque

zonas a diferente temperatura, una caliente en la parte de arriba y una fría en la parte inferior del tanque, para que, el calor, una vez almacenado se difunda de la parte más caliente hacia la parte más fría, es decir, la difusión ocurre dentro del mismo tanque, en vez de difundirse hacia el exterior como ocurre cuando el tanque se encuentra a una sola temperatura (tanque no estratificado).

En resumen; el objetivo de estratificar un tanque, es el de minimizar - más las pérdidas de calor que ocurren en un tanque de almacenamiento y alcanzar un mayor tiempo de almacenaje.

ALFREDO FLORES GOMEZ

1.2 ANTECEDENTES HISTORICOS

Desde la antigüedad, la Energía Solar se ha venido aprovechando, aunque no en gran escala. De acuerdo con algunos datos históricos, el primer experimento de cierta importancia práctica parece haber sido la construcción de una Central de Destilación Solar hace aproximadamente un siglo, en el Desierto del norte de Chile.

Desde el siglo XVII se viene experimentando con el uso de espejos y lentes para producir altas temperaturas; concentrando la radiación solar con el fin de fundir metales o simplemente para guisar.

Incluso es posible que los Griegos conocieran este sistema; cuentan que Arquímedes prendió fuego a la flota Romana en Siracusa, con la ayuda de espejos.

En 1882 Mouchot y Pifre en París hicieron una demostración pública de su máquina solar de vapor que hacía funcionar una pequeña imprenta en la que imprimían periódico.

El norteamericano de origen sueco: John Eriesson (inventor del barco blindado Monitor) construyó una máquina de vapor movida por Energía Solar, con una potencia de 2.5 c.v., utilizando un espejo cóncavo de 5 -

metros de diámetro, que expuso en el Edo. de Nueva York en el año de --
1970.

En los años 1900 Frank Shuman construyó varias máquinas solares como: -
Un enorme reflector de 11 metros de diámetro, construido de pequeños es-
jos planos y movido por un mecanismo de relojería; una máquina en la --
cual empleaba los llamados "Colectores Planos" que consisten en su for-
ma más simple en una lámina plana de metal negro cubierta de una o más
capas de cristal o plástico transparente dejando un espacio de aire en-
tre el metal y el cristal o plástico, estos colectores suministraban va-
por (ya que se calentaba agua hasta vaporizarla dentro de ellos) a una
máquina que fue utilizada en el bombeo de agua para irrigación; y con la
ayuda de Boys, construyó una gran Central Solar en Meadi, cerca del Cai-
ro en Egipto utilizando 572 espejos concentradores móviles en forma para-
bólica, utilizándolos para calentar depósitos de agua, de un número - -
igual de máquinas de vapor para bombear agua del Río Nilo.

En el año de 1918, J.A. Harrington hizo funcionar una máquina de vapor
con un colector concentrador, utilizando la energía para bombear agua -
a un depósito alto almacenándola, así obteniendo energía potencial, de
este modo, se pudo superar los problemas ocasionales por la naturaleza
intermitente, de la radiación solar, y la consiguiente necesidad de dis-
poner de algún tipo de almacenamiento de energía durante las noches y -
en períodos nublados.

Entre los años 1920 y 1950 se desarrolló muy poca cosa sobre el campo -

de la energía solar.

En los años 30's se vino la introducción del comercio de los calentadores solares de agua para uso doméstico, sobre todo en Florida y California, en esta época Godfrey L. Cabot donó un fondo de 6 000 000 de dólares destinados a la investigación sobre la energía solar, con los que se han instalado una serie de casas experimentales con calefacción solar construidas por el Massachusetts Institute of Technology desde 1939.

Desde 1941 a 1946 F. Morelos se dedicó a desarrollar máquinas solares de vapor, y como consecuencia de sus investigaciones se construyeron en Tashkent una serie de reflectores parabólicos con diámetro de hasta 10 metros que suministraban energía a maquinaria de fabricación de hielo y de Refrigeración.

A partir de los años cincuentas, el interés por la investigación sobre la energía solar ha crecido interrumpidamente.

Debido a la crisis mundial de energéticos sufrida en el año de 1973, numerosas Universidades, Escuelas Politécnicas e instituciones, han aumentado y redoblado sus esfuerzos para el desarrollo de otras fuentes de energía entre las que sobresale la energía solar.

Los sistemas solares termodinámicos, tomaron un fuerte impulso a su desarrollo principalmente durante la década de los 70's principalmente, en E.U.A., Francia, Alemania, Italia, Israel, Australia y la URSS.

1.3 FUNDAMENTOS

Para convertir la radiación solar en energía eléctrica de una forma aprovechable, existen básicamente 2 tecnologías.

A). Conversión directa.- La radiación solar se convierte de un solo paso a energía eléctrica, utilizando el efecto fotovoltaico de algunos materiales, el cual básicamente es el desprendimiento de un electrón cuando un fotón de la luz del sol con suficiente energía es absorbido por el material.

B). Conversión indirecta.- Basada en convertir la luz del sol en energía calorífica, después en mecánica y esta última en energía eléctrica a través de un proceso termodinámico que bajo condiciones ideales es un proceso de Carnot.

El proceso de conversión indirecta presenta varias desventajas y ventajas sobre la tecnología de conversión directa, porque además de operar en climas cálidos y soleados requieren de una fuente de refrigeración (agua, aire, frío) junto a su fuente de calor, mientras que los de conversión directa, operan a temperatura ambiente e incluso en climas fríos.

Pero tienen la ventaja de ser más económicos en la generación de potencia. Es decir, los de conversión indirecta producen mayor energía a un menor costo que los de conversión directa, debido al costo tan alto de

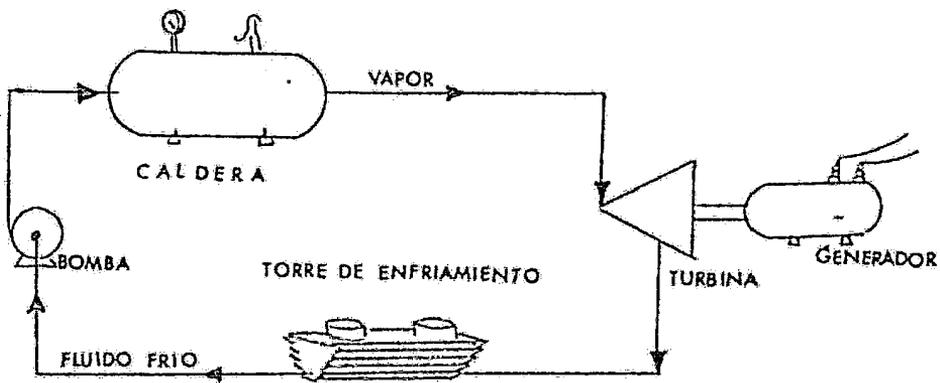
la producción de materiales con efecto fotovoltaico llamadas células fo
tovoltáicas.

En lo que respecta a este trabajo sólo nos enfocaremos a los Sistemas -
de CONVERSION INDIRECTA.

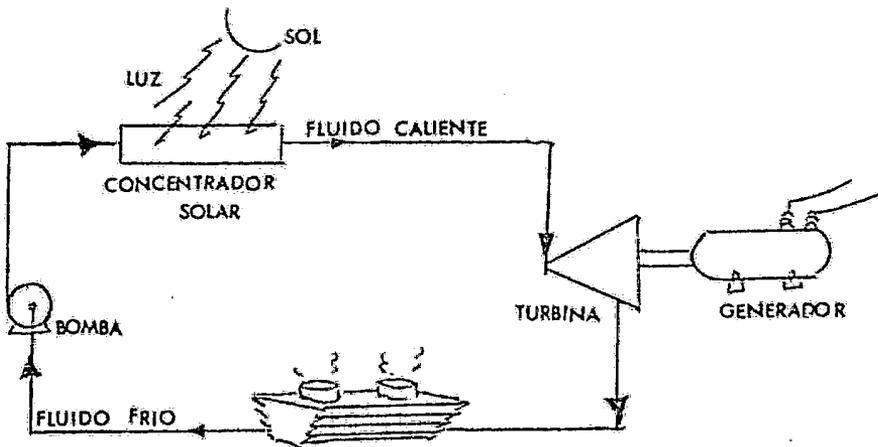
CAPITULO II

2.1 SISTEMA DE CONVERSION INDIRECTA

Las partes que integran principalmente a los sistemas de conversión indirecta, son prácticamente las mismas que forman a una planta generadora termoeléctrica convencional, es decir:



ELEMENTOS DE UNA PLANTA TERMOELECTRICA CONVENCIONAL



ELEMENTOS DE UNA PLANTA GENERADORA SOLAR

El funcionamiento de una planta termoeléctrica a grandes rasgos, es calentar y evaporar un líquido (agua) a temperaturas y presiones altas, el cual se pasa hacia una turbina donde se expande generando un trabajo que se aprovecha para mover un generador y producir electricidad.

El fluido expandido se enfría en un condensador, y se manda de nuevo por medio de una bomba, a la caldera para calentarse de nuevo y repetir el ciclo continuamente.

Las plantas generadoras de potencia a partir de la energía solar tienen el mismo principio; evaporar un fluido que producirá un trabajo en la turbina, que será utilizado para generar electricidad por medio del generador.

La diferencia está en la unidad de generación de vapor, ya que en las termoeléctricas se utiliza una caldera, mientras que en los sistemas de generación solar utilizan concentradores, los cuales transforman la radiación solar en energía calorífica.

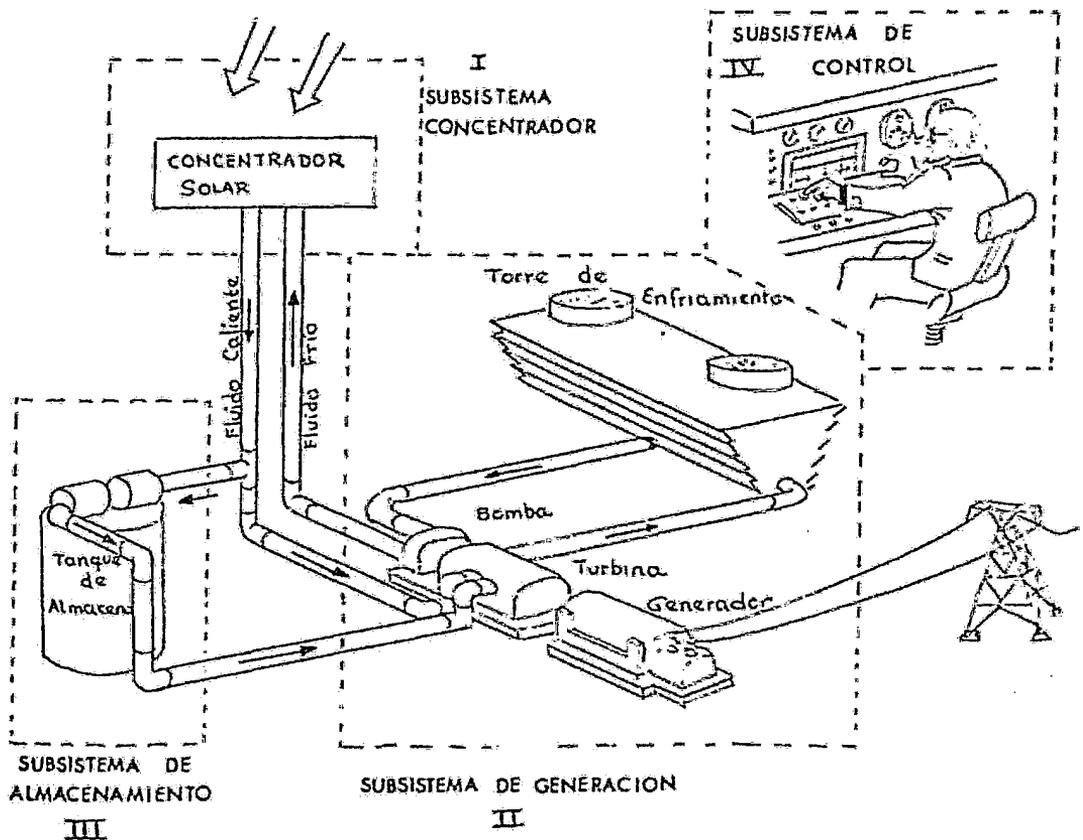
En las calderas, se produce calor en una forma continua, día y noche, a base de la combustión de un material combustible, por lo que es un proceso continuo.

Mientras que en los concentradores, la producción de calor está basada en la captación de luz solar, por lo que se producirá calor mientras se tenga luz solar, es decir, sólo en el día, en la noche dejan de fun

cionar, haciendo que el proceso no sea continuo.

En otras palabras sólo producirán electricidad mientras se tenga luz solar, y eso sólo es en el día. Esto es una gran desventaja que se está tratando de disminuir, por medio de los llamados almacenamientos solares, los cuales almacenan parte de la energía producida o recibida durante el funcionamiento de la planta, y durante la noche se utiliza esa energía almacenada, haciendo al proceso un poco más continuo y eficiente.

Un diagrama más completo de los sistemas de conversión indirecta de energía solar es el que se muestra a continuación:



En el subsistema concentrador se transforma la energía radiante del sol en energía calorífica, la cual es absorbida por un fluido llamado "fluido de trabajo", que se eleva a una temperatura determinada.

El fluido calentado, es el que va a efectuar un trabajo en la turbina, la cual mueve un generador para producir electricidad.

Los cambios de energía presentados son; de energía radiante a energía calorífica por medio del concentrador, de energía calorífica a energía mecánica por medio de la turbina, y de ésta a energía eléctrica por medio del generador.

Los fluidos de trabajo a calentar, dependen de los concentradores utilizados (como se verá más adelante), es decir, dependen de la temperatura alcanzada así como la potencia a generar, por lo que se utilizan generalmente:

- 1) Aceites orgánicos.
- 2) Sales o compuestos inorgánicos.
- 3) Aire.
- 4) Agua.
- 5) Etc.

A continuación describiremos ampliamente las principales partes y por separado, de una planta generadora de electricidad a partir de la energía solar de conversión indirecta.

2.2 DESCRIPCION GENERAL

A. Subsistema Concentrador

Este subsistema como se vió anteriormente, tiene por objeto convertir la luz radiante del sol en energía calorífica, y para su estudio los hemos dividido en tres tipos.

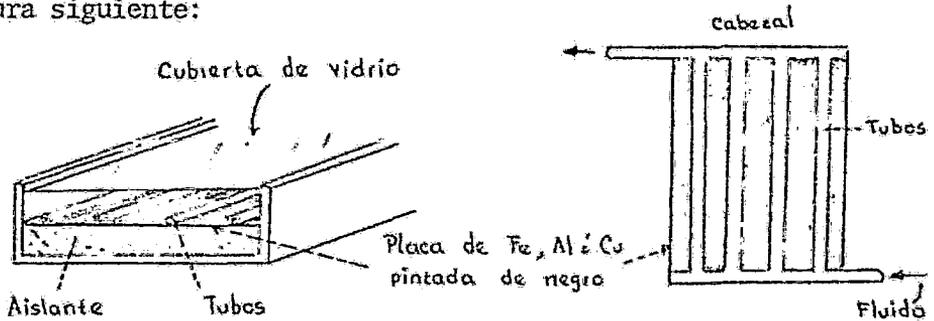
- 1) Aquellos que operan sin concentración, llamados colectores o captadores planos.
- 2) Los que operan a concentraciones medianas, llamados concentradores estacionarios.
- 3) Los de alta concentración, llamados concentradores de enfoque con seguimiento de sol.

1. COLECTORES O CAPTADORES PLANOS

Los colectores o captadores planos son de los más sencillos tanto en su construcción como en su funcionamiento, además de que operan sin concentración, por lo que son económicos. Pero solamente se obtienen temperaturas relativamente bajas, desde algunos grados arriba de la temperatura ambiente hasta temperaturas de 100°C.

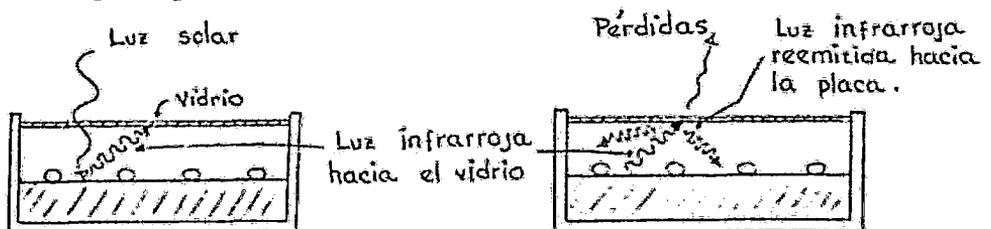
Básicamente consta de una delgada placa de Cu, Al ó Fe, pintada de color negro, que tiene las propiedades de un cuerpo negro (absorbe y emite la luz del sol en un alto grado), en contacto con ella están unos duc

tos o tubos de Cu, Fe ó Al por donde circula el fluido de trabajo, sobre la placa se encuentra una cubierta de vidrio o plástico transparente, colocados en una especie de caja de madera, aluminio o cualquier otro material recubierto en su interior con aislante térmico, como se muestra en la figura siguiente:



Cuando la luz del sol entra a través del vidrio e incide sobre la placa negra, ésta la absorberá e incrementará su temperatura. Parte de esa energía absorbida es transferida al fluido de trabajo que circula dentro de los tubos el cual se irá calentando más y más, otra parte de la energía se refleja de la placa negra hacia el vidrio en forma de luz infrarroja (calor).

Pero como la luz infrarroja es de una energía mayor y de menor longitud de onda, y el vidrio ordinario que es relativamente transparente para la luz visible, pero no para la luz infrarroja, la reemitirá otra vez hacia el cuerpo negro es decir:



En realidad no toda la luz infrarroja es reemitida de nuevo hacia la -- placa, sino que parte logra pasar a través del vidrio y se pierde, la - que es reemitida hacia el interior es absorbida de nuevo por la placa - negra, que se va calentando más y más acumulándose de esta manera el ca lor, a este efecto se le llama efecto invernadero.

Por otro lado, una vez que la radiación solar llega a la placa es impor tante que se quede atrapada en la misma en la mejor medida posible, por eso es necesario que se cubra a la placa con sustancias de alta absor- tividad y al mismo tiempo de baja emisividad llamadas superficies selec- tivas, es decir, las pinturas negras comunes presentan alta absorptivi- dad; pero su emisividad también es alta, las superficies selectivas en cambio además de absorber en alto grado la radiación, reducen las pérdi- das por radiación infrarroja.

Dichas superficies se obtienen a base de combinar algunos metales con - óxidos, los cuales se depositan en finas películas sobre la superficie deseada.

Las propiedades de algunos metales se muestran en la tabla siguiente:

<u>Capas</u>	<u>Absorción Solar α</u>	<u>Emisión Solar ϵ</u>	<u>Relacion de Funcionamiento α/ϵ</u>
Tungsteno Dentrítico	0.96	0.26	3.7
Silicio sobre plata	0.76	0.06 (773°K)	12.0
Niquel Negro	0.90	0.08 (573°K)	11.0
Cromo Negro	0.98	0.19 (573°K)	5.1
Cromo Negro/N. Bri- llante	0.93	0.19 (573°K)	4.8
Zr Ni/Ag	0.85	0.03 (600°K)	24.0

El calor útil o aprovechable dado por el colector a un cierto tiempo, - será la diferencia entre la cantidad de energía solar absorbida, por la placa negra y las pérdidas de energía hacia los alrededores que presenta dicho colector, es decir:

$$Q_u = F_R A I_T \tau \alpha - F_R A U_L (T_1 - T_a)$$

$$Q_u = F_R A \left[I_T (\tau \alpha) - U_L (T_1 - T_a) \right]$$

Donde:

- Q_u = Es la velocidad de calor útil entregada por el colector
Watt , Btu/hr
- A = Area del colector m^2 , ft^2
- F_R = Es un factor de eficiencia del colector.
- I = Es la velocidad a la cual la radiación solar incide sobre la superficie del colector por unidad de area (W/m^2 , $Btu/hr-ft^2$).
- τ = Es la transmisividad solar de la superficie transparente (vidrio o plástico).
- α = Es la absorptividad solar de la placa negra.
- U_L = Es el coeficiente de pérdidas de calor del colector.
 $W/^\circ C m^2$, $Btu/hr - ^\circ F ft^2$
- T_i = Es la temperatura del fluido entrante al colector ($^\circ C$, $^\circ F$).
- T_a = Es la temperatura ambiente exterior ($^\circ C$, $^\circ F$).

La radiación incidente se mide frecuentemente por medio de un piranómetro el cual se coloca con la misma inclinación que el colector, para medir la radiación real que incide sobre el mismo.

Cuando no se cuente con datos de radiación, el calor entregado por el colector puede calcularse en base al gasto del fluido de trabajo que circula dentro de los tubos, o sea:

$$Q_u = A G C_p (T_i - T_o)$$

Donde:

G = Es la velocidad de flujo maciso del fluido a través del colector por unidad de área.

C_p = Capacidad calorífica del fluido.

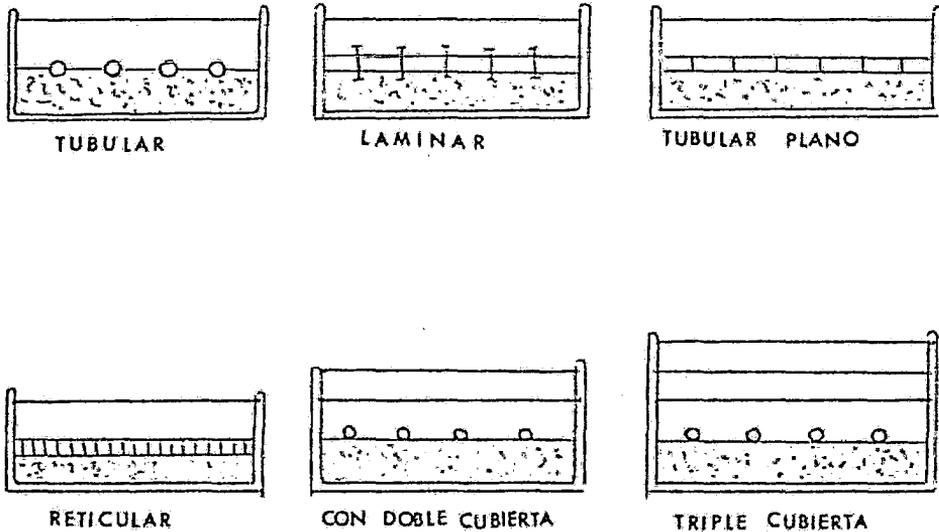
T_o = Temperatura del fluido a la salida del colector

Generalmente los resultados de pruebas de colectores son dados en términos de eficiencia la cual está dada por la ecuación:

$$\eta = \frac{Q_u}{A I}$$

Se han venido desarrollando diferentes diseños de colectores para lograr un máximo aprovechamiento de la energía solar presentando cada uno ventajas y desventajas con respecto a los otros.

Algunos tipos de esos colectores se muestran en corte a continuación:

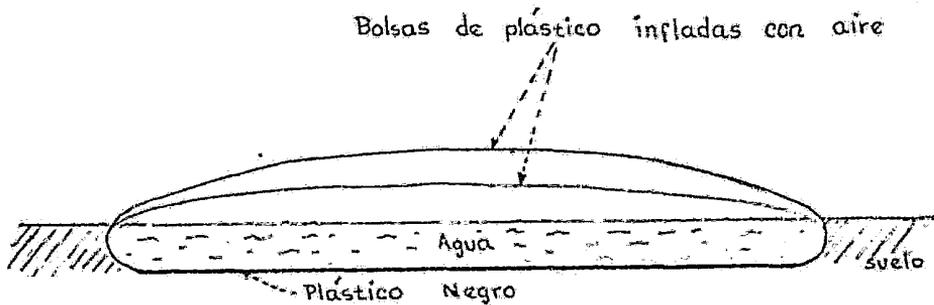


Algunos colectores vistos en corte transversal

El material utilizado para la placa debe ser un buen conductor del calor, para transmitirlo a los tubos donde circula el fluido a calentar, por lo que generalmente se utilizan placas delgadas de mm de espesor de Cu, Al, o Fe pintadas de negro, para absorber y transmitir el calor hacia el tubo que también es de cobre.

La placa transparente es vidrio o plástico (para abaratar) pero el plástico tiene la desventaja de perder su transparencia y propiedades ópticas con el tiempo.

El colector laguna solar es otro tipo de colector simple que se basa en la evaporación de agua por medio de la concentración de calor empleando el efecto invernadero, el siguiente esquema nos muestra este tipo de colector.



COLECTOR LAGUNA SOLAR

Es un tanque poco profundo de $60m \times 5m \times 0.1m$, en el fondo del tanque se encuentra un plástico cubierto de una superficie selectiva la cual absorbe los rayos solares pero no deja escapar por conducción el calor hacia el suelo es plástico el cual no es conductor del calor.

Las bolsas de plástico son transparentes las cuales dejan entrar la radiación solar pero no dejan escapar el calor, el cual se va acumulando más y más provocando evaporación en el agua.

LOS CONCENTRADORES

Un concentrador es aquel que aumenta o concentra la radiación solar sobre una superficie absorbadora.

A diferencia de los colectores planos que sólo absorben la radiación -- que llega a la placa plana, los concentradores absorben una mayor cantidad de energía porque contienen dispositivos que reflejan o refractan la radiación solar hacia el absorbador, de tal manera que cada uno refleja o refracta una cantidad de energía que aumenta la cantidad total recibida por el absorbador.

Ahora, para lograr que los dispositivos estén siempre reflejando o refractando los rayos solares hacia el absorbador, se les adaptan dispositivos de enfoque, con movimiento seguidor solar.

Es decir, conforme el sol avanza durante el trayecto del día, los dispositivos también se mueven, de tal manera que siempre los rayos reflejados o refractados son mandados en dirección del absorbador (el funcionamiento de estos dispositivos se verá más adelante).

Antes de seguir es necesario mencionar algunas definiciones para una mejor comprensión de los concentradores solares.

- 1) Razón de concentración. Se define como el cosiente entre el área de apertura colectora al área del absorbedor.
- 2) Area de apertura. Es el área del captador (espejo o superficie reflectiva, lente, etc.) que intercepta la radiación solar para enviarla hacia el absorbedor.
- 3) Area del absorbedor. Es el área total que recibe la radiación con centrada enviada por el captador.
- 4) Angulo de aceptación. Es la amplitud de la zona angular dentro de la cual es captada la radiación solar por el absorbedor.

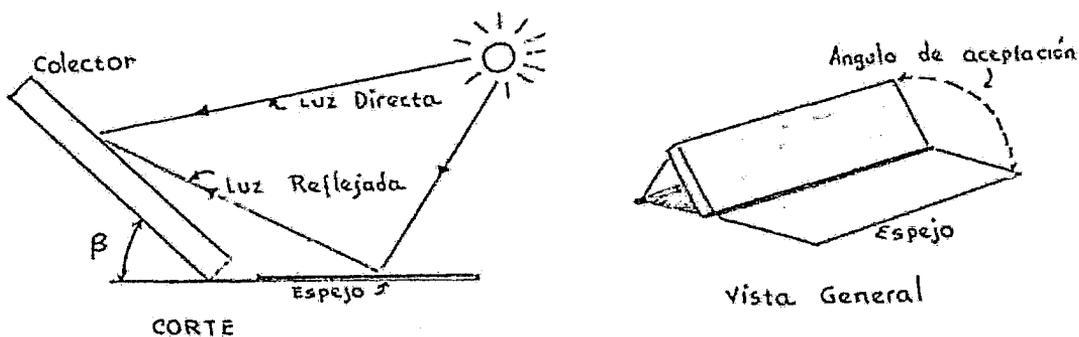
2. CONCENTRADORES ESTACIONARIOS SIN SEGUIMIENTO DE SOL

Son aquellos dispositivos que alcanzan concentraciones mayores de 1 y - menores de 10 y temperaturas entre 100 y 200°C no requieren de un seguimiento de sol muy preciso, salvo de un ajuste ocasional a lo largo del año.

El diseño de estos sistemas es relativamente sencillo y es a base de aditamentos y/o curvaturas simples.

Con el fin de obtener un mejor aprovechamiento de los ángulos de aceptación se orientan en la posición Este-Oeste (E-W), ajustándose una vez al día.

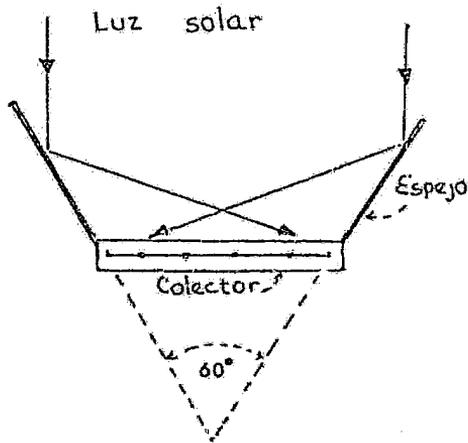
Dentro de los más simples tenemos a los formados por colectores planos como se muestra en la figura siguiente:



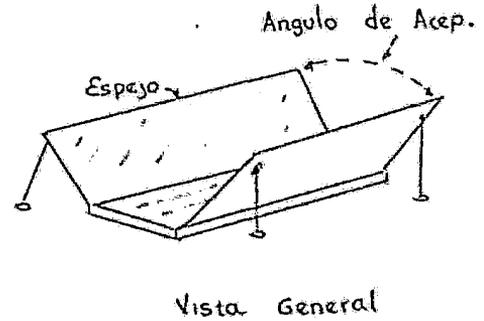
Consiste en un colector inclinado en un ángulo β (según se requiera) el cual recibe la radiación solar en forma directa más la radiación que es reflejada por un espejo horizontal de igual área al colector, lo que -- significa que el absorbente (placa negra) recibirá mayor radiación du-- rante el transcurso del día.

Con este tipo de concentrador se alcanzan concentraciones ligeramente -- arriba de 1, pero tiene un gran ángulo de aceptación, es decir, en cual-- quier posición del sol, los rayos llegarán a la placa del absorbedor.

Se puede ir aumentando el número de espejos de tal manera que la radia-- ción que incide sobre ellos se refleja hacia el absorbedor, por ejemplo, un colector con dos espejos como se muestra en la figura siguiente:



Corte Frontal



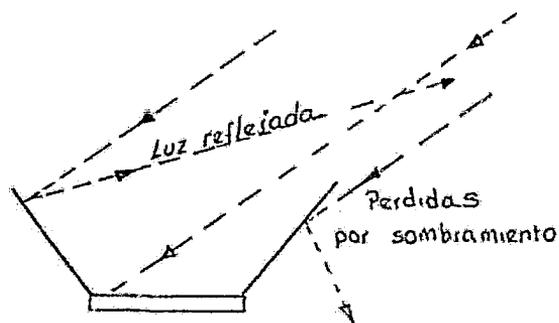
Vista General

Se alcanzan concentraciones arriba de 1 hasta 5 y temperatura arriba de los 100°C .

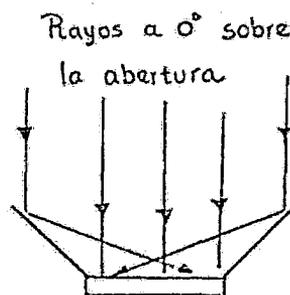
Lo que significa que los espejos aumentan la eficiencia del colector, ya que la placa negra, además de recibir la luz directamente recibirá adicionalmente la reflejada por los espejos que son de su misma área.

A medida que se aumentan los espejos en este tipo de concentradores estacionarios, aumenta la concentración en el absorbedor, pero disminuye el área de captación, es decir a medida que el sol realiza su movimiento aparente durante el día, el ángulo de los rayos incidentes sobre los espejos y el colector irá variando, ocasionando diferentes concentraciones de flujo solar sobre el colector, de tal manera que la máxima concentración sólo se tendrá cuando el sol esté exactamente sobre la abertura de los espejos y los rayos incidan con un ángulo de 0° .

Cuando el sol no esté sobre la abertura de los espejos, los rayos incidirán con diferentes ángulos, ocasionando pérdidas por reflexión o sombreado de los espejos, como se muestra a continuación:

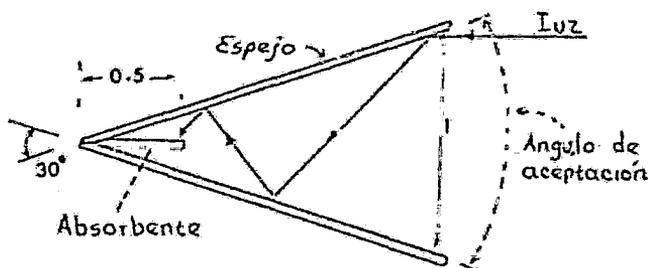


Pérdidas por reflexión y sombreado

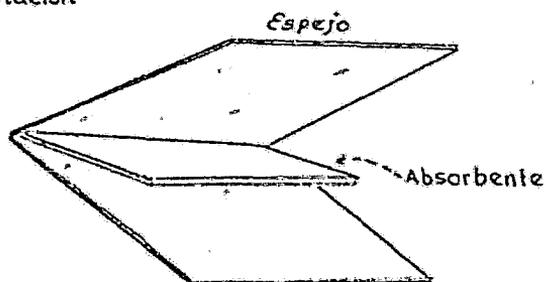


Máxima concentración

Se han desarrollado variantes en torno a los concentradores anteriores, como es el concentrador tipo "V", el cual consta de 2 espejos planos en forma de V, que reflejan la luz incidente sobre un absorbente (que no es un colector) por el cual fluye el líquido a calentar, como se muestra a continuación.



corte transversal



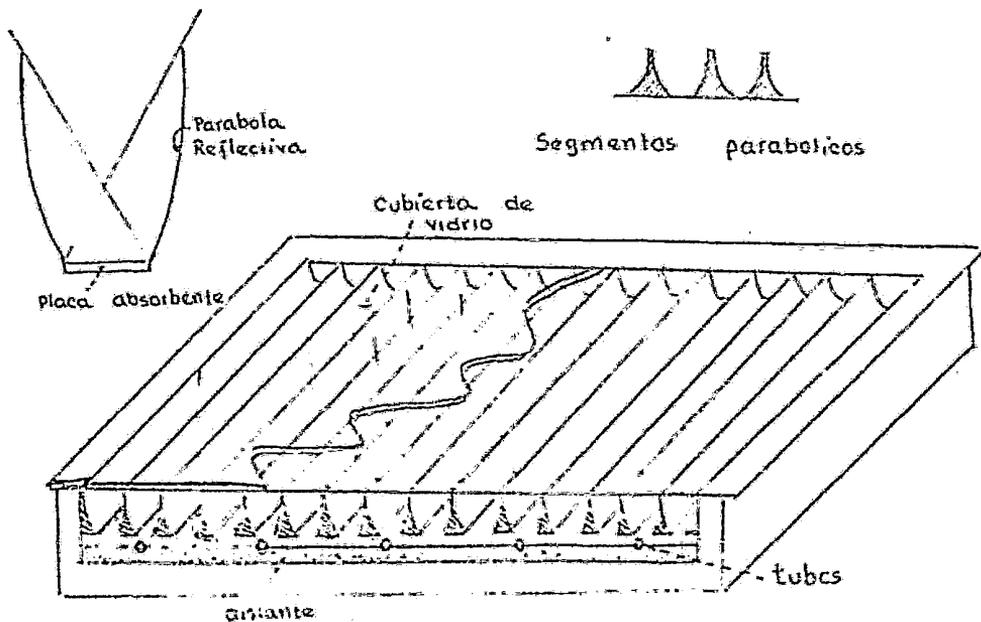
vista General

Para elevar la eficiencia de dicho concentrador, se extiende un poco -- más la longitud del absorbedor con el fin de captar los rayos incidentes de ángulos diferentes, al cambiar la posición del sol.

Para alcanzar la concentración máxima posible en los concentradores estacionarios, se han desarrollado concentradores parabólicos compuestos (CPC), los cuales están formados por 2 segmentos parabólicos simétricamente, colocados alrededor de un eje, donde el foco de cada uno se localiza al final de la superficie absorbidora y en puntos opuestos a la parábola.

Estos concentradores llamados "Winston" se orientan en la posición Este-Oeste, para un máximo aprovechamiento de luz solar.

El ángulo de aceptación está dado por el ángulo formado entre cada eje de las parábolas; como se muestra a continuación:

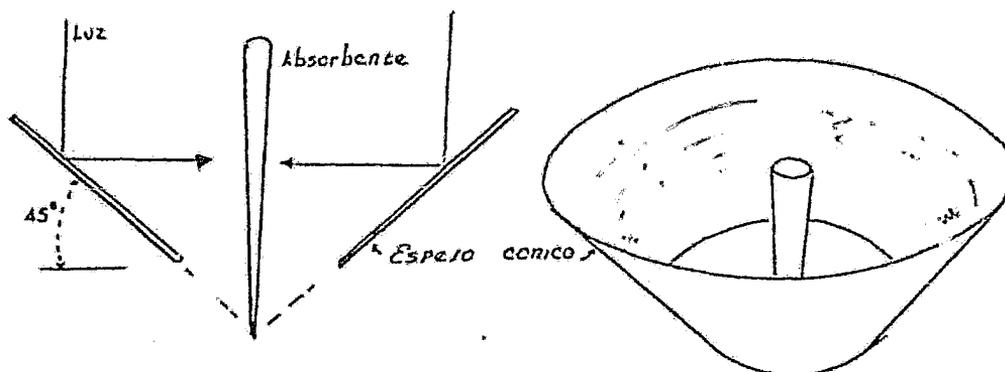


Módulo concentrador de varios segmentos parabólicos

Para aumentar la capacidad, se instalan varios p neles compuestos de estos concentradores, los cuales calentarn la superficie absorbedora que transmitir su calor a tubos por donde circula el fluido de trabajo, y para aumentar la eficiencia se cubren con una superficie transparente para efectuar el efecto invernadero y aumentar el calor dentro de la superficie absorbedora.

Existen concentraciones alcanzadas con estos sistemas cercanas a 10 y temperaturas hasta de 180°C.

También se han desarrollado concentradores c nicos como se muestran en la figura siguiente:



Los espejos o espejo ensamblado está inclinado 45°, de tal manera que la luz incidente se concentrar  en el absorbedor, con este sistema se alcanzan concentraciones mayores de 10 pero presenta la dificultad de la geometría del cono, ya que debe (para tener una máxima eficiencia) tener una geometría óptima, para que todos los rayos incidan sobre el absorbedor y no haya pérdidas.

Existen problemas al usar espejos, de pérdidas por reflexión, es decir, no existen materiales ópticos prácticamente que reflejen totalmente la luz que les llega, sino sólo el 85% de la luz incidente es reflejada, la otra es perdida por absorción y difusión en el material.

También se presentan pérdidas por el factor forma y se deben a la conservación de una buena geometría en la construcción de cilindros parabólicos.

Por eso para obtener una reflexión y forma óptima se requiere de un cierto cuidado, el cual acarrea costos. Por lo que estos concentradores son a medida que aumenta su eficiencia más caros.

3. CONCENTRADORES DE ENFOQUE CON SEGUIMIENTO DE SOL

En los concentradores sin seguimiento o estacionarios se obtiene la mayor concentración cuando el sol está exactamente sobre la abertura del captador solar, incidiendo los rayos con un ángulo de 0° , después conforme el sol avanza, los rayos inciden con ángulos diferentes provocando pérdidas.

Los concentradores con seguimiento de sol se van moviendo conforme se mueve el sol para que los rayos solares siempre incidan con un ángulo de 0° , sobre la apertura, o bien para que los rayos siempre incidan sobre el absorbedor.

Para lograr ésto, se adaptan dispositivos de seguimiento solar que mueven a los espejos o el absorbente de tal manera que los rayos reflejados siempre caen sobre el absorbedor.

Con estos sistemas se alcanzan concentraciones de 10 a 300 y temperaturas de $200-2000^\circ\text{C}$, dependiendo de la precisión del mecanismo de seguimiento solar.

Existen dos tipos de concentradores de enfoque con seguimiento solar; - y son:

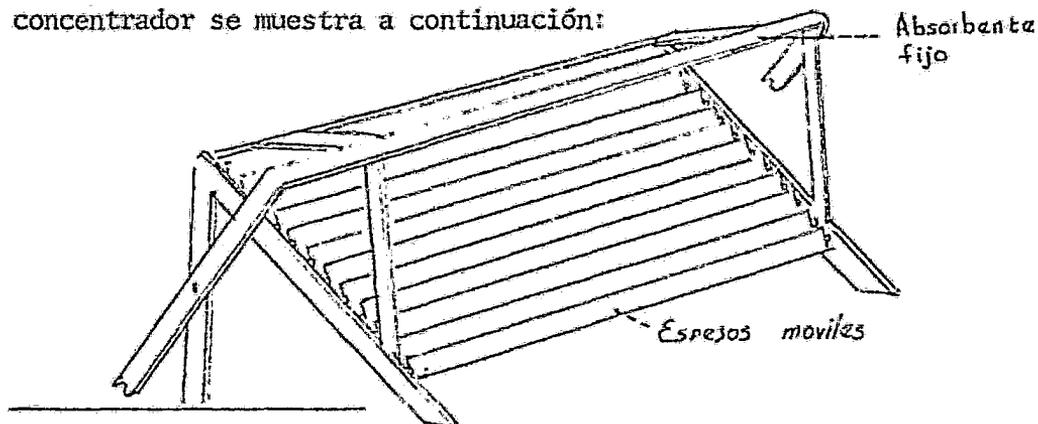
- 1) Concentradores con foco lineal.
- 2) Concentradores con foco puntual.

CONCENTRADORES CON FOCO LINEAL

En este tipo de concentradores, el absorbente por donde fluye el líquido de trabajo es lineal, por lo que el movimiento de seguir el sol lo hacen de forma lateral sobre un solo eje, alcanzando concentraciones de 15 a 50 y temperaturas de 200-350°C.

Dentro de este tipo tenemos a los concentradores de espejos móviles -- (CSEM) en donde tiene un gran número de espejos alargados en forma de tablillas montados sobre un soporte inclinado, según la latitud del lugar, para aprovechar en lo más posible cualquier posición del sol.

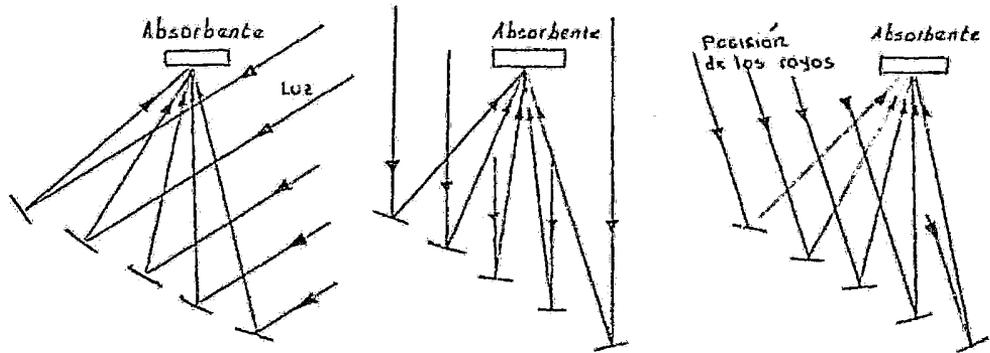
El absorbedor también es alargado aproximadamente de la misma área de los espejos*, colocado a una altura focal de los espejos para que cada uno de ellos refleje los rayos del sol hacia él, un esquema de este -- concentrador se muestra a continuación:



* En realidad los espejos son de una anchura menor a 1 cm. que el ancho del absorbente, para evitar pérdidas y economizar.

Cada espejo contiene un dispositivo de seguimiento de sol para mantener siempre los rayos reflejados hacia el absorbedor-fijo durante el transcurso del día, como se muestra a continuación:

Posición de los espejos a diferentes horas



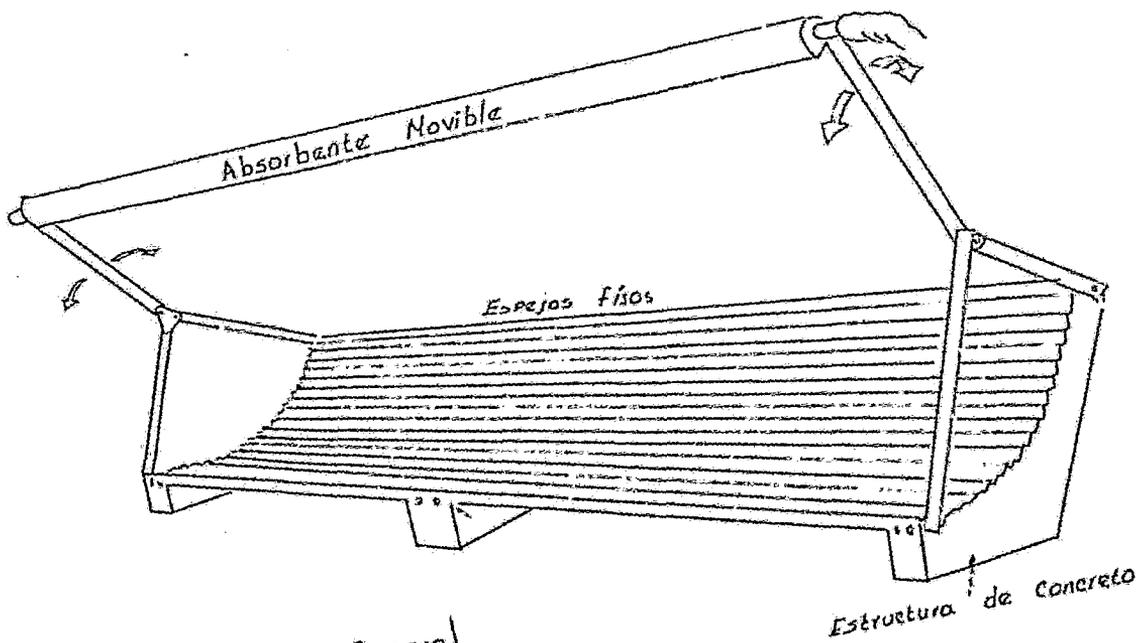
Las concentraciones alcanzadas son de 15 a 50 y temperaturas entre --- 200°C y 350°C, se pueden construir unidades grandes.

Una variante al concentrador de espejos móviles es el concentrador de espejos fijos (CSEF), en el que el absorbedor es el que se mueve.

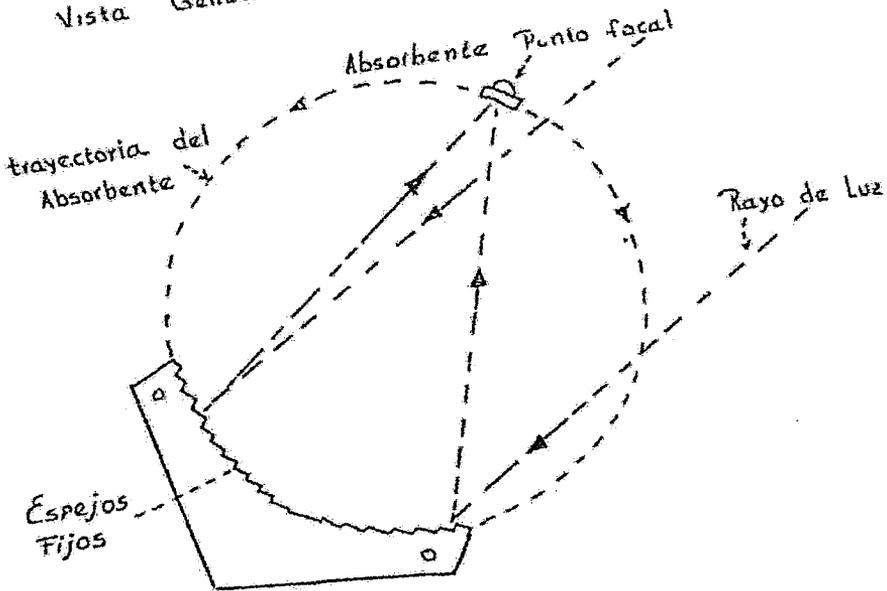
Los espejos están ensamblados en una estructura prefabricada de concreto o de fierro que tiene la forma esférica y en cuyo foco se encuentra el absorbedor.

A medida que se mueve el sol, los espejos reflejan la luz hacia el punto focal que se irá moviendo para que siempre incidan sobre él los rayos reflejados.

Una figura de este colector se muestra a continuación:

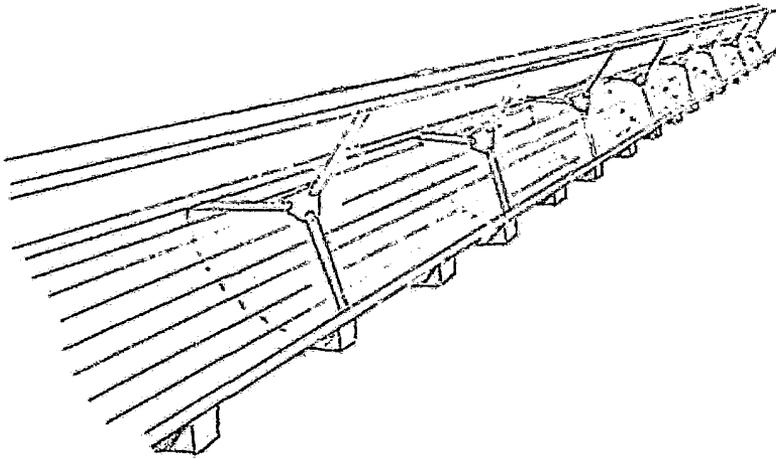


Vista General



Vista transversal del Concentrador de Espejos fijos

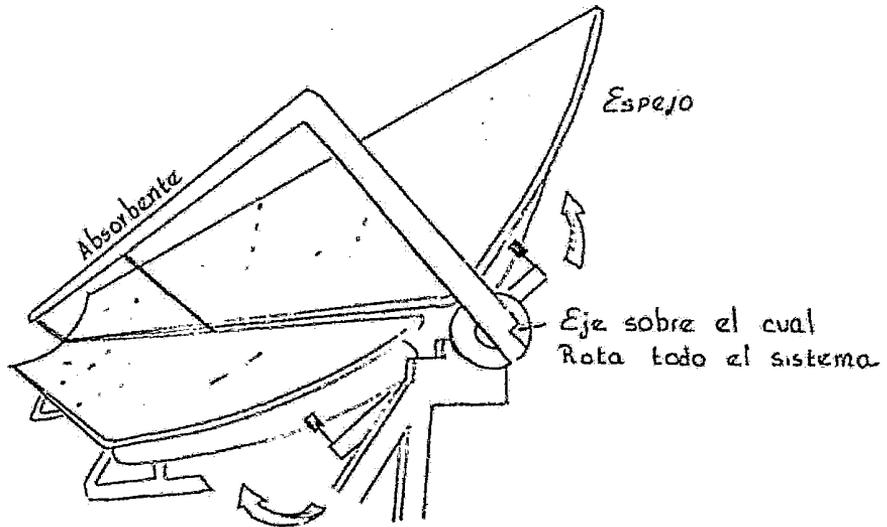
Para aumentar la capacidad de estos concentradores se forman baterías (concentradores colocados en serie o paralelo) en vez de fabricar un concentrador de grandes dimensiones que presentaría muchos problemas, permitiendo así formar centrales de energía de cualquier tamaño como se muestra a continuación:



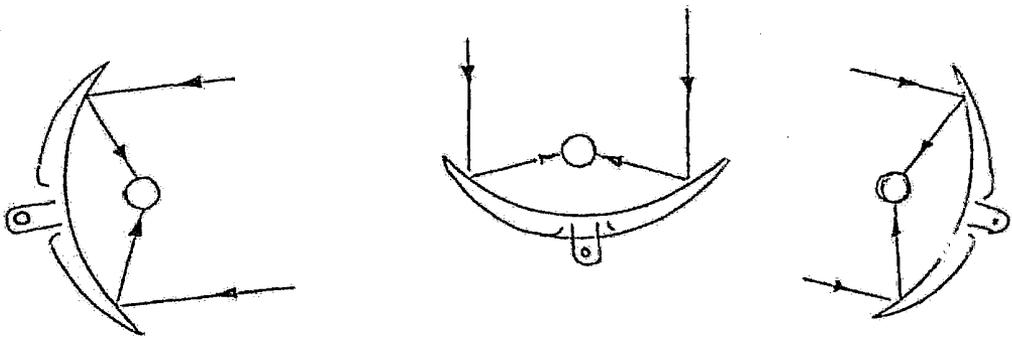
bateria de concentradores de
Espejos Fijos

Se han desarrollado un tipo de concentradores llamados concentradores solares cilindro parabólico (CSCP), el cual consta de unos espejos colocados de tal manera que adquieren la forma de una parábola, y en cuyo foco se encuentra el absorbedor, la parábola es alargada, lo mismo que el absorbedor.

El absorbente y los espejos están integrados en uno, de tal modo que al ir siguiendo el sol gira todo el sistema tanto absorbedor como la parábola de espejos, permitiendo un mayor y mejor aprovechamiento de los rayos reflejados sobre el tubo absorbedor durante todo el día. Un diagrama de este concentrador es el siguiente:



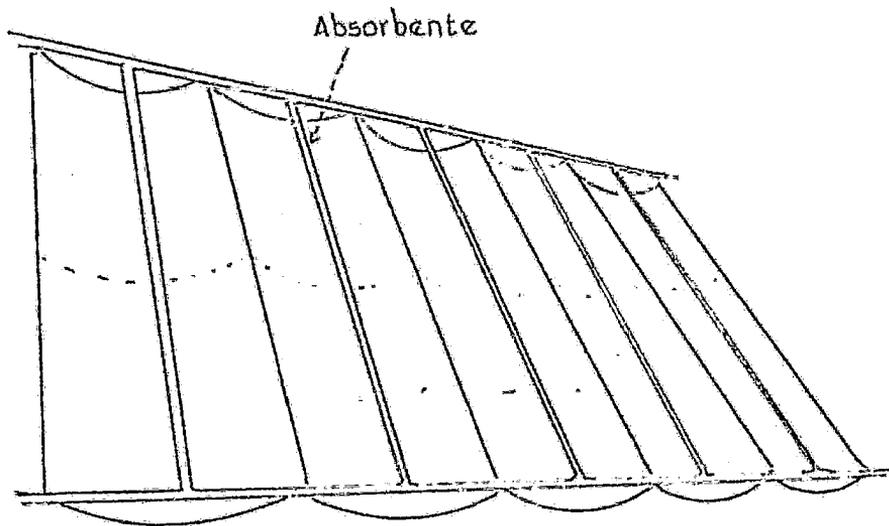
Concentrador cilindro Parabolico



Movimiento del concentrador para lograr que siempre los rayos caigan con un ángulo de 0° sobre la apertura, logrando una mayor concentración durante todo el día.

Para aumentar la capacidad de estos concentradores se instalan en serie o paralelo, evitando así construir grandes parábolas que tendrían el -- problema de usar materiales de gran resistencia a los vientos, así como un sistema de seguimiento solar más potente.

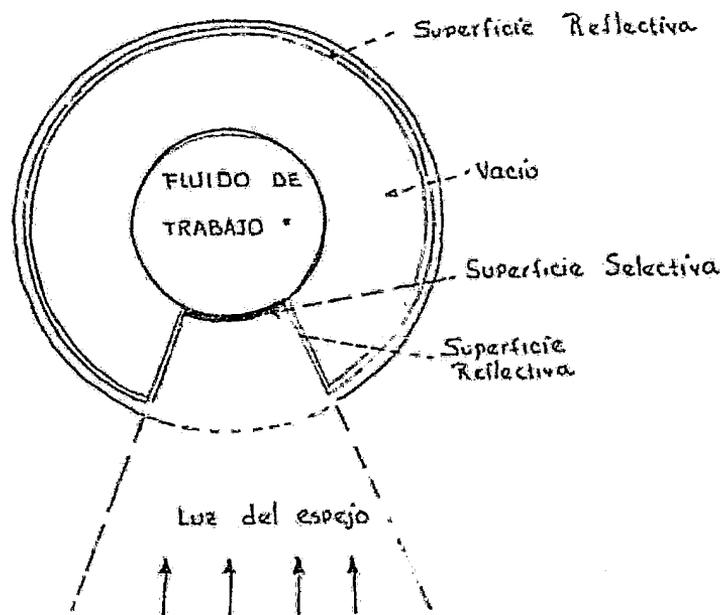
Estos sistemas también tienen la ventaja de colocarse en forma verti-- cal, para lugares en donde su latitud lo requiera formando sistemas en serie o paralelo como se muestra a continuación:



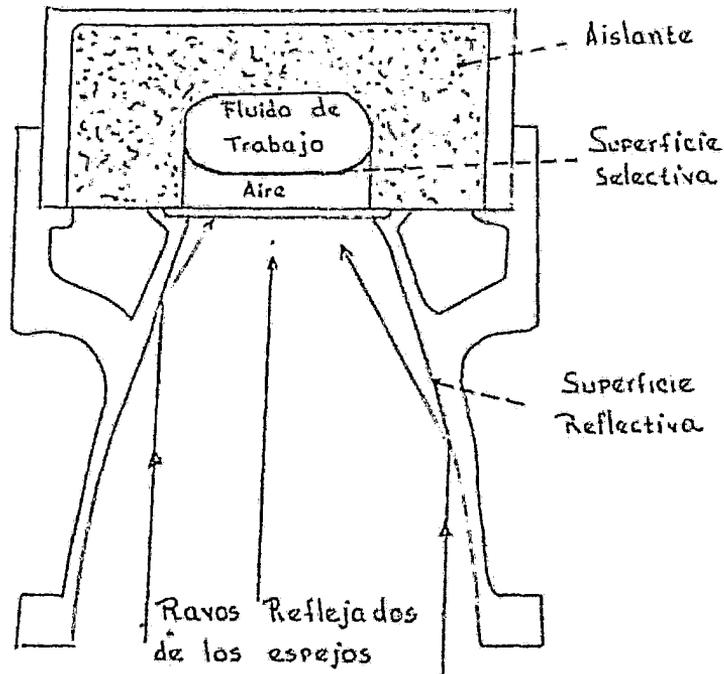
Bateria de concentradores cilindros Parabolícos colocados verticalmente

En este tipo de concentradores con foco lineal el absorbedor por donde circula el fluido, debe de presentar la mayor capacidad de absorción y menor posibilidad de pérdidas de calor por lo que algunos sistemas utilizan absorbedores muy sofisticados.

Como aquel que para minimizar las pérdidas de calor por conducción a lo largo del tubo receptor negro, se coloca a éste dentro de otro tubo a vacío (en el vacío se disminuye la conducción), y las pérdidas por radiación mediante una superficie reflectiva, como se muestra a continuación.



o bien, aislándose de la parte que no necesita estar en contacto con los rayos reflejados como:



Claro, mientras más sofisticado sea el sistema más eficiente será, pero es más antieconómico por lo que el óptimo requerido dependerá de - las condiciones ambientales así como de las posibilidades económicas con que se cuente.

CONCENTRADORES CON FOCO PUNTUAL

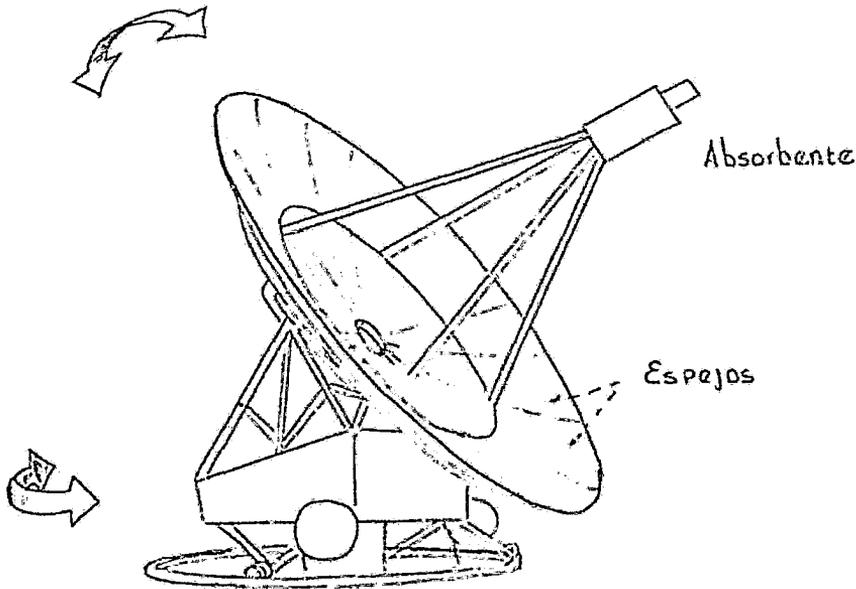
Estos concentradores mantienen prácticamente los rayos reflejados en una área puntual, a diferencia de los concentradores con foco lineal que reflejan los rayos sobre el área del absorbedor que es una línea.

Por lo que los concentradores con foco puntual alcanzan concentraciones arriba de 50 hasta 3600 y temperatura de 500°C a 3000°C, asimismo, requieren de un seguimiento diario solar muy preciso, para mantener la reflexión sobre una área determinada y de una curvatura compuesta más precisa.

El seguimiento de sol se hace en dos direcciones (como se verá más adelante mecanismo de seguimiento solar) conforme avanza el sol en el día y conforme cambia en cada estación cada tres meses, por lo que a medida que se aumenta la concentración se hacen más complicados los sistemas y a veces antieconómicos.

Dentro de los principales concentradores de foco puntual está el paraboloide de revolución, el cual es un espejo en forma de casuela, sostenido por una estructura de hierro en cuyo foco del paraboloide se encuentra el absorbedor donde está circulando el fluido.

Un esquema de este tipo de concentrador es el siguiente:



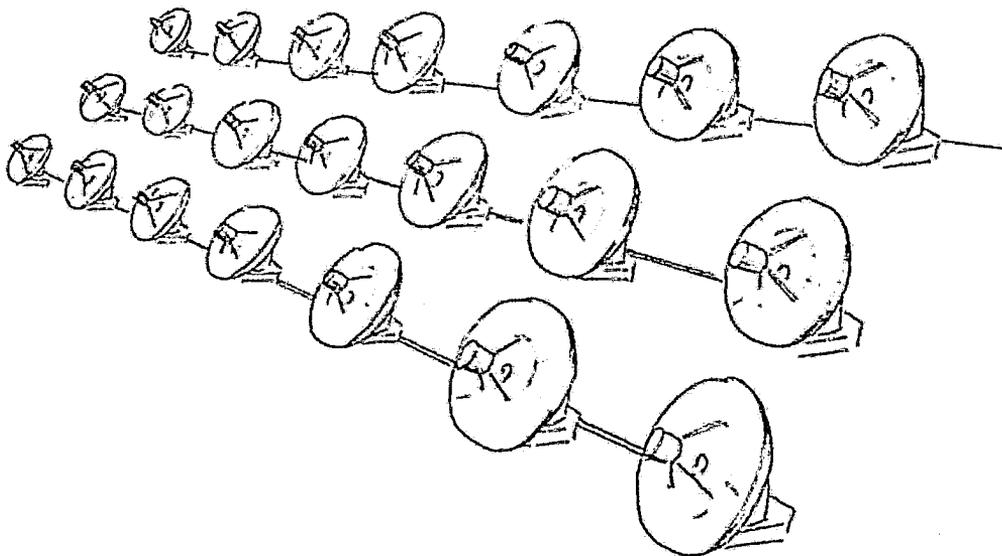
Concentrador Paraboloide de Revolución

Se alcanzan concentraciones de 1600 a 3600 y temperaturas de 500 a ---
2000°C, presenta algunos problemas de imperfecciones en la curvatura -
para lograr una total reflexión en la misma área.

Estos concentradores tienen la característica de tener el más alto ren-
dimiento de todos los concentradores porque evitan las pérdidas del --
 $\cos \theta$ ya que la reflexión es puntual y siempre está orientada de tal -
forma que los rayos solares entran paralelamente sobre la abertura de
la superficie reflectiva.

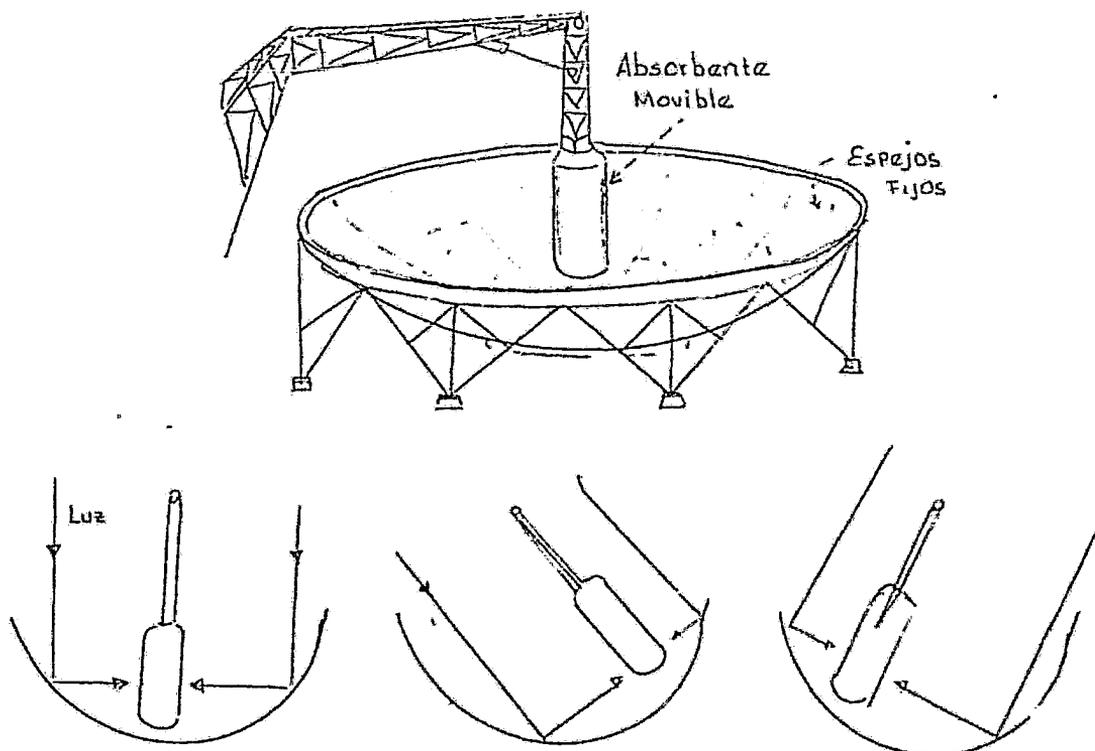
También presentan la propiedad de ensamblarse entre varios colectores
en serie o en paralelo, formando centrales de energía de cualquier --
tamaño.

Sería antieconómico fabricar un colector de grandes dimensiones por el costo del soporte que debería soportar el gran peso de la parábola además de resistir la fuerza del viento. Así como el gran mecanismo necesario para mover el reflector parabólico para ir siguiendo el sol, un esquema de una estación es el siguiente:



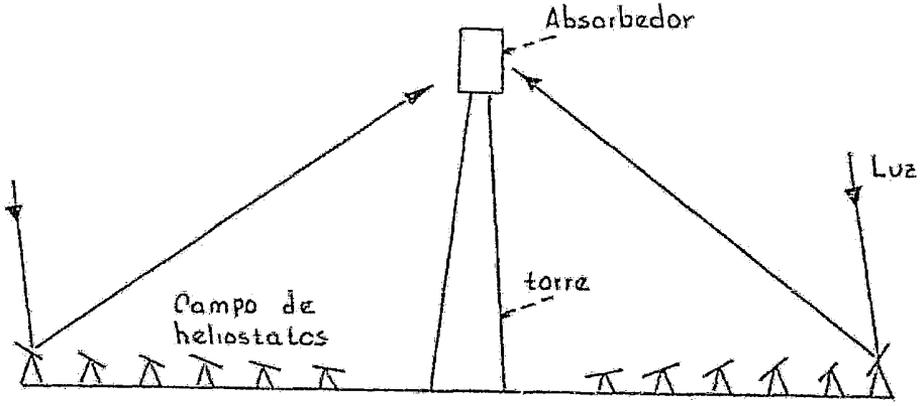
Los sistemas concentradores esféricos con absorbedor móvil son otro tipo de estos concentradores de foco puntual, en los cuales el absorbedor es el que se mueve sobre los espejos en forma de una cúpula boca arriba, consiguiendo así un enfoque sobre el absorbedor durante todo el día.

Un esquema de estos concentradores se muestra a continuación:



Los espejos son fijos instalados sobre el suelo o en ocasiones bajo el nivel del suelo, teniendo la ventaja de que se pueden construir unidades grandes, en estos sistemas se reducen grandemente las pérdidas de calor que ocurren al transportar el fluido caliente, así como el costo de instalación y bombeo del mismo, ya que los arreglos de otros tipos de concentradores (como se vió), para aumentar la capacidad consisten en muchos colectores pequeños ya que no se pueden construir unidades grandes, por lo que sufren pérdidas térmicas y mecánicas al transportar los fluidos de trabajo.

El sistema que está siendo desarrollado actualmente para generar altas potencias es el sistema concentrador solar torre central, el cual se muestra a continuación:



Concentrador torre Central

La cual consta de una torre, en donde se encuentra el absorbedor a lo alto, rodeado de espejos llamados heliostatos, cada uno colocados de tal manera que reflejan la luz del sol sobre el absorbedor, los heliostatos tienen mecanismos cada uno, de seguimiento de sol sobre dos --- ejes, permitiendo así un mayor enfoque sobre el absorbedor.

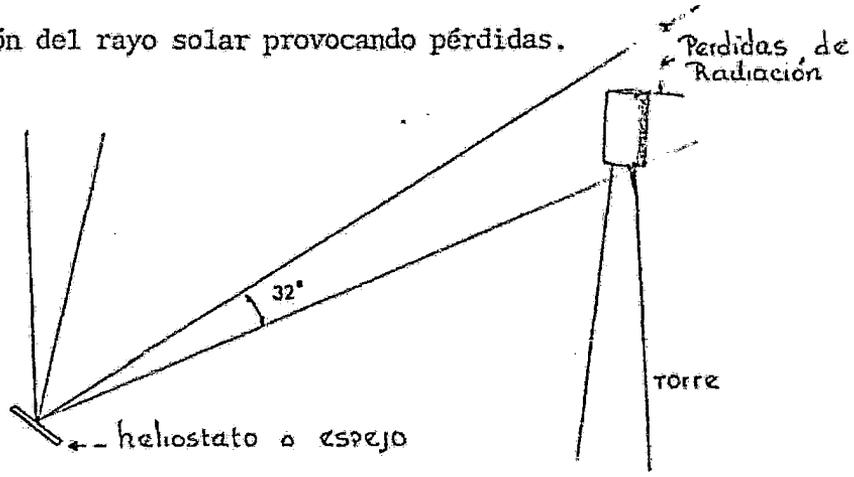
Se alcanzan concentraciones máximas de 3000 y temperaturas entre 500°C y 2000°C, también presenta la ventaja de no tener instalaciones de tubería como en otros concentradores, reduciéndose así las pérdidas de calor al transportar el fluido de trabajo.

La desventaja es su gran costo, debido a la gran cantidad de heliostatos que utiliza, así como que cada uno de ellos utiliza un mecanismo de seguimiento solar que son relativamente costosos, además de que el material para construir la torre es de cemento armado o bien de hierro sólido, para el peso del absorbedor.

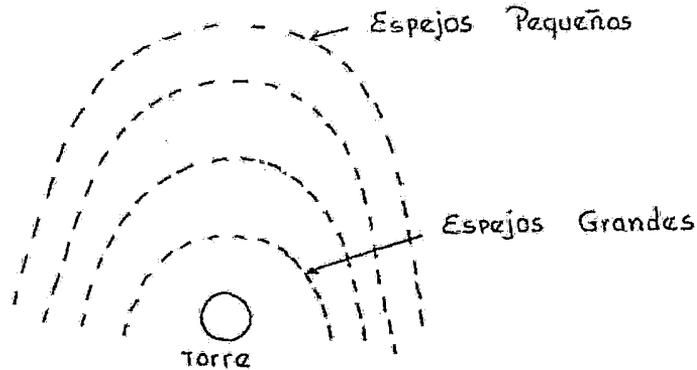
Las alturas de las torres varía de 86 m a 450 m por lo que deben de estar construídas de materiales resistentes a los vientos.

El número de espejos utilizados es entre 1555 a 1760 heliostatos y de un área de 50 a 48 mts. cada uno, de ahí su gran costo.

Los espejos o heliostatos se sitúan en círculos concéntricos alrededor de la torre, formando una especie de estadio y en base a esto se colocan para un mismo sistema diferentes tamaños de heliostatos, ya que los rayos de luz reflejada no son perfectamente paralelos sino que se refleja con un ángulo abierto hacia el receptor de 32° , lo cual significa que en la práctica para una distancia de 100 mts. la dispersión de la luz es de casi 1 m del paralelo, a 500 m de distancia será de 5m de dispersión del rayo solar provocando pérdidas.

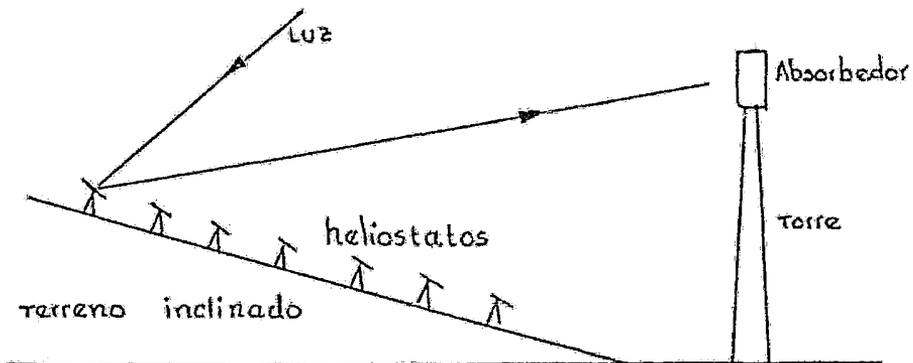


Por lo que en el círculo externo se encuentran colocados los espejos - más pequeños y en el círculo interno lo más grandes para que todos los rayos sean de la misma amplitud y lleguen al absorbedor sin provocar - pérdidas imecesarias. Un acomodo se muestra a continuación:



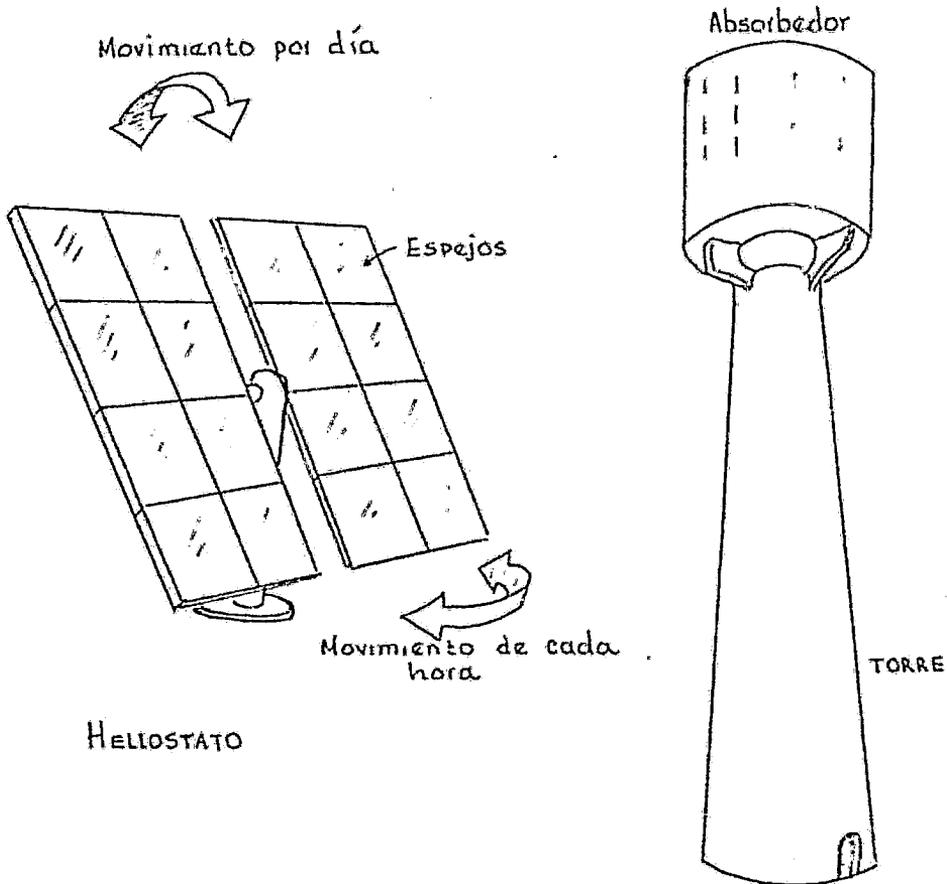
Los heliostatos deben de estar separados entre sí para evitar sombreamiento entre ellos, al tener una excesiva inclinación, muy común al -- inicio del día.

Para no separarlos y aprovechar mayor el terreno, lo que se hace es -- instalar los helios-tatos en terrenos inclinados.



Cada heliostato contiene un aparato seguidor de sol que mueve al espejo en dirección horizontal cada hora y en dirección vertical cada día para mantener reflejados los rayos solares en dirección de la torre.

Un esquema de un heliostato y una torre se muestran a continuación:



El absorbedor está recubierto por películas selectivas de gran absorptividad y dentro de él circula el fluido a calentar.

B. SUBSISTEMA DE GENERACION DE FUERZA ELÉCTRICA

Este subsistema tiene por objeto, convertir la energía calorífica obtenida por los colectores y concentradores, en energía mecánica, y después en energía eléctrica por medio de un generador.

El fluido de trabajo sale de los concentradores a una elevada temperatura, se hace pasar por un dispositivo en donde el calor es transformado en trabajo mecánico, y después el fluido se regresa hacia el colector o concentrador, para ser calentado de nuevo efectuando así un ciclo (que bajo estas condiciones es un ciclo termodinámico).

Existen varias formas o ciclos termodinámicos utilizados por los sistemas solares, para convertir el calor en trabajo útil, dentro de los más comunes están:

- a) Ciclo Rankine.
- b) Ciclo Brayton
- c) Ciclo Stirling

Ciclo Rankine

Este es conocido por ser el ciclo estandar, usado para plantas de vapor convencionales generadores de potencia.

El diagrama del ciclo es el siguiente; en el cual se utiliza una turbina de vapor.

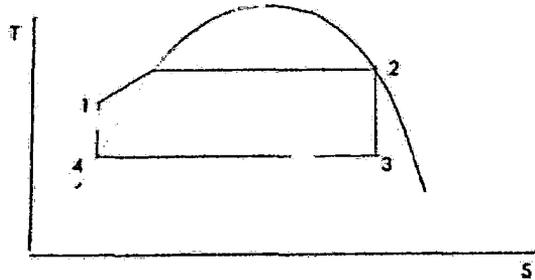


Diagrama T vs S

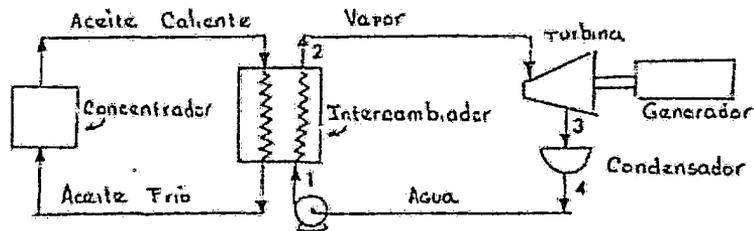


Diagrama de Flujo del ciclo Rankine

El agua es bombeada hasta el suministrador de calor (intercambiador), donde primero se calienta, hasta una temperatura de saturación correspondiente a la Presión P_1 entregada por la bomba, luego se transforma en vapor saturado seco, y se descarga en una turbina expandiéndose hasta una P_3 , transformando la energía térmica del vapor en trabajo.

Finalmente el fluido pasa a un condensador, en donde se convierte el vapor húmedo isobárica e insoentropicamente en líquido saturado, la presión en el condensador ($P_4 = P_3$), es menor que la presión en el intercambiador ($P_1 = P_2$), por lo que el líquido es bombeado al intercambiador para alcanzar la P_1 , completándose así el ciclo.

En los sistemas solares que utilizan este ciclo, no utilizan directamente el agua para calentarla en el concentrador, sino que manejan un fluido (aceite o sal de sodio), con propiedades de elevado punto de ebullición, para que cuando se caliente (a veces a 3000°C) no se evapore, porque presentaría problema de presión, y como consecuencia se tendría que usar materiales en el concentrador y en las tuberías, de una alta resistencia a la presión, como ocurriría si se usara directamente agua como fluido de calentamiento.

Por lo cual se utiliza un intercambiador, en donde el fluido de trabajo (aceite o sal) intercambia su calor hacia el agua, evaporándola a una T. dada, permitiendo un menor costo en el material, así como una mayor flexibilidad de manejo de los dos fluidos.

La eficiencia del ciclo, puede obtenerse recurriendo a la 1a. ley de la termodinámica.

Trabajo de la turbina

$$W_{\text{turbina}} = h_2 - h_3$$

Trabajo de la bomba

$$W_{\text{bomba}} = h_1 - h_4$$

$$W_{\text{neto}} = W_{\text{turbina}} - W_{\text{Bomb.}}$$

$$h_n = \text{Entalpia en el paso } n.$$

Calor en el intercambiador

$$Q \text{ interc.} = h_2 - h_1$$

Por lo tanto la eficiencia η será:

$$\eta = \frac{\text{Energía obtenida del ciclo en forma de trabajo}}{\text{Energía necesaria para producir vapor}}$$

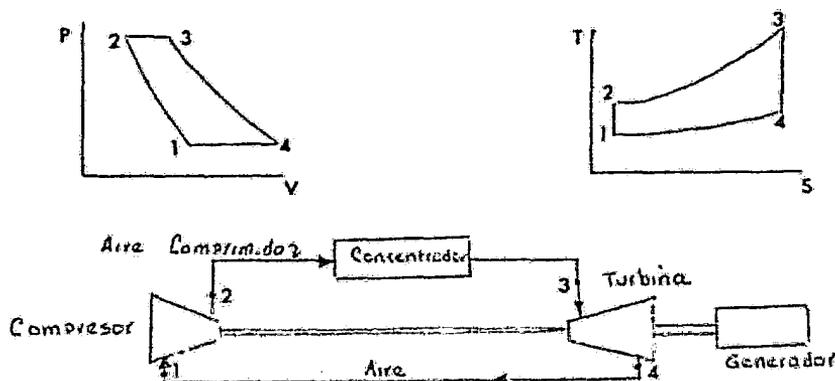
$$\eta = \frac{(h_2 - h_3) - (h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)}$$

Como el trabajo requerido por la bomba, es muy pequeño comparado con el trabajo desarrollado por la turbina, entonces:

$$\eta = \frac{(h_2 - h_3)}{(h_2 - h_1)}$$

Ciclo Brayton

Este ciclo también llamado ciclo Joule, se muestra en la siguiente figura, usando una masa de aire constante, y una turbina de gas.



Diagramas de P vs V y T vs S y de flujo del ciclo Brayton

Un flujo de masa de aire se hace pasar por el compresor, donde se eleva su presión y temperatura, se hace pasar al concentrador en donde se calienta a presión esencialmente constante, después se descarga en una turbina, desarrollándose una potencia suficiente para mover el compresor y el generador.

La eficiencia del ciclo corresponderá a:

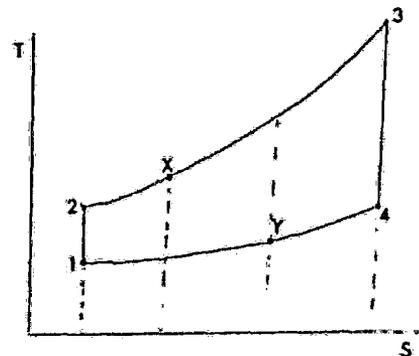
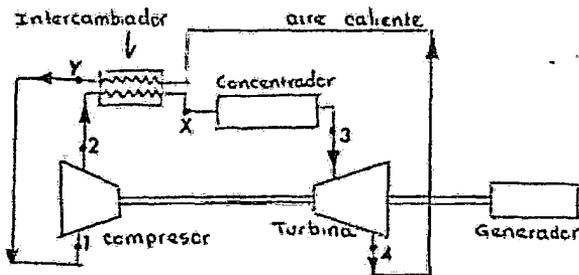
$$\eta = \frac{\text{Energía aprovechada}}{\text{Energía disponible}}$$

en función de entalpías será:

$$\eta = \frac{h_4 - h_3}{(h_2 - h_1) + (h_3 - h_2)}$$

Ciclo Brayton con Regeneración

Puesto que la temperatura del aire a la descarga de la turbina, es generalmente mayor que la del aire a la descarga del compresor, entonces la energía asociada del aire caliente a la salida de la turbina, puede aprovecharse para calentar el aire a la entrada del concentrador mediante un intercambiador de calor como se muestra a continuación:



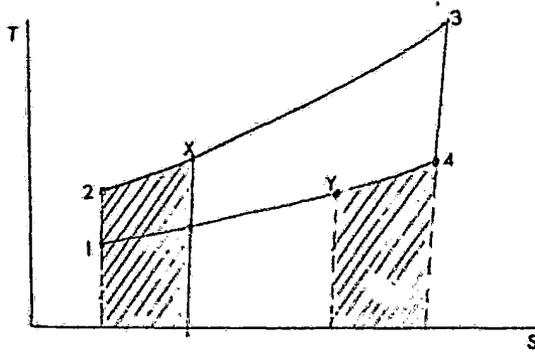


Diagrama T vs S Para un ciclo Brayton ideal con Regeneración

La eficiencia de este ciclo será:

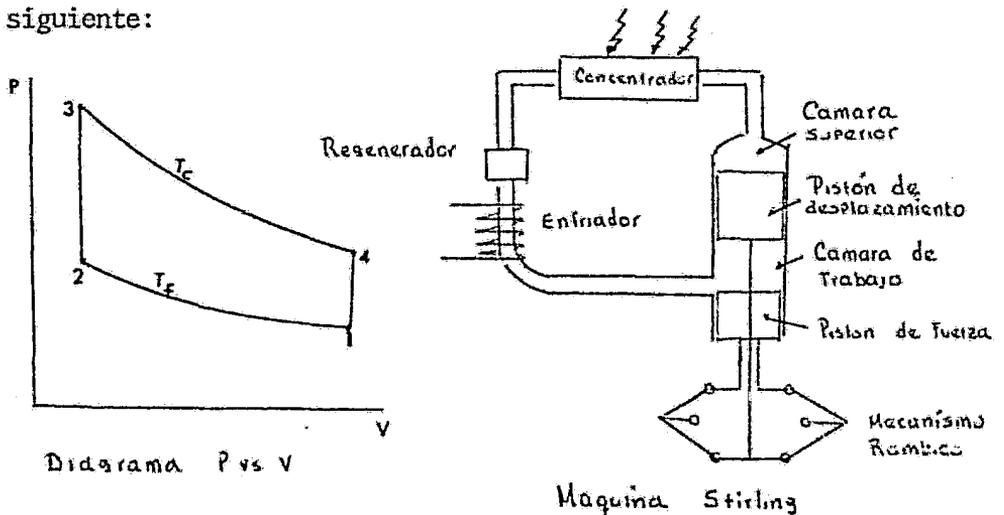
$$\eta = \frac{\text{Energía aprovechada}}{\text{Energía disponible}}$$

$$\eta = \frac{h_x - h_2}{h_4 - h_2} = \frac{h_4 - h_y}{h_4 - h_2}$$

Por medio de la regeneración, se logra elevar la eficiencia del ciclo y por ende del sistema.

Ciclo Stirling

Es un ciclo extremadamente reversible que usa una masa de gas constante (aire), un esquema del ciclo así como de la máquina stirling utilizada es el siguiente:



Consta de 4 procesos:

Proceso isotérmico (1-2)

El gas se comprime a una T_f constante, desde un volumen V_1 a un volumen V_2 , aumentando la presión del gas y disipando una cantidad de calor q_{sal} hacia el exterior (enfriador).

Proceso isométrico (2-3)

El gas absorbe una cantidad de calor q_{V1} , a volumen constante, aumentando su temperatura hasta un valor T_c .

Proceso isotérmico (4-3)

El gas se expande a una temperatura T_c constante, hasta el volumen V_1 , recibiendo al mismo tiempo una cantidad de calor del concentrador.

Proceso isométrico (4-1)

El gas se enfría desde T_c hasta T_f , a volumen constante, disipando -- una cantidad de calor q_{V2} .

La máquina stirling consta de 2 pistones, uno de desplazamiento y otro de fuerza, así como un mecanismo impulsor tipo róbico.

Al principio del ciclo el pistón de desplazamiento se localiza en la parte superior del cilíndrico (punto muerto superior), y el de fuerza en la parte inferior (punto muerto inferior). El gas ocupa el volumen

máximo en ese momento, y tiene la máxima temperatura T_f .

El pistón de fuerza se desplaza hacia arriba comprimiendo el gas, se discipa calor por el sistema de enfriamiento para que la compresión sea isotérmica.

El pistón de desplazamiento se mueve hacia abajo manteniendo fijo el pistón de fuerza, transfiriéndose de esta manera el gas hacia la cámara superior de alta temperatura.

El gas se expande isotérmicamente, ya que recibe calor del concentrador, desplazándose a su vez ambos pistones hacia abajo hasta alcanzar sus puntos muertos inferiores.

Finalmente el pistón de desplazamiento se mueve hacia arriba, transfiriéndose el gas a volumen constante hacia la cámara de trabajo, manteniéndose el pistón inferior fijo y perdiendo el gas a su paso una cierta cantidad de calor por el enfriador.

Con el mecanismo rómbico perfectamente balanceado, se logra un movimiento libre de vibraciones (inclusive, en máquinas de un sólo cilindro) el cual es utilizado para mover a un generador, produciendo electricidad.

La eficiencia del ciclo estará dada por:

$$N = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

C. SUBSISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA

Este subsistema tiene por objeto, el de almacenar una parte de la energía producida por el sistema solar durante su funcionamiento; por las siguientes razones:

- 1) Hacer menos intermitente el sistema; es decir, como sólo se produce electricidad cuando hay sol, con el sistema de almacenamiento se puede producir electricidad aún en ausencia de él (noche).
- 2) Evitar pérdidas de tiempo, que se ocasionan debido a la falta de luz parcial (día nublado, eclipse, etc.) y la central tenga que alcanzar de nuevo su temperatura de funcionamiento.
- 3) Para poder proveer, en caso requerido, de una mayor demanda de energía.

El almacenamiento básicamente se hace de dos formas:

A. Almacenamiento químico-termal.

- 1) Químico.
- 2) Térmico.
- 3) Termoquímico.

B. Almacenamiento físico.

- 1) Mecánico.
- 2) Electroquímico.

A. Almacenamiento químico-terma

1) Almacenamiento en forma de energía química basada en la producción química de algún elemento o compuesto de gran contenido energético, es decir, se almacena energía en los enlaces químicos del compuesto o elemento al formarlo o producirlo.

Al generar la reacción química, por la adición de calor (calor obtenido del sol), dicha energía calorífica queda almacenada en los enlaces de los productos formados, que deben de ser estables y de fácil reaprovechamiento, tal es el caso en la producción del hidrógeno que es utilizado una vez formado, como combustible, proveedor de alimentación química, y (para los años 1995) como un sustituto del gas natural, -- hasta ahora, debido a su costo efectivo en su producción, es considerado en el mercado como el mejor candidato para el almacenamiento químico de la energía solar.

2) Almacenamiento en forma de energía térmica basada en la absorción térmica de algunas sustancias o cuerpos, sólidos o líquidos para aumentar de temperatura o en forma de calor latente, para cambiar de fase.

Es decir, la energía queda absorbida y almacenada dentro de los cuerpos o sustancias, en forma de calor sensible o latente, para después ser utilizada de nuevo.

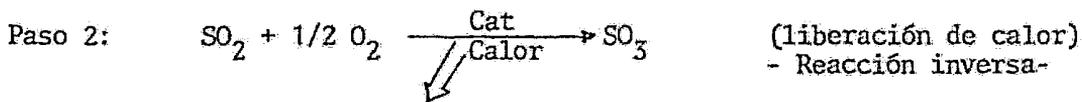
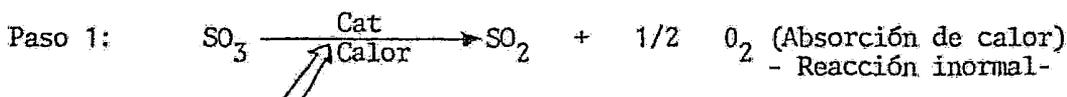
Algunas de estas sustancias o cuerpos son:

- a) Sal i.e. HITEC (mezcla de: 40% de Nitrato de Sodio.
7% de Nitrato de Sodio.
54% de Nitrato de Potasio)
- b) Aceite DOWTHERM A (mezcla de: 73.5% Oxido Difencil
26.5% de Dinelin).
- c) Elementos: Sodio, Azufre, Mercurio, Litio.
- d) Ladrillos, Oxidos ceramicos (MgO).
- e) Parafinas, Ceras.
- f) Agua (para almacenamientos térmicos bajos)

La sustancia o cuerpo se calienta o aísla en botes hasta que se requiera de su uso.

3) Almacenamiento en forma termo-química. Se basa en el aprovechamiento de la reversibilidad de algunas reacciones químicas, ya que en dichas reacciones para llevarlas a la formación de productos se les suministra una cierta cantidad de calor (calor obtenido del sol), que es después liberado al efectuarse la reacción inversa, es decir, cuando primera-

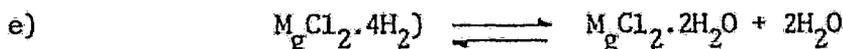
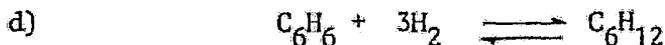
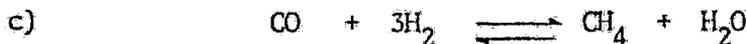
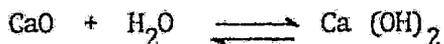
mente se hace reaccionar con la adición de calor, se estará almacenando la energía, después cuando se quiera utilizar dicha energía, se hace reaccionar en forma inversa; el siguiente mecanismo de reacción nos muestra este efecto;



Algunas de las reacciones utilizadas son:

a) Descomposición de Hidrógeno-Sulfato de Amonio (Estudiada por University of Houston).

b) Hidratación-Deshidratación (por International Otomics)



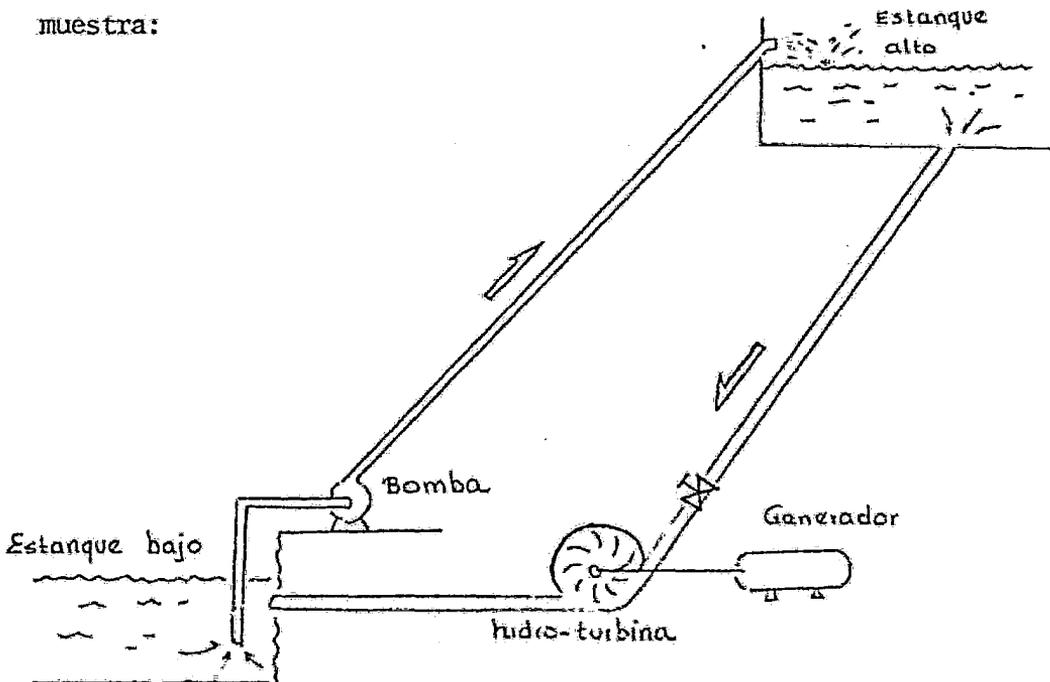
f) Sistema ácido sulfúrico - agua.

g) Sistema de cloruro de Magnecio (Mg Cl_2).

B. Almacenamientos físicos

1) Almacenamiento en forma de energía mecánica. Llamado así por que para dicho almacenamiento se utilizan dispositivos mecánicos, como es el uso de turbinas-motores para generar un movimiento, el cual es --- aprovechado en:

- a) Compresores; para comprimir aire, quedando así almacenada la energía, en forma de presión, la cual, cuando se quiera volver a utilizar se hará una expansión del aire en una turbina, obteniéndose -- así un trabajo fácil de aprovechar.
- b) Bombas; para bombear agua a un nivel elevado, quedando así almacenada la energía en forma de energía potencial, y cuando se quiera volver a utilizar, se hace bajar el agua de los depósitos altos -- por una hidroturbina, y lo mismo el reaprovechamiento es sencillo, porque se adapta a un generador y se produce electricidad, como se muestra:



3) Almacenamiento en forma de Energía Electroquímica. En este almacenamiento se utilizan acumuladores o baterías, las cuales al recargarlas queda almacenada la energía y cuando se necesite, usarse como una fuente de energía eléctrica.

Localización del subsistema de almacenamiento

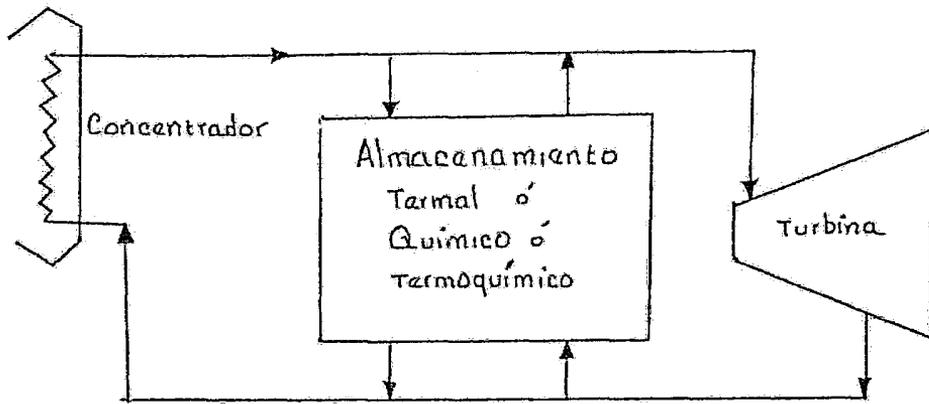
En los sistemas de generación de fuerza eléctrica a partir de la energía solar, el subsistema de almacenamiento puede estar localizado en diferentes partes, dependiendo del sistema de generación, del costo y del subsistema de almacenamiento propiamente dicho.

Y tiene como principal característica; la de ayudar o substituir cuando sea necesario, al subsistema que esté antes que él, por lo que puede estar localizado en tres partes:

1) Entre el subsistema concentrador y la turbina

La localización del almacenamiento en este caso, tiene por objeto ayudar e incluso substituir en caso necesario al concentrador, es decir; en una mayor demanda de energía, días nublados o por la noche, al almacenamiento hará las veces del concentrador, suministrando energía calorífica a los intercambiadores de calor, turbinas o máquinas, observándose con esto que el almacenamiento es de energía calorífica, por lo que se utilizan almacenamientos térmicos, químicos o termoquímicos, -- que almacenan y devuelven la energía en forma de calor.

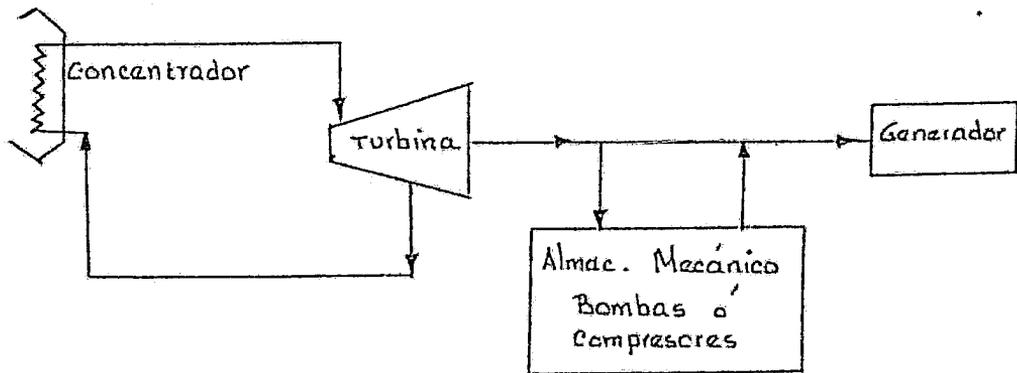
La figura siguiente nos muestra esta localización:



2) Entre la turbina y el generador

En este caso, el subsistema de almacenamiento, va a ayudar o substituir cuando lo requiera, a la turbina; es decir, cuando se requiera del uso de almacenamiento, éste hará las veces de la turbina, suministrando -- energía mecánica al generador, por lo que aquí el almacenamiento debe ser de energía mecánica, tal como; el uso de compresores y bombas hidrodinámicas que almacenan y devuelven la energía en forma mecánica.

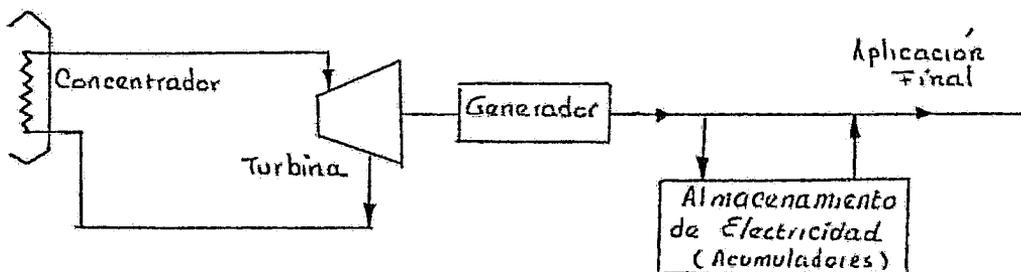
En el siguiente esquema se muestra dicha localización:



3) Entre el Generador y la aplicación final

Aquí el almacenamiento, cuando sea necesario estará ayudando o substituyendo al generador, porque cuando se requiera de una mayor demanda de energía, en días nublados o por las noches el almacenamiento hará las veces del generador, es decir, estará generando energía eléctrica a la aplicación final, por lo que el almacenamiento aquí debe de ser de energía eléctrica y en este caso se usan almacenadores tales como: acumuladores o baterías, los cuales almacenan y devuelven la energía en forma de energía eléctrica.

La figura siguiente muestra esta localización:



D. SUBSISTEMA DE CONTROL

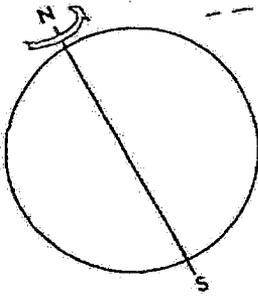
En este subsistema se encuentra el control automático y manual, tanto de: temperaturas y presiones, por medio de medidores y sensores automáticos, en turbinas, receptor, intercambiador, compresor, etc., como en el control automático de los heliostatos y concentradores, para seguir el movimiento aparente del sol.

Dicho movimiento es muy importante como se vió anteriormente, para obtener el máximo aprovechamiento de la energía solar, el concentrador de enfoque o heliostatos (espejo) debe moverse para mantener siempre la reflexión de los rayos solares hacia el receptor o absorbente.

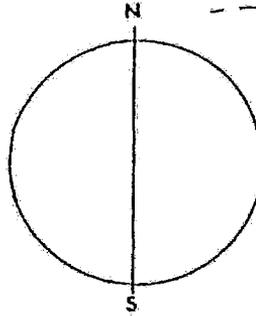
Para lograr este movimiento, se le adapta el concentrador de enfoque o heliostato, un aparato cuyo funcionamiento se deriva del actual movimiento de la tierra y el movimiento aparente del sol.

Es decir, el movimiento de la tierra presenta tres posiciones extremas del eje rotacional durante el año, por lo que se puede derivar un aparato para ir siguiendo al sol durante esas 3 posiciones.

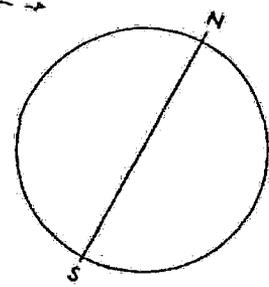
Dichas posiciones extremas son:



Solsticio de Invierno
21-22 de diciembre

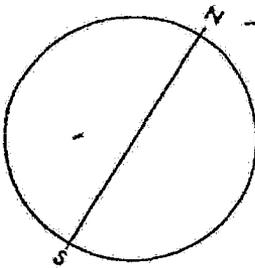


Equinoccio
20-21 de marzo

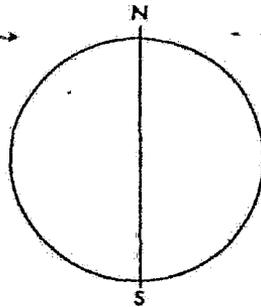


Solsticio de verano
21-22 de junio

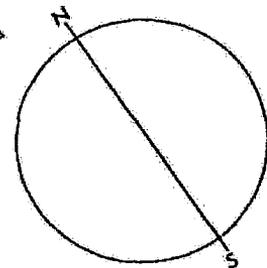
Después la inclinación ocurre en forma inversa:



Solsticio de Verano
21-22 de junio



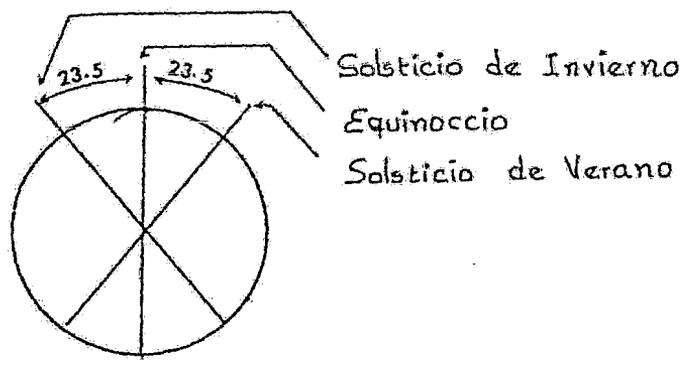
Equinoccio
22-23 de Sept.



Solsticio de Invierno
21-22 de diciembre

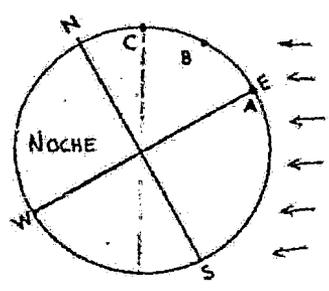
Observamos que hay 2 equinoccios en diferentes meses. Y además, que cada 3 meses (aprox.) se encuentra en otra posición, es decir, en junio (21-22) se encuentra en el solsticio de verano, a los 3 meses después (Sept. 22-23) se encuentra en el equinoccio y a los 3 meses siguientes (diciembre 21-22) en el solsticio de invierno.

Cada inclinación (posición) respecto a las demás, se diferencia en un ángulo de 23.5°; es decir:



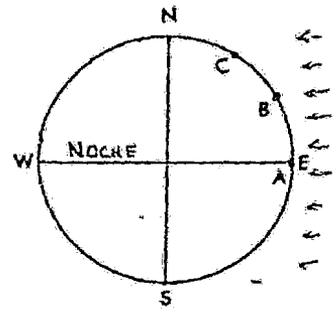
Para cada posición de la tierra, un observador que se encuentre en ella y dependiendo de su posición sobre la misma, observará salir y ocultarse al sol de manera diferente; es decir:

Solsticio de Invierno



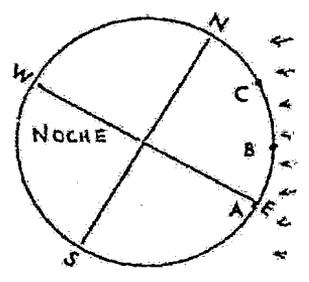
El sol se verá salir por el sur-oeste levantándose hacia el Nor-oeste.

Equinoccio



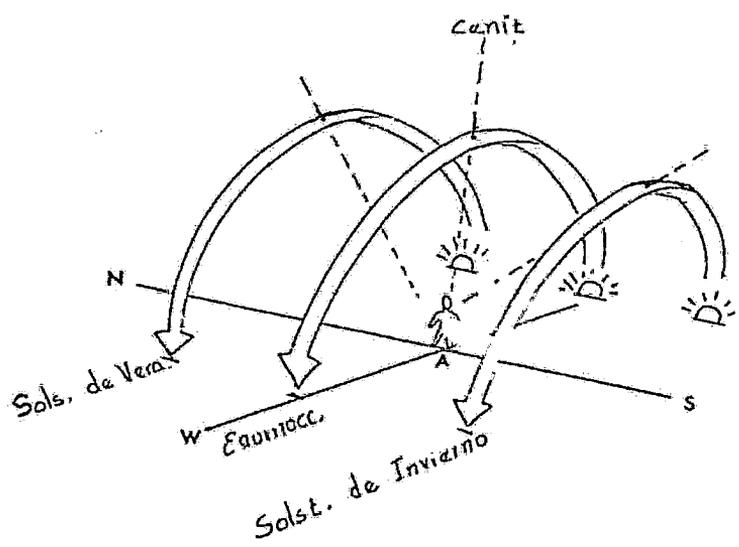
El sol se verá salir por el este, levantándose hacia el oeste.

Solsticio de Verano

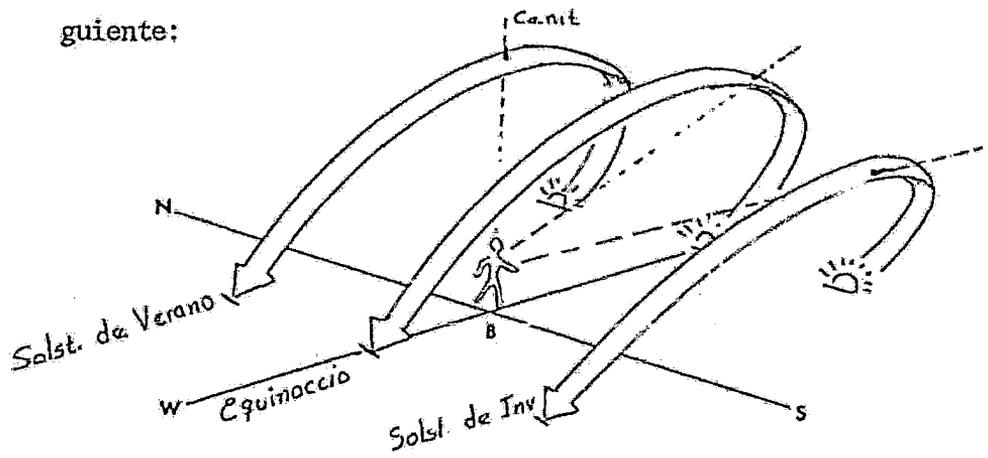


El sol se verá salir por el Nor-este levantándose hacia el sur-oeste.

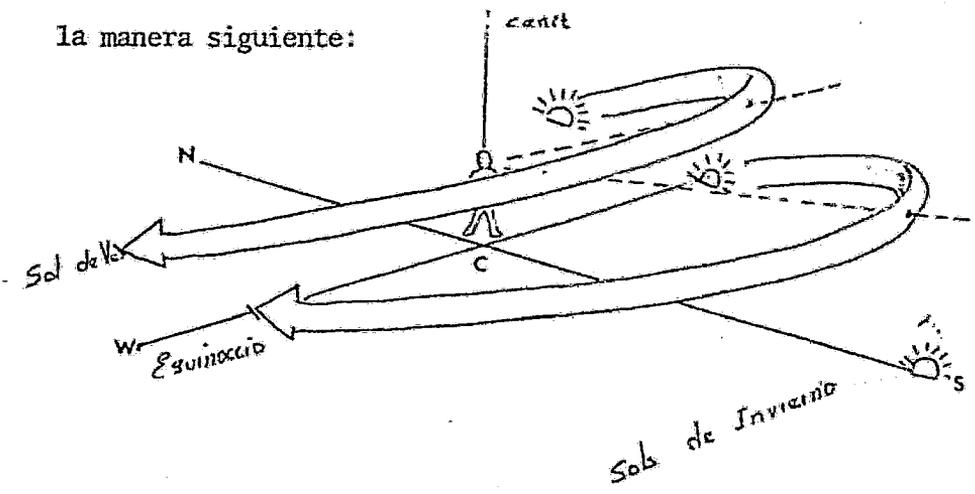
Si un observador se encuentra en el ecuador (punto A), verá salir y meterse al sol para cada posición terrestre de la manera siguiente:



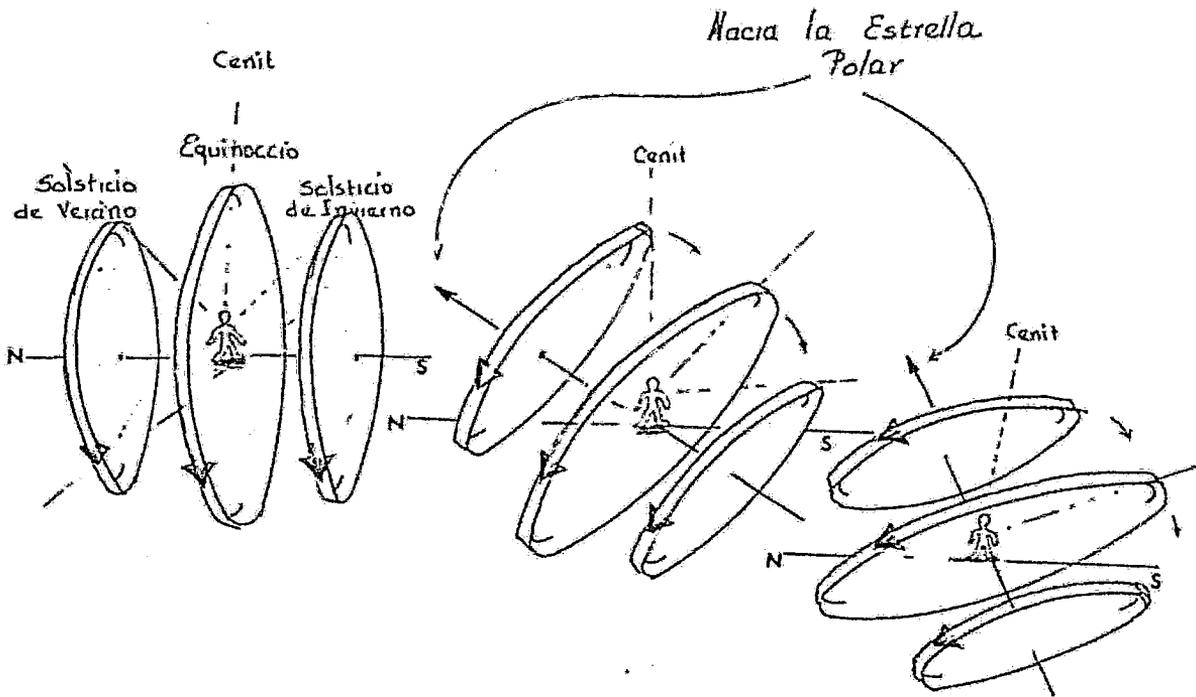
Si se encuentra a una latitud de 23.5° (punto B), observará el movimiento del sol para las tres posiciones terrestres, de la manera siguiente:



Si se encuentra en la latitud de 66.5° (punto C), observará el sol de la manera siguiente:



Cada día el sol describe arcos de círculos cuyos centros están sobre una línea en el plano del cenit norte-sur que cruza la localidad del observador y se orienta hacia la estrella polar, todos los círculos formados son paralelos entre sí.



Observador en el Ecuador así verá la salida y puesta del sol en las diferentes posiciones de la tierra.

En la latitud 23.5° así verá el sol en las inclinaciones terrestres.

En la latitud 66.5

Con lo descrito anteriormente resumimos que el movimiento aparente del sol sobre la tierra se presenta de dos formas.

Una cuando el sol sale en la mañana y se va moviendo en el transcurso del día hasta meterse por la tarde (movimiento debido a la rotación de la tierra).

La otra, de acuerdo a las inclinaciones de la tierra se verá salir el sol, en la posición que le corresponda, es decir, en el solsticio de invierno, el sol se verá salir por el sur-oeste y levantarse hacia el nor-este, poco a poco irá cambiando de posición, hasta llegar a los 3 meses (aprox.) al equinoccio, en donde el sol se verá salir por el este y levantarse hacia el oeste, de esta posición pasará poco a poco al solsticio de verano, a los 3 meses (aprox.), en donde el sol saldrá por el nor-este y se meterá por el sur-oeste.

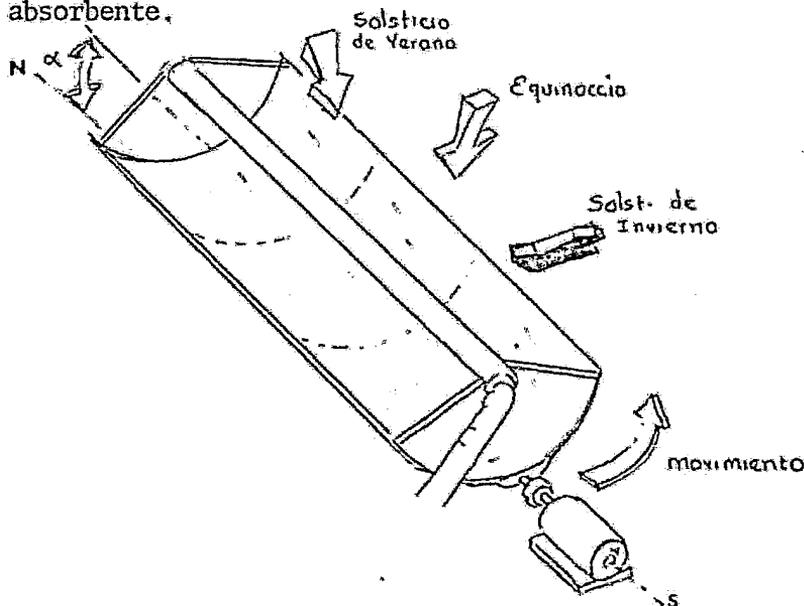
Por lo que un mecanismo para seguir el sol debe tomar en cuenta esas características.

Como los únicos dispositivos que necesitan de un mecanismo de seguimiento solar son los concentradores de enfoque, a continuación describimos la forma en que operan estos mecanismos en ellas.

Para concentradores de enfoque lineal

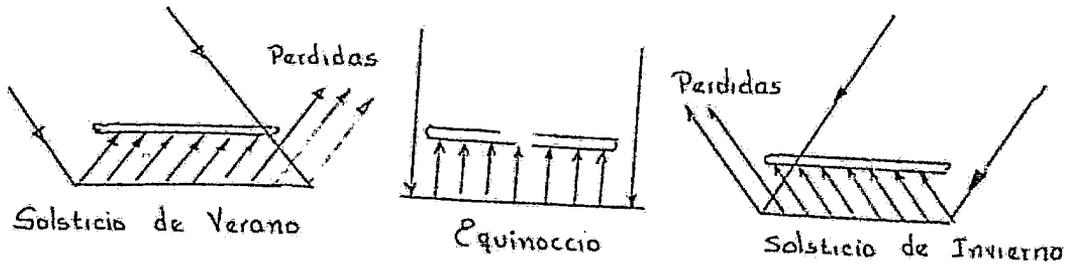
Estos sólo requieren de un solo movimiento para seguir el sol, por lo que se deben orientar en la posición norte-sur, e inclinados hacia el

sur en el ángulo α de la latitud en que se encuentre, o bien que el eje de rotación apunte hacia la estrella polar, para que así, aunque la tierra cambie de posición (solsticios y equinoccios), la imagen del disco solar, esté siempre en la línea del absorbente (foco lineal). Ahora, para seguir el movimiento de la salida y puesta del sol, sólo se le coloca un motor que gire y haga girar al concentrador o espejo, a una velocidad de 15° por hora, manteniendo así, siempre los rayos reflejados hacia el absorbente.

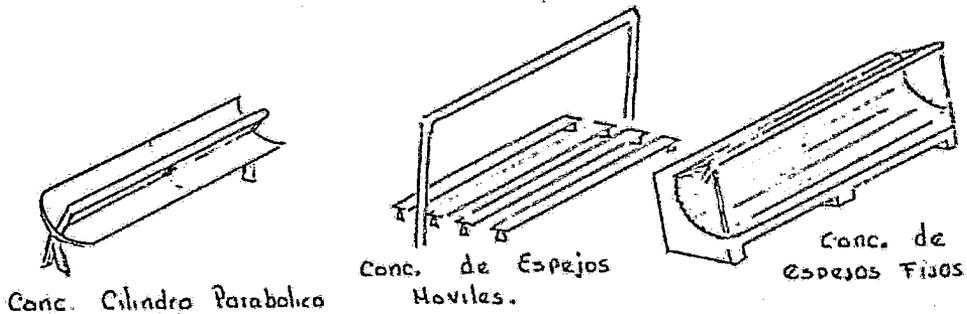


La ventaja de este tipo de mecanismo es que sólo se mueven alrededor de un solo eje fijo, por lo que los concentradores se fijan sobre tierra en 2 ó más puntos ofreciendo mayor resistencia a los vientos, además del costo de este mecanismo es relativamente bajo.

Pero, se presenta la desventaja de tener pérdidas de reflexión en los solsticios, porque los rayos llegan inclinados hacia la parábola o espejos, como se muestra a continuación, provocando que no se alcancen altas concentraciones.



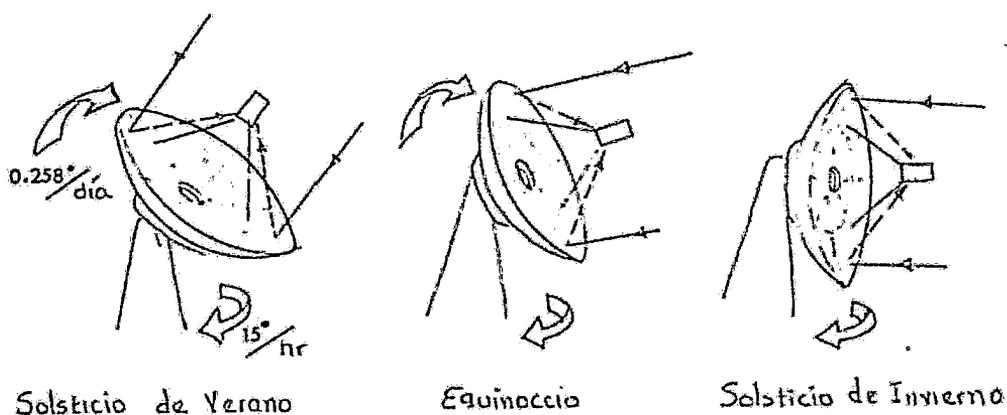
Dentro de los concentradores, que utilizan este tipo de mecanismos seguidores de sol, están:



Para concentradores de foco puntual

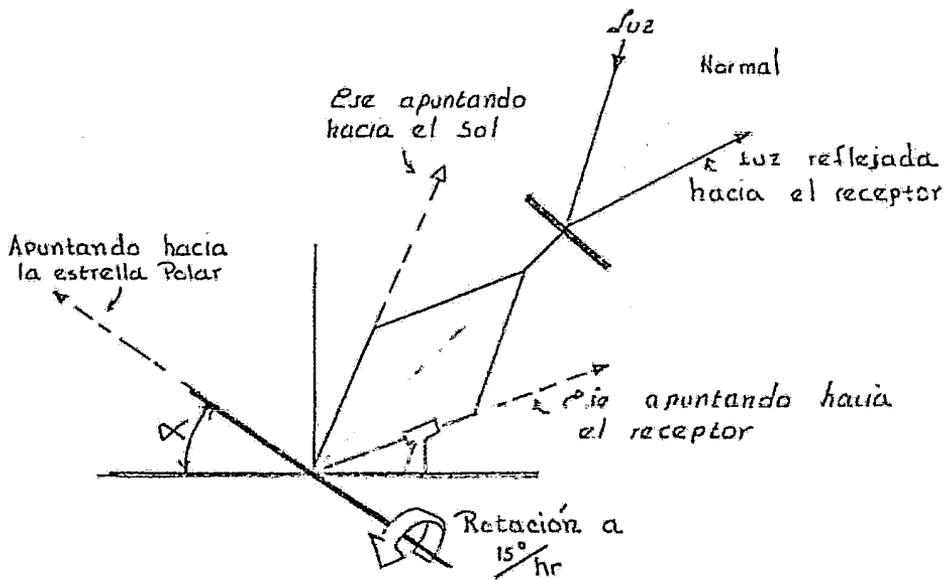
Como su foco es una área relativamente puntual, este tipo de concentradores deben llevar mecanismos de seguimiento más precisos, por lo que, para mantener los rayos solares hacia el foco, se mueven siguiendo al sol, tanto como, desde que sale el sol y se mete, hasta conforme va variando de posición en las inclinaciones de la tierra.

Por lo tanto estos concentradores necesitan moverse alrededor de dos ejes, uno para seguir al sol desde que sale hasta que se mete, a una velocidad de 15° por hora, y el otro eje para girar siguiendo al sol, conforme se inclina la tierra (de solsticio a solsticio) y como cada posición está separada 23.5° una de otra cada 3 meses, entonces se adapta un motor en ese eje moviéndose aprox. 0.258° por día, para que al transcurrir los 3 meses se halla inclinado el concentrador un ángulo de 235° .



Para el caso de los heliostatos en las torres centrales, se utilizan pequeños mecanismos, para que cada heliostato refleja la luz hacia la torre, en donde está el receptor.

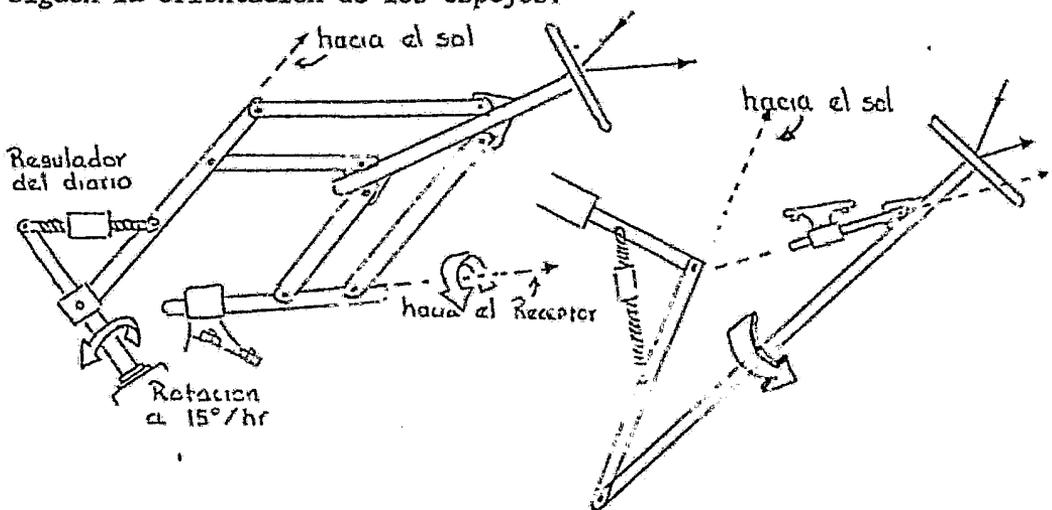
El mecanismo está basado en un paralelogramo, en donde el eje de rotación, está orientado hacia la estrella polar, como se muestra en el esquema siguiente:



Debido a las leyes de reflexión, los ángulos entre la normal al espejo, y los rayos incidente y reflejado son iguales.

Puesto que el ángulo del rayo hacia el receptor debe ser invariable - (es decir, siempre debe reflejarse hacia el receptor), con este diseño se logra que el espejo siempre esté orientado para que parta la normal por la mitad al ángulo entre el rayo incidente y el reflejado que está dirigido y fijo hacia el receptor.

En la figura siguiente se muestra esquemáticamente 2 aparatos que con siguen la orientación de los espejos.

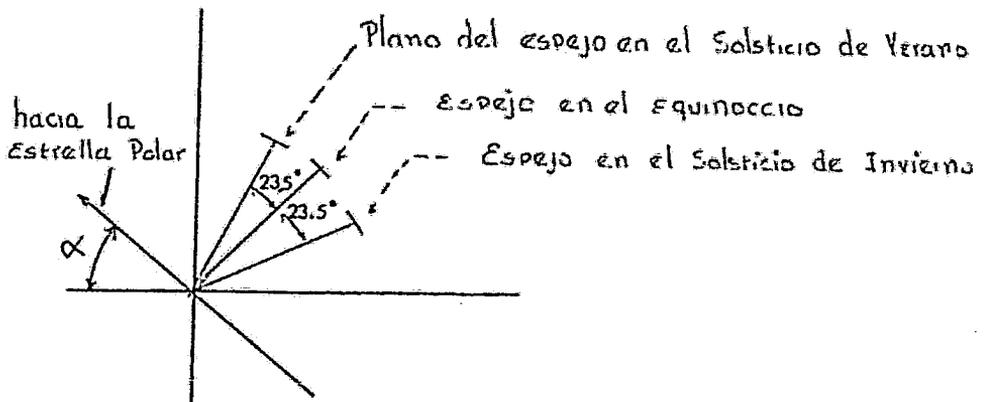


Los lados del paralelogramo que apuntan hacia el sol, giran a una velocidad de 15° por hora (constante) alrededor del eje.

Uno de los otros lados está apuntando hacia el receptor, y está montado, de tal forma que permite la rotación sólo alrededor de su propio eje.

Con esto se consigue que el espejo se sostenga en una posición automática tal que la luz solar se refleje en la misma dirección (hacia el receptor) para cualquier ángulo de incidencia del sol.

Además contiene un actuador que se encarga de la orientación de cada día, debido a la posición de la tierra, el cual va a cambiar la inclinación del espejo, llegando a las 3 posiciones extremas.



Como cada posición está separada 23.5° una de otra y se llega hasta -- ellas en un promedio de tres meses por separado, el actuador debe de - inclinar diariamente al espejo aproximadamente 0.258° para que al transcurrir los tres se llegue a la inclinación de 23.5° .

Esta orientación estacional (inclinación del espejo) se hace manual-- mente, aunque se puede adaptar un motor que dé esta inclinación a una velocidad de 0.258 grados por día, o del mismo motor que da la orientación a 15° por hora, se le extiende el movimiento por medio de engranes para que él mismo dé la inclinación estacional, de 0.258° por día.

Estos aparatos de seguimiento son caros por un complicado mecanismo -- (motor, engranes, etc.) aunque la regulación es simple.

Mecanismos más avanzados de orientación de los concentradores, es a base de sensores computarizados, mediante los cuales, el sensor indica a la computadora el movimiento del sol, y ésta mueve al concentrador focal por medio de motores en la posición correcta, de tal manera que el absorbedor esté recibiendo siempre la mayor cantidad de radiación reflejada durante el día.

Lógicamente estos mecanismos son muy costosos, aunque, cuando se usan, la eficiencia del sistema se incrementa en una forma bastante considerable.

CAPITULO III

3.1 PROTOTIPOS SOLARES PARA GENERAR FUERZA ELECTRICA

En la actualidad, existen plantas solares generadoras de energía eléctrica por medios termidinámicos, que están funcionando o que entrarán en funcionamiento.

Dichas plantas se encuentran instaladas en: EUA, la URSS, Francia, Alemania, Italia, Israel y Austria; principalmente.

En México, sólo en la Universidad Nacional Autónoma de México se está experimentando con este tipo de sistemas, a un nivel experimental, pero en un futuro muy próximo se espera ampliar el rango de producción de electricidad, en estos sistemas.

Aunque algunos sistemas se encuentran produciendo electricidad a una escala significativa, aún no pueden competir con otras fuentes comunes de energía, por lo que aunque han demostrado ser viables técnicamente, deberán ser todavía más estudiadas y desarrolladas, con el fin de hacerlas más eficientes y económicas.

A continuación mencionaremos algunos sistemas que están siendo desarrollados, describiendo sus características principales.

Sistema Torre Central Receptora

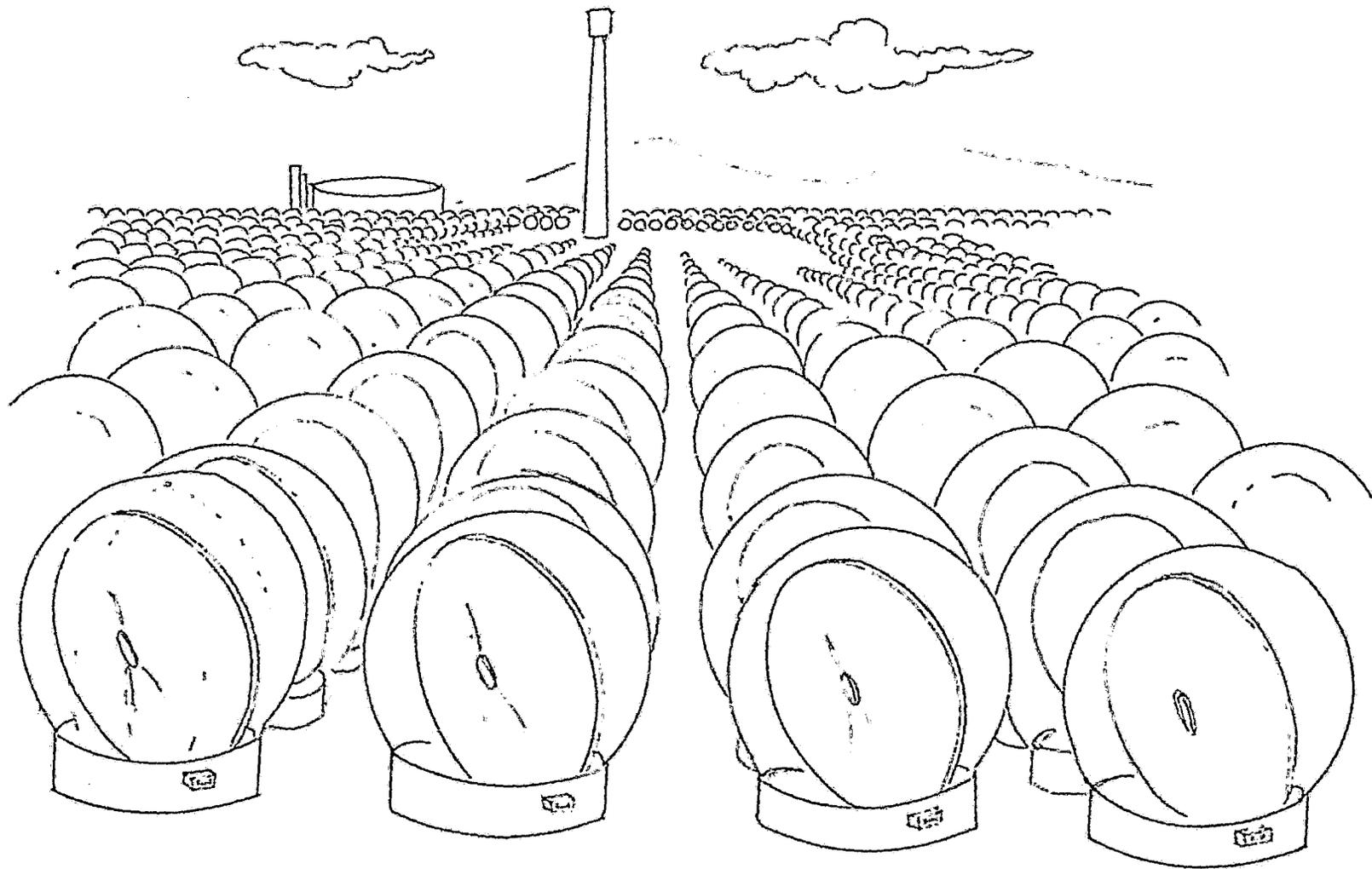
Como ya se vió anteriormente, este sistema está formado por una torre que contiene al absorbente y que está centrada en el campo de un gran número de espejos, los cuales reflejan los rayos solares hacia dicho absorbente, el factor de concentración es prácticamente igual al número de espejos.

El Departamento de Energía Solar en los EU, ha estudiado tres tipos de sistemas torre central, desarrolladas por las corporaciones; Martín -- Marieta, Mc Donnell Dougals y Honeywell, bajo la dirección técnica de los laboratorios Sandía.

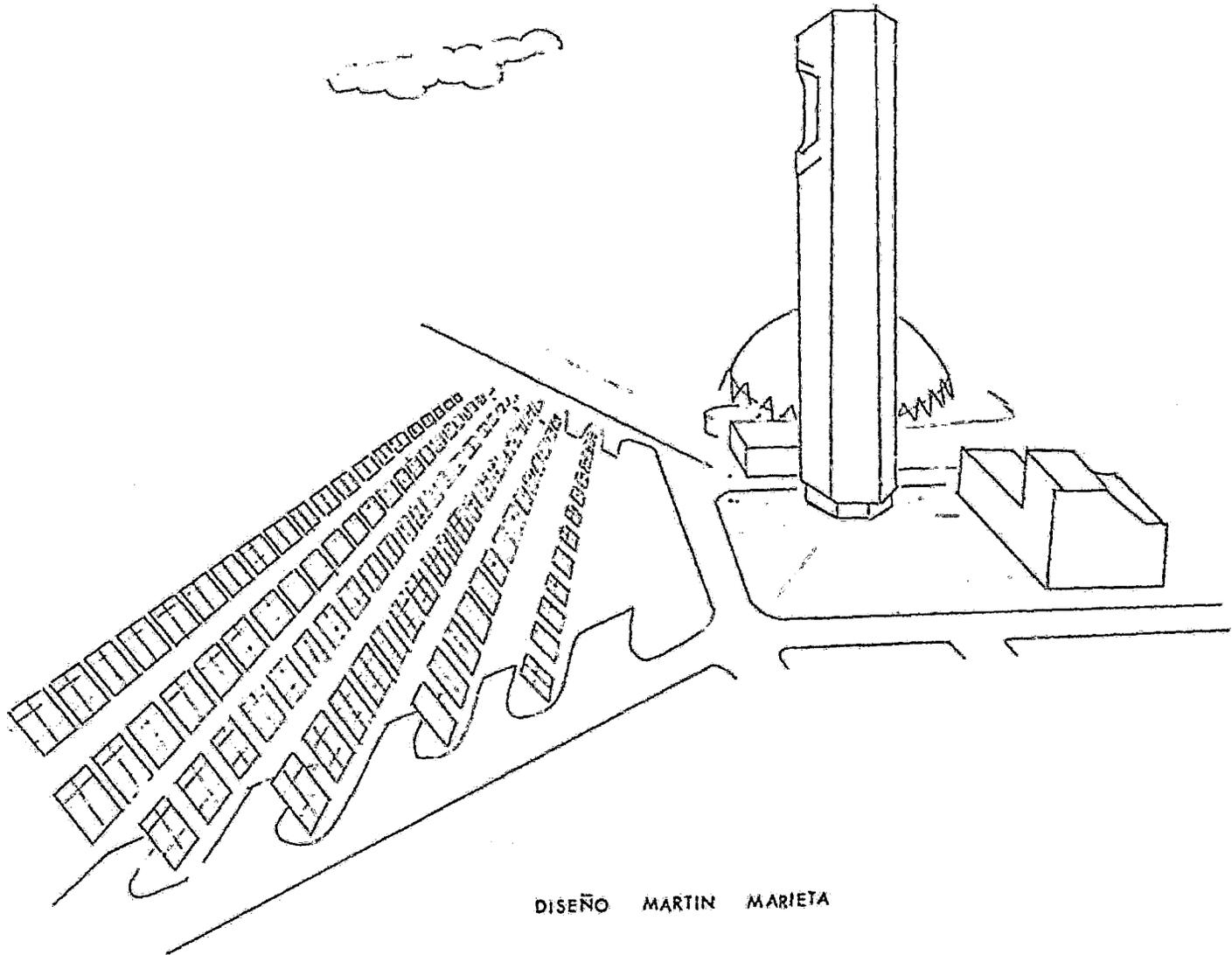
Dichos diseños han sido realizados a un nivel experimental, formando -- así pequeñas plantas de prueba, para que en un futuro próximo se desarrollen plantas a nivel comercial, con una mayor eficiencia a un costo relativamente bajo.

Las condiciones y características de cada una de las plantas, se resumirán en tablas, donde se podrán observar las ventajas y desventajas -- de cada una, respecto a las otras.

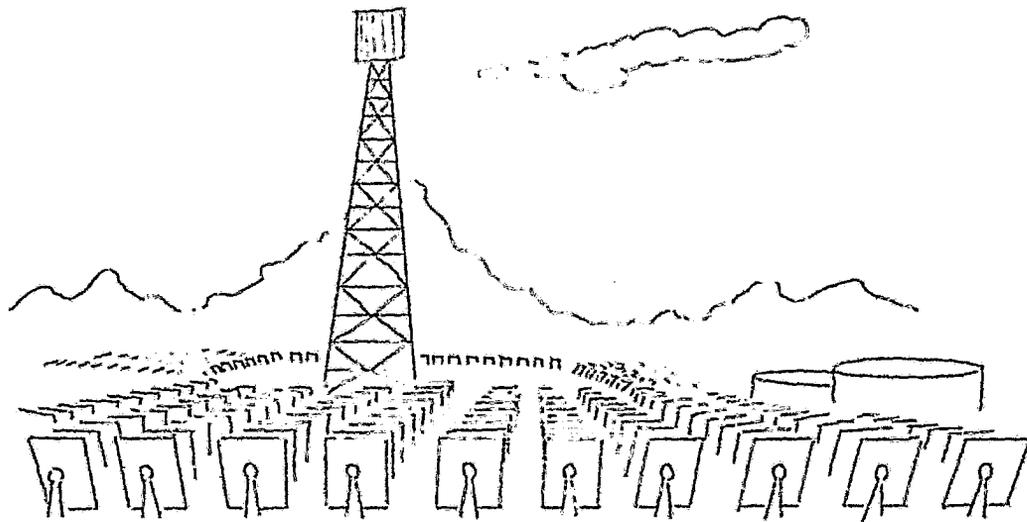
A continuación se muestran en una forma esquemática, las tres plantas -- sistema torre central, que están siendo desarrolladas.



DISEÑO HONEYWELL



DISEÑO MARTIN MARIETA



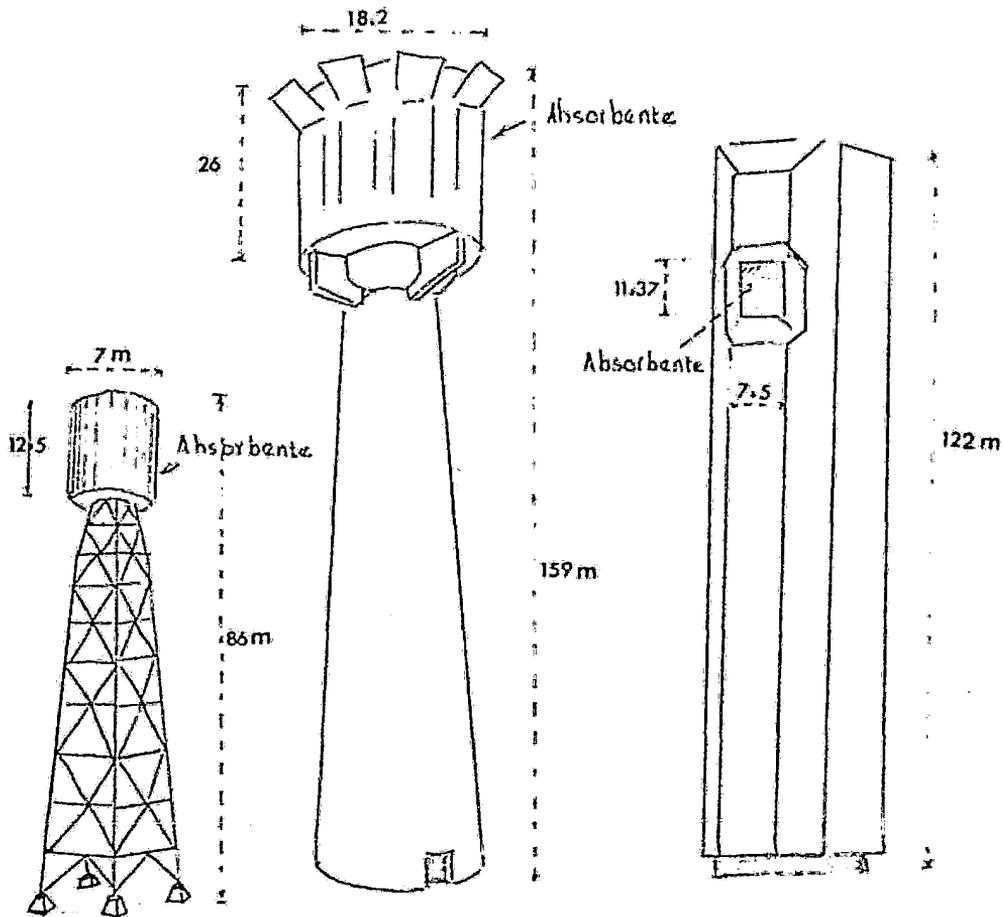
DISEÑO MC DONNELL DOUGLAS

Características Generales

Característica	Mc D. Douglas	Honeywell	Martin Marieta
Capacidad	10 Mwe	10 Mwe	10 Mwe
Capacidad entre gada por el almacenamiento	7 Mwe	8	5.5 Mwe
Número de espejos	1760	1650	1555
Altura de la torre	86 m	159 m	122 m
Area reflectiva por espejo	38 m ²	16.24 m ²	41 m ²
Arreglos de los heliostatos	Circular	Circular	Pentagonal
Diámetro del receptor	7 m	18.2 m	7.5 m
Altura del receptor	12.5 m	26 m	11.37 m
Costo de la planta por Kw producido (\$/Kw)*	415	644	498

* Calculado por Sandía.

El diseño del absorbente sobre la torre para cada uno, se muestra a --
continuación:



Mc Donnell Douglas

Honeywell

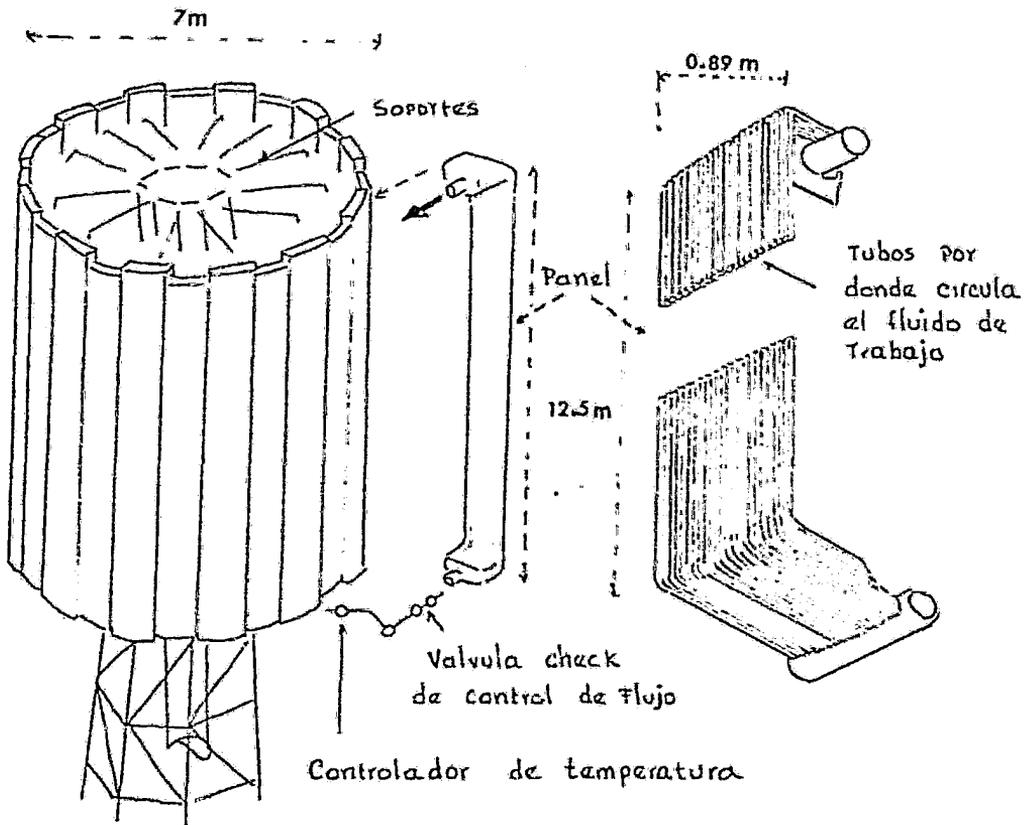
Martín Marieta

Las características de estas torres, nos llevan a una cierta cantidad -
de ventajas y desventajas, mostradas en la tabla siguiente:

ABSORBENTE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Mc DONELL DOUGLAS	<ul style="list-style-type: none"> - Mejor costo/desempeño de acuerdo a un flujo de -- 0.3MW/m² - Bajo peso del absorbedor - Torre baja - Concentración óptica <u>mí</u> <u>nima</u>. - Alta confianza - No se deteriora - Diseño - Panel de fácil reempla<u>z</u> <u>o</u>. - Diseño simplificado 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja eficiencia - Requiere recubri<u>m</u> <u>ientos</u> de alta absortividad. - Se enfría comple<u>t</u> <u>amente</u> por la - noche. - Problemas en el centro de calen<u>t</u> <u>amiento</u>. - Para propósitos de flujo el di- seño comercial es demasiado al<u>t</u> <u>o</u>.
MARTIN	<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficiencia - Calentadores muy comunes - No se deteriora 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo deficiente/ funciona. - Costoso. - Alto peso de la - torre.
MARIETA	<ul style="list-style-type: none"> - Costos bajos de material tubo - Mayor inercia termal - Reducción del enfriamien<u>t</u> <u>o</u> nocturno. 	<ul style="list-style-type: none"> - Diseño complicado
HONEYWELL	<ul style="list-style-type: none"> - Simple estructura - Aislamiento de superfi- cies de trabajo - Diseñado por la Boyler Manufacture comercial 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo deficiente/ funcionamiento. - Baja eficiencia,- alto peso. - Se deteriora. - Utiliza superficies calentadoras.

Las torres de Honeywell y Martin Marieta están construídas de concreto y cemento armado, por lo que son bastante pesadas, la de Mc Donnell sólo es de fierro estructural, todas ellas con el fin de soportar el esfuerzo al viento y el peso del absorbedor.

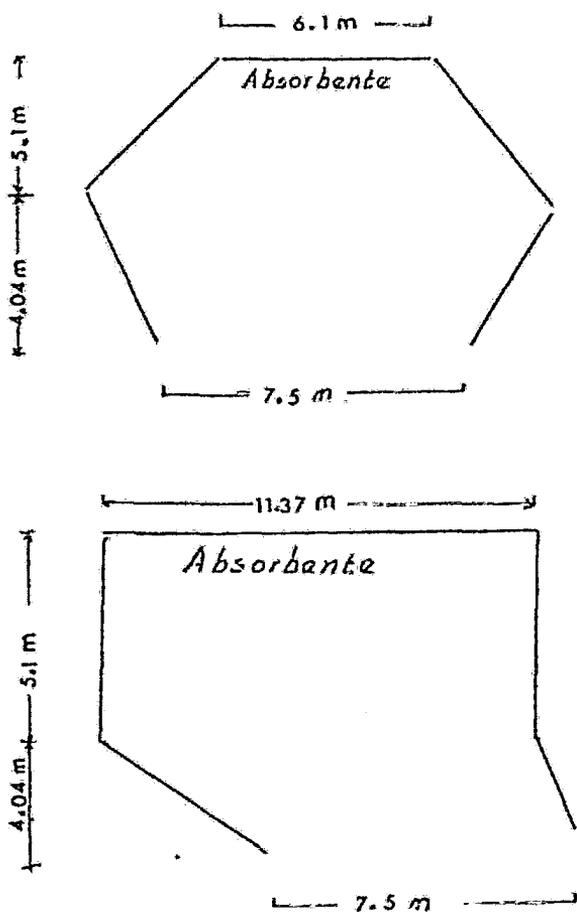
El absorbedor de McDonnell Douglas está formado por p neles de peque n simos tubos de cobre, cubiertos con superficies selectivas, como se muestra.



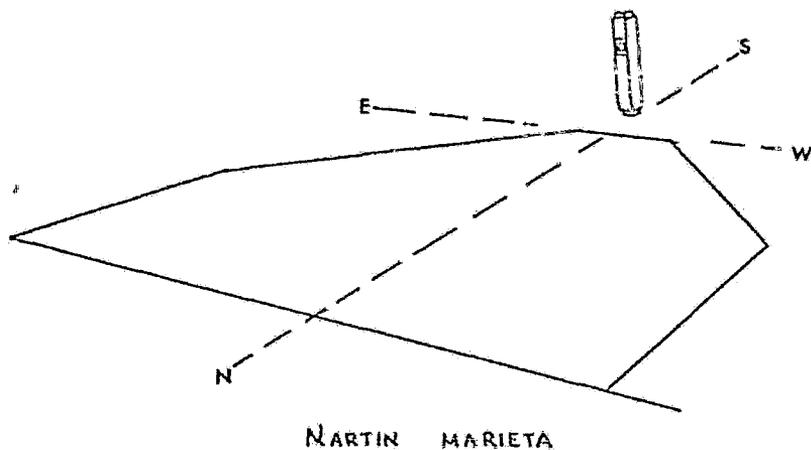
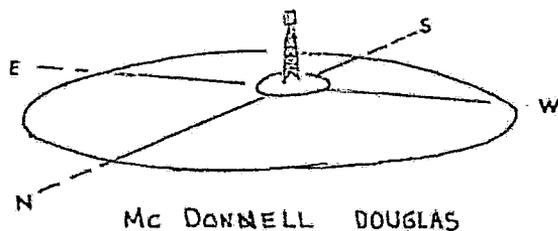
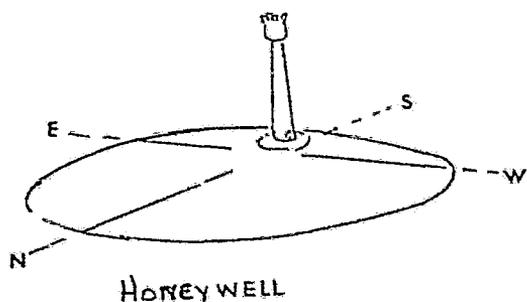
Para lograr una absorción del 98% en el absorbedor, la torre Martin Ma-
rieta presenta una cavidad, la cual disminuye las pérdidas por radia-
ción del absorbente hacia la intemperie, (presentadas en el caso de --
Honeywell y Mc Donnell).

La cavidad permite que la luz que no es absorbida en la superficie in-
terior del absorbente, sea reflejada hacia adentro en vez de hacia --
afuera, minimizando dichas pérdidas.

Las dimensiones de la cavidad son las siguientes:



La forma de colocar los espejos es de la siguiente manera:

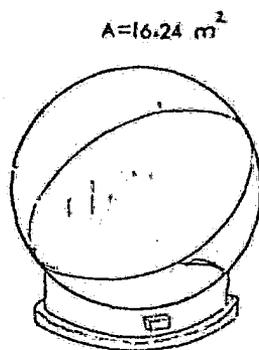


Los espejos se colocan en mayor proporción hacia el norte, y con el fin de evitar sombreamientos entre ellos se colocan separados a una distancia determinada.

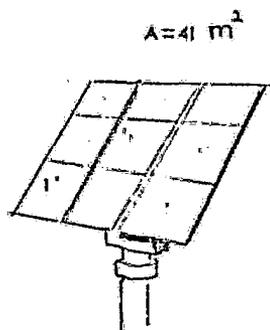
En Honeywell y Mc Donnell Douglas, como el absorbente que está sobre la torre cilíndrica, los espejos se colocan en una forma circular, para que toda el área absorbente reciba la reflexión de los espejos.

En el diseño de Martin Marieta, debido a que el absorbente está colocado dentro de la cavidad, los espejos se colocan solamente de ese lado, y orientados hacia el norte en forma de un pentágono.

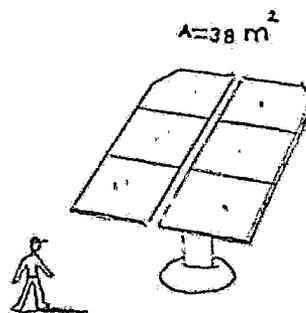
Los heliostatos o espejos utilizados por cada uno, son de la siguiente forma:



HONEYWELL



MARTIN MARIETA



Mc DONNELL DOUGLAS

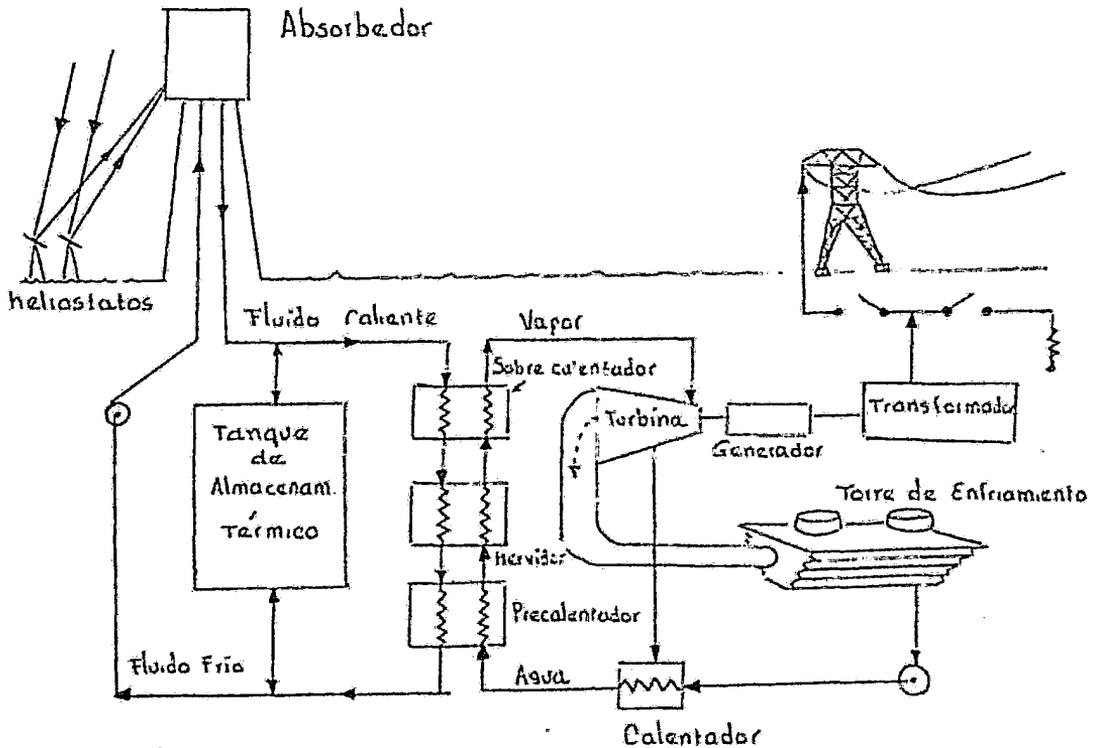
Los heliostatos usados por Honeywell, están envueltos por una membrana de plástico, para aumentar el tiempo de vida del espejo, minimizando el ensuciamiento del espejo por el polvo y ofreciendo mayor resistencia al viento, pero disminuye la reflectividad.

Algunas características de estos espejos (heliostatos) se muestran a continuación.

CARACTERISTICAS DE LOS HELIOSTATOS

	HONEYWELL De Bola	MARTIN MARIETA	Mc DONNEL DOUGLAS
Rotación de Ejes	Alt-Alzimuth	Alt-Azimuth	Alt-Azimuth
Sistemas de control	Circuito abierto	Circuito abierto	Circuito abierto
Area de espejo (m ²)	48.5	41	38
Reflectividad neta (%)	67	91	91
Máxima tensión del vidrio (PSI)	-	500	100
Peso total (Kg/m ²)	5.3	57.6	41.5
Costo/funcionamiento: (\$/Kw)			
A nivel comercial	334	247	226
En planta piloto	664	498	415
V E N T A J A S	Protegido del ambiente	Buen funcionamiento	Bajo costo
	Bajo costo del material (si se desarrolla a nivel comercial) envuelven <u>te</u> : \$13/kg.	fácil prueba experimental.	Buen funcionamiento
D E S V E N T A J A S	Bajo desarrollo por lo que no se cuenta con material de envoltura para nivel de planta piloto.	Costoso	
	La envoltura es degradable en 1%/día	Muy poco experimentado	Esfuerzo del vidrio muy alto.

Para el sistema de conversión de energía calorífica a energía eléctrica, los tres diseños utilizan el ciclo Rankine, como se muestra a continuación:



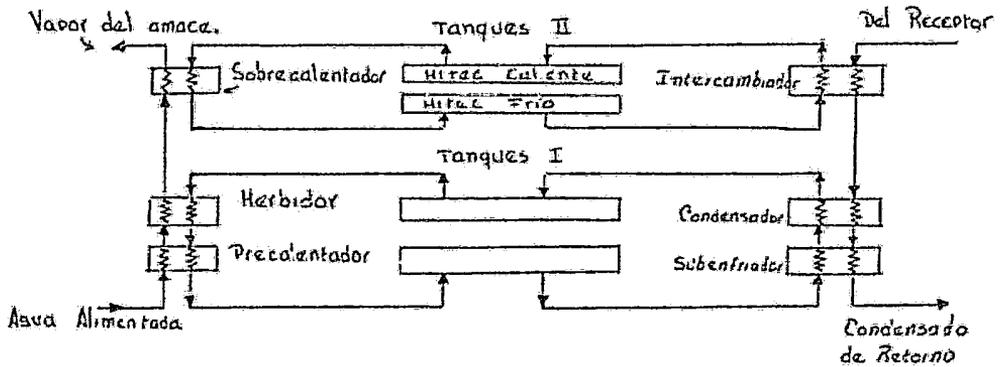
Utilizan como fluido de trabajo una sal, con elevado punto de ebullición (para no tener problemas de presión) la cual es generalmente sodio. (Punto de fusión 97.8°C , de ebullición 880°C de uso sugerido --

200-700°C) los diferentes diseños involucran también un almacenaje de energía distinto, cuyas características se enuncian a continuación:

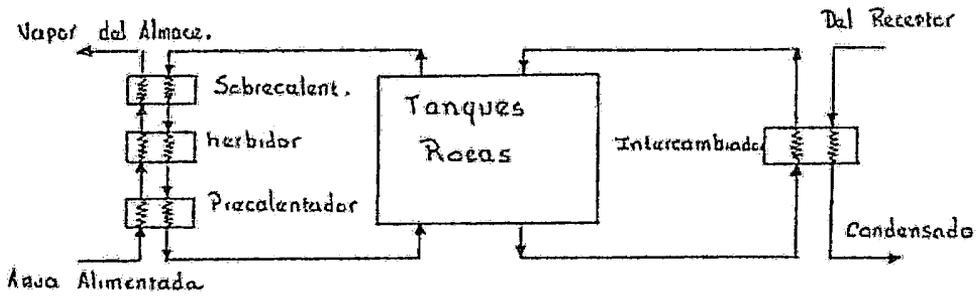
CARACTERISTICAS	HONEYWELL	MARTIN MARIETA	McDONNELL D.
Forma de Almacenamiento	Usa 2 partes que almacenan el calor sensible, un aceite/rocas -- (termocline) y sal fundida	Almacena calor sensible usando aceite y sal fundida	En forma de calor sensible usando aceite/rocas (termocline)
Condiciones de almacenamiento del vapor descargado.	3260 KPa(532psia) 390°C (735°F)	3000 KPa(435psia) 428°C (802°F)	2760 KPa(400Psia) 277°C (530°F)
Medida de almacenamiento	etapa-principal-caloría Ht -43 aceite con arena molida supercalentado - etapa H.tec.	Principal etapa-caloría HT-43 -- aceite sobrecalentado -etapa - Hitec.	Caloría H-43 aceite con arena molida y arena gruesa.
Número de tanques de almacenamiento para planta piloto	Almacenamiento principal-1 Sobrecalentados-2	Almacena.Princ-2 Sobrecalentados-2	1

El sistema de los diferentes diseños es mostrado en el diagrama de flujo siguiente:

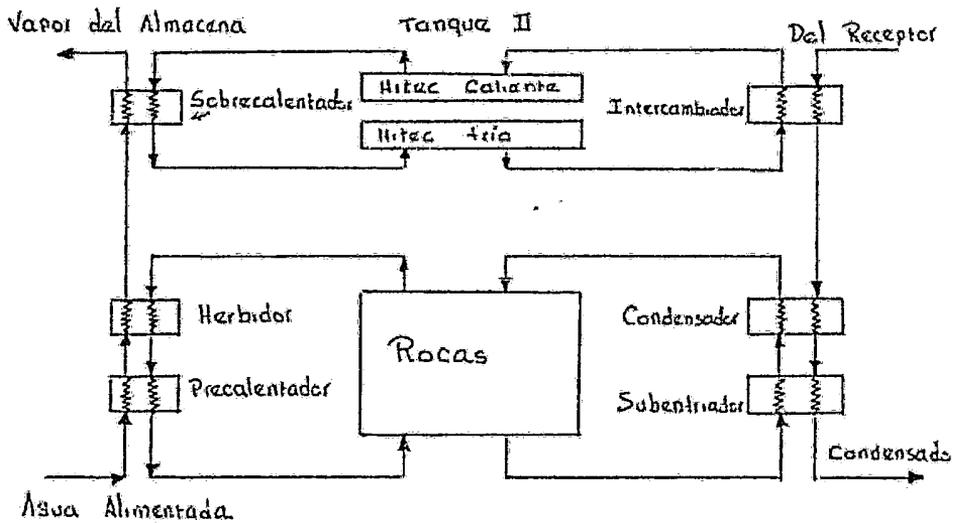
ALMACENAJE TERMAL DE MARTIN MARIETA



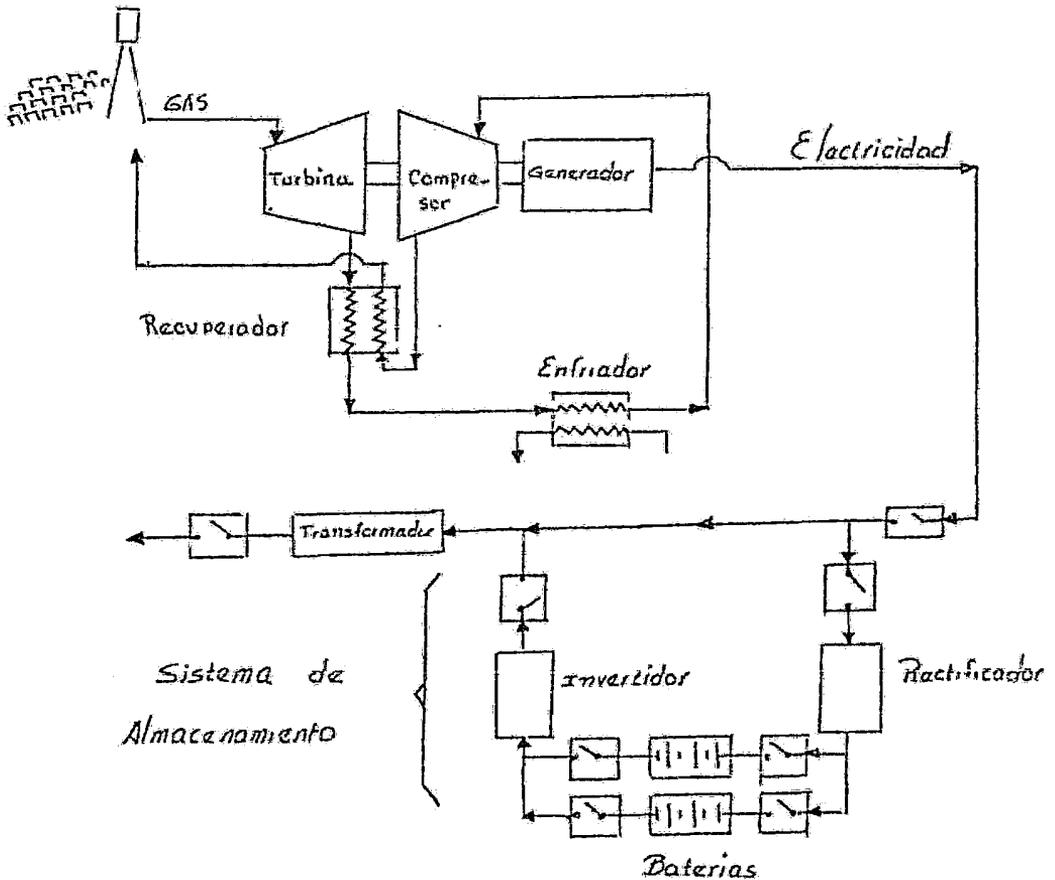
ALMACENAJE TERMAL Mc DOBNELL D.



ALMACENAMIENTO DE HONEYWELL



También se utiliza como fluido de trabajo, un gas (aire o helio), en el cual todo el sistema concentrador es prácticamente el mismo, lo que va ría son, el sistema de conversión que ahora utiliza un ciclo Brayton - con regeneración, y el sistema de almacenamiento que es a base de Baterías Red-ox, como se observa en la figura siguiente:



También se obtienen potencias del orden de 10 Mwe, esperando ampliarse a una planta comercial de 300 Mwe.

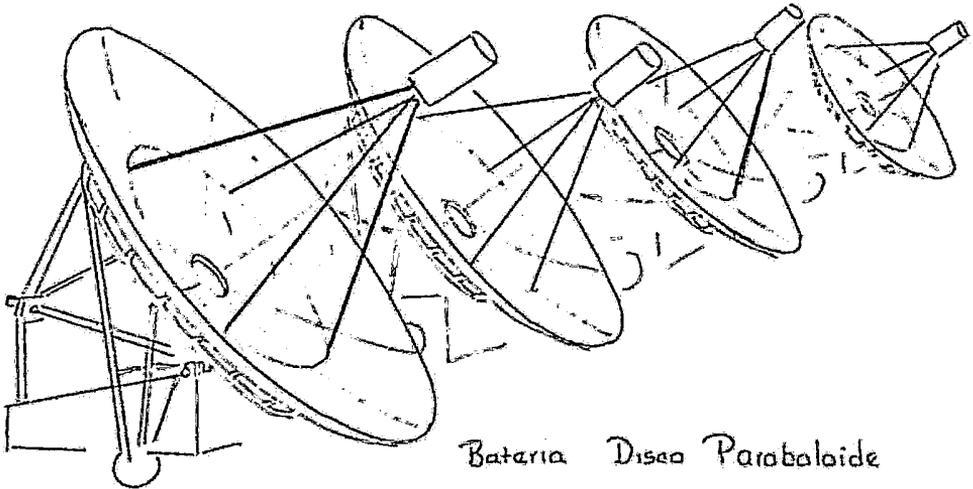
En base a los estudios y resultados obtenidos de las plantas piloto, - se están planteando nuevos sistemas para obtener energía eléctrica a - un nivel comercial.

La tabla nos resume las características nuevas de una planta comercial con respecto a una planta piloto.

CARACTERISTICA	PLANTA PILOTO	PLANTA COMERCIAL
Capacidad dada por el Receptor	10 Mwe	100 Mwe
Capacidad dada por el almacenamiento	7 Mwe	70 Mwe
Tiempo de almacenaje	3 hrs	6 hrs
Disponibilidad de la planta	90%	90%
Tiempo de vida operacional	30 años	30 años
Diámetro del receptor	7 m	17 m
Altura del receptor	12.5 m	25.5 m
Método de almacenamiento	1 sólo tanque (termocline)	(termocline)
Rango de Temp. de almacenaje	(219-302°C)	(232-316°C)
No. de heliostatos	1760	-
Altura de la torre total	80 m	-
Campo del colector	304 x 10 ³ M ²	-
Area reflectiva/espejo	38 m ²	380 m ²
Costo de la planta por Kw producido (\$/Kw)	415	226

Sistema Disco Paraboloides

Este sistema está formado por concentradores de disco paraboloides, los cuales concentran la luz solar en el foto absorbente en donde se encuentra el fluido de trabajo, el esquema siguiente nos muestra este tipo de sistema.



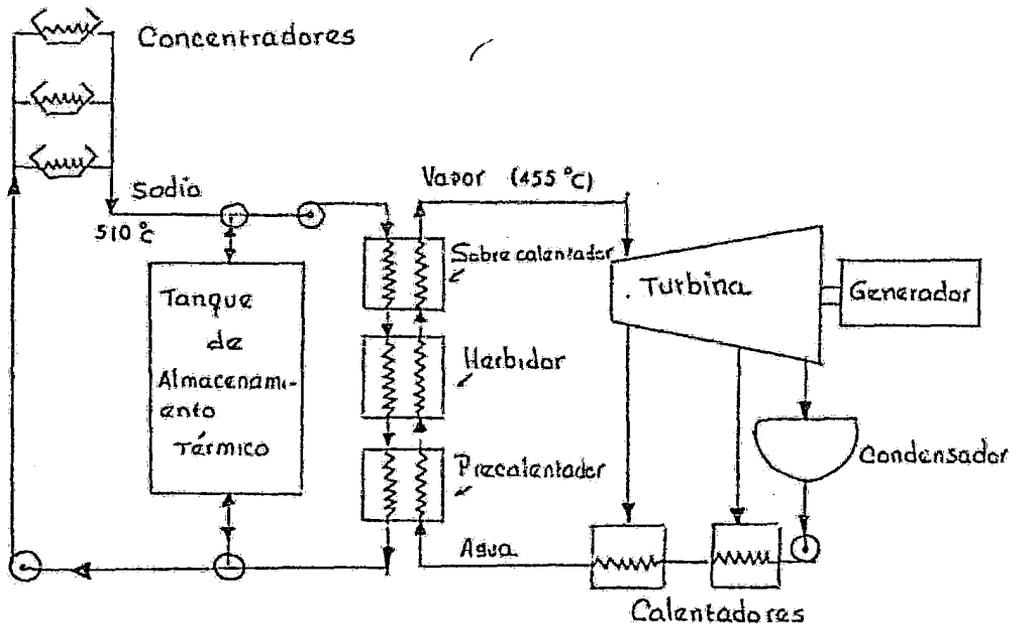
Están orientados hacia el norte, con un sistema de seguimiento de sol en dos ejes, uno para la orientación estacional (debido a la posición de la tierra) y la otra para la orientación diaria (desde que sale el sol hasta que se mete).

El tamaño del disco es de 10 m de diámetro (33 ft) y cuya superficie - está cubierta por una delgada capa de vidrio de plata.

La estructura de cada paraboloides es completamente sólida, de cemento armado y vigas con esfuerzo de acero, para soportar el peso y la fuerza del viento.

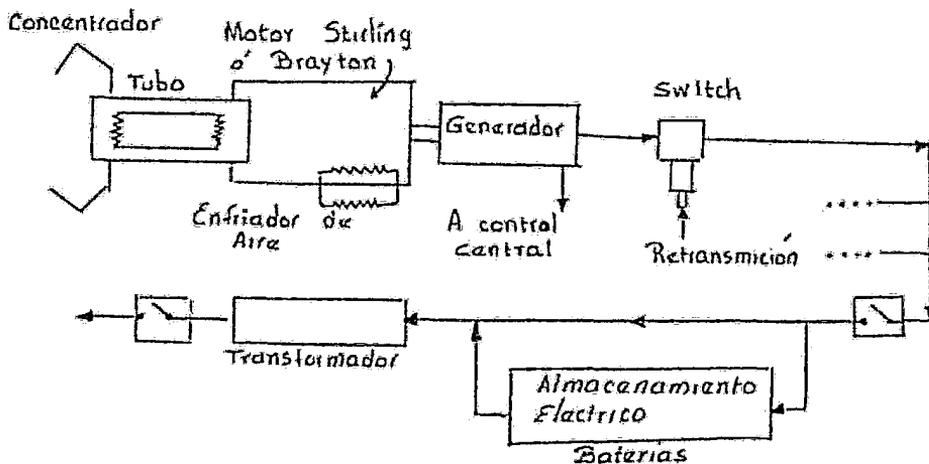
Este sistema presenta muchos inconvenientes desde todos los puntos de vista, excepto en el rendimiento (tiene el más alto rendimiento de todos los colectores).

Utiliza un ciclo Rankin para el subsistema de conversión, el sistema de varios discos, por donde circula una sal de sodio como fluido de trabajo, están conectados en serie, el fluido de trabajo caliente, se hace pasar por intercambiadores en donde cede su calor al agua convirtiéndola en vapor, el cual pasa por la turbina generando un trabajo, el que se aprovecha para mover el generador produciendo electricidad, como se muestra a continuación.



Como este sistema se producen de 1 a 10 Mwe, el sistema de almacenamiento es en forma termal en tanques donde se contiene una Sal Hitec, la cual es utilizada como medio de almacenamiento.

También se utiliza un motor Stirling o Brayton como convertidor de energía el cual está adaptado en el mismo disco, de tal forma que cada disco produce 15 Kwt de electricidad.

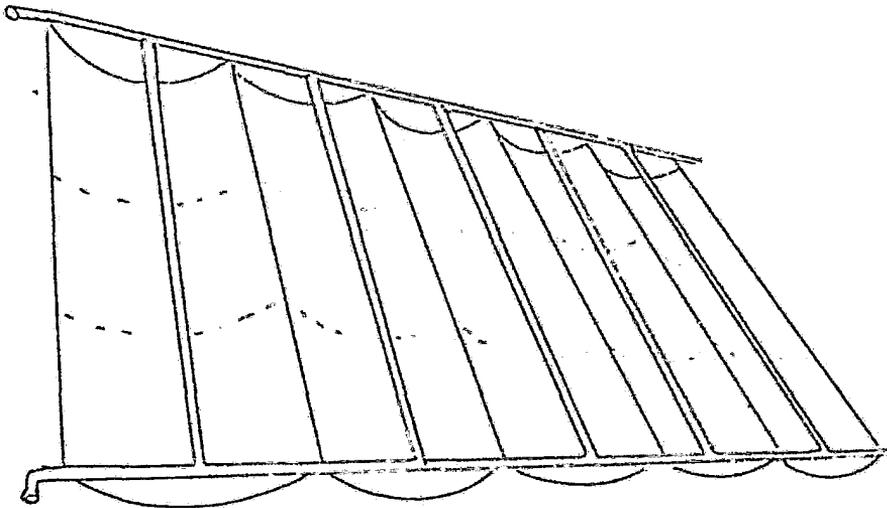


Utiliza como fluido de trabajo un gas (aire), presentando la ventaja, de no llevar tubería por donde circula el fluido de trabajo de un disco a otro, como el caso del sistema Rankine (el que se presentan muchas pérdidas de calor).

A causa de la dificultad de un almacenamiento térmal dentro del sistema, se utiliza un almacenamiento en forma de energía eléctrica.

Sistema concentrador parabólico lineal

Este sistema está formado por varios concentradores lineal parabólico, orientados hacia el sur, con una inclinación no muy diferente a la latitud de la localidad, como se muestra a continuación:

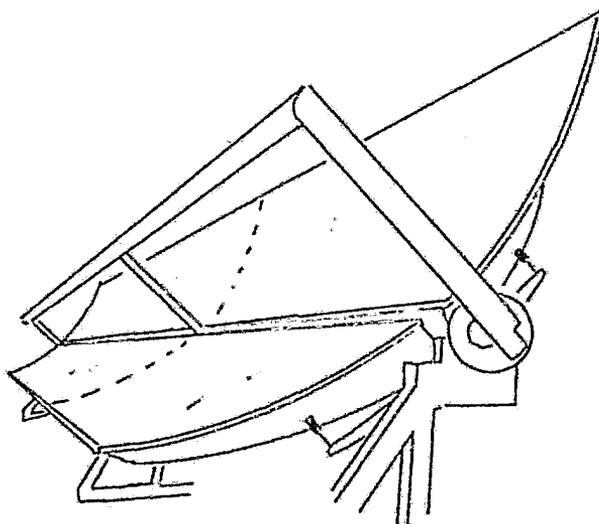


Bateria de Parabolico lineal vertical.

En Alemania se está estudiando este sistema, formado de una superficie reflectiva del 85%, operando a una temperatura de 300°C, con una eficiencia del 60% y produciendo 15 Kw.

Utiliza como fluido de trabajo un aceite térmico y como subsistema de conversión un ciclo Rankine, así como un sistema de almacenamiento -- térmico (sal Dontherm A como almacenador).

También se está estudiando el tipo paraboloides lineal colocado en forma transversal, como se muestra a continuación:



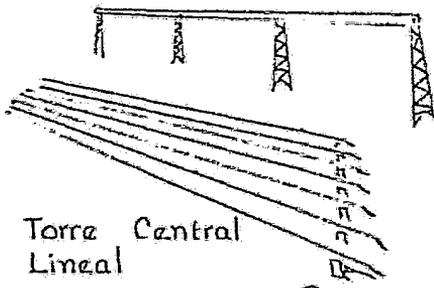
Concentrador Parabólico lineal Horizontal

Produciendo 32 Kw, está orientado de hacia el norte midiendo 1.2 m de ancho con un área de 60 m^2 .

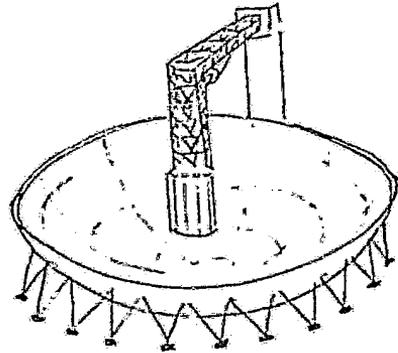
El sistema de seguimiento es en una sola dirección, la superficie reflectiva está formada por una capa delgada de plata sobre vidrio.

El absorbente está dentro de un tubo a vacío para evitar las pérdidas por conducción.

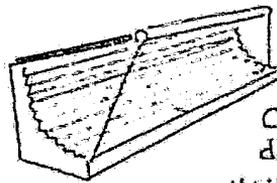
En general en los laboratorios sandía se están estudiando varios sistemas a nivel planta piloto como se muestra a continuación:



Torre Central
Lineal
Utiliza un ciclo Rankine
(1-10 MWe)



Casquete Semi-esférico Fijo
Utiliza un ciclo Rankine
(1-10 MWe)



Concentrador Parabólico
de espejos Fijos
Utiliza un ciclo Rankine
(1-10 MWe/día)

Todos para producir de 1-10 Mwe y posteriormente en el futuro 100 Mwe, utilizando sistemas convencionales de conversión ciclo Rankine, porque es el más eficiente y económico ya que utiliza una turbina que es movida por vapor de agua (el agua es muy barata y de propiedades óptimas)-aunque presenta ciertas desventajas, como la corrosión en las aspas de la turbina.

Para evitar problemas de corrosión así como para aumentar la eficiencia, se utilizan fluidos orgánicos en vez de H_2O , calor latente bajo, de manera que con poca energía se puede tener vapor recalentado, además de que no son corrosivos.

Los sistemas de este tipo, utilizan prácticamente los mismos concentradores antes vistos (torre central, disco parabólico, casquete semiesférico, paraboloide lineal, etc.) pero con medidas más pequeñas, así como una turbina para fluidos orgánicos.

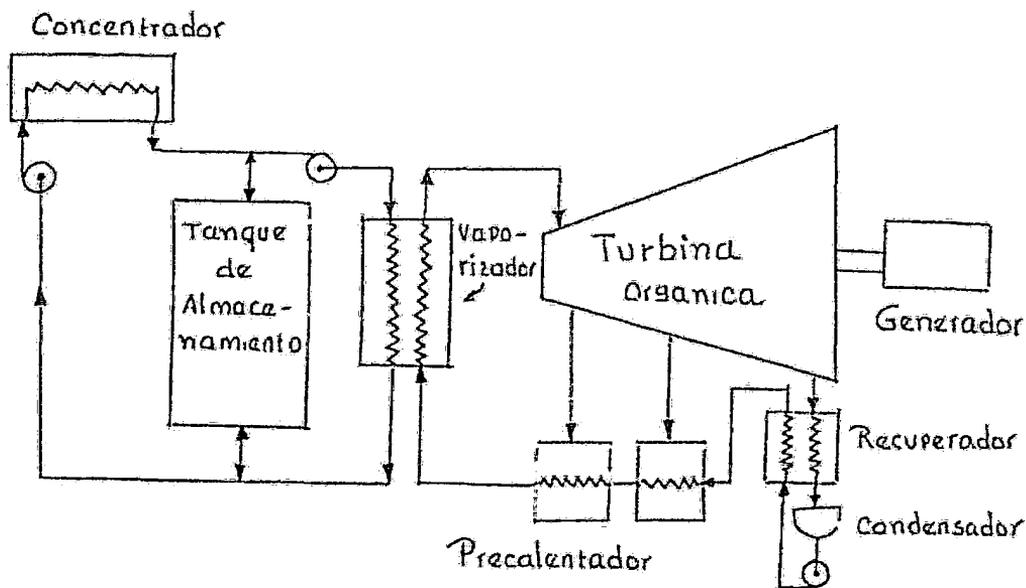


Diagrama de Flujo de un sistema con turbina orgánica

- Los fluidos son generalmente tolueno, freón, etc., los cuales tienen bajo punto de ebullición, pero son muy caros comparados con el agua.

Con estos sistemas se están generando potencias de 0,1 a 1 Mwe debido al alto costo del fluido, y del vaporizador.

En México, el Instituto de Ingeniería de la UNAM desarrolló un generador solar de 1 Kw, formado por concentradores cilindro parabólico, de una área total de 30 m^2 , el tubo absorbente está dentro de un tubo de vidrio Pyrex a vacío (10^{-2} torr), para minimizar las pérdidas por conducción.

El fluido de trabajo es agua, la cual pasa por los tubos absorbentes - llegando a la temperatura de 200°C y una presión de 3 atm, el fluido se alimenta a un motor de pistones que está concentrado a una bomba de -- agua.

Actualmente se está desarrollando un mayor sistema del mismo tipo, con una área de 1000 m^2 .

El sistema de conversión estará basado en un ciclo Rankine, en el cual el fluido de trabajo será un aceite calentado a 250°C que se hará pasar por un intercambiador para producir vapor de agua saturado a 180°C el cual moverá la turbina.

3.2 PANORAMA COMPARATIVO ENTRE LAS FUENTES DE ENERGIA MAS UTILIZADAS

PETROLEO

Ventajas: por su fácil empleo es el más empleado, además de ser más barato de transportar que el gas, carbón, o la electricidad.

Desventajas: Debido a su agotamiento la extracción se hace cada día más difícil, por lo que se tiene que buscar en los Océanos, los cuales a causa del derramamiento del petróleo originado en la extracción, se produce una contaminación que causa graves pérdidas en la fauna marina. Además, las refinerías están instaladas en las zonas costeras ocupando grandes extensiones (de 4 a 6 Km² para una central de 200 000 barriles por día) y originando contaminación local por la emisión de hidrocarburos.

GAS NATURAL

Ventajas: Es bastante barato (en 1974, 0.35 ¢ /Kwh térmico).

Desventajas: Las reservas son similares a la situación del petróleo, además de que su transporte por mar implica una inversión suplementaria, a causa de la necesidad de licuefacción.

ACEITE DE ESQUISTOS

De una roca que contiene materia orgánica, localizada en el Colorado - EE UU, se obtiene dicho aceite, al calentar estas rocas a 500°C.

Ventajas: Muy parecido al petróleo común, en su comodidad de empleo.

Desventajas: Una tonelada de rocas rinde sólo 25 gal, de aceite, por lo tanto, la producción de petróleo de esquistos a razón de un millón de barriles por día, producirá 1.7 millones de toneladas de residuos sólidos, y se removerán aproximadamente 100 Km² de tierra, la cual implica un elevado consumo de agua, que es muy escasa en esas áreas.

La producción a gran escala ocasionaría una gran salinidad en el agua de los ríos y emisión de dióxido de azufre al aire.

Presenta además problemas de refinado y se emplea mucho tiempo y dinero para eliminar el alto contenido de nitrógeno que posee este combustible.

CARBON

Ventajas: Se cuenta con bastantes reservas aún para los 200 años siguientes, además de ser más barato que el petróleo por unidad de energía.

Desventajas: Por la incomodidad de su empleo es menos usado que el petróleo, muy contaminante al quemarse ya que emite SO_x que en contacto con el agua reacciona formando ácidos el cual es perjudicial para la salud. Como no puede ser refinado, no se puede extraer el azufre antes de la combustión, además de que el transporte es muy costoso -- (por tren, 10 Dlls/100 Km y por Ton).

GAS Y PETROLEO A PARTIR DE CARBON

Ventajas: Los contaminantes del carbón pueden ser eliminados antes o después del proceso, su transporte sería más barato y los productos resultantes son más fáciles de usar, que el mismo carbón.

Desventajas: El costo del proceso es muy elevado, así como el rendimiento de transformación es limitado.

ENERGIA NUCLEAR

Ventajas: El combustible (Uranio) muy barato en el mercado, de fácil transporte y almacenamiento en grandes cantidades en resumen es una de las fuentes más baratas en el mercado.

Desventajas: Es muy riesgosa en cuanto a la manipulación de radioactividad, además de que los reactores no ofrecen una solución a largo pla

zo a los problemas energéticos, ya que las reservas de uranio (u otro material radioactivo) no durarán más que el petróleo).

ENERGIA GEOTERMICA

Ventajas: Muy barata y de fácil extracción.

Desventajas: Muy contaminante por la emisión de gases nocivos, además de que es bastante ruidosa.

Sólo está restringida a ciertas regiones del mundo, en los EE UU, las zonas prometedoras están en California, y Las Montañas Rocosas donde la demanda es muy escasa debido a la baja densidad de población en esos lugares.

ENERGIA SOLAR

Ventajas: NO CONTAMINA EL AMBIENTE, FUENTE INAGOTABLE, Gratita, etc.

Desventajas: Poco estudiada debido a las restricciones Políticas.

3.3 CONCLUSIONES

Los componentes de este sistema de conversión de potencia, a partir de la energía solar, son prácticamente los mismos que forman a una planta de energía termoeléctrica común, con la única diferencia en la unidad de generación de vapor, la cual es una caldera solar para las plantas generadoras solares.

La función, por tanto, de estos concentradores a grandes rasgos, es -- elevar la temperatura del llamado fluido del trabajo para producir vapor, aprovechando la radiación solar.

Esto lo logran en base a dos propiedades físicas, una es la propiedad de cuerpo negro que absorbe la radiación solar en forma de calor, y -- la reflectividad de los espejos o refractividad de lentes para mandar la mayor cantidad posible de radiación hacia ese cuerpo negro, por lo que consta de un emisor que manda la mayor cantidad posible de radiación solar (espejo o lentes) y un receptor (cuerpo negro), que absorbe esa radiación emitida.

Los sistemas de obtención de potencia a partir de la energía solar a baja escala, aún no pueden ser competitivos con los sistemas convencionales y es que aunque los componentes de las generadoras comunes y solares son prácticamente los mismos, no es lo mismo una caldera de

vapor que un concentrador, debido al costo de los soportes y espejos - de que está compuesto, así como la cantidad de tubos, seguidores solares con sus mecanismos manuales y automáticos, y la necesidad de un almacenamiento de energía para hacer más contínuo el sistema por la noche.

Pero notablemente los concentradores están basados en sistemas muy simples y que por razones más que nada políticas, no se han producido a - grande escala, en donde serían más costeables e incluso sustituto de - plantas comunes.

CAPITULO IV

PARTE EXPERIMENTAL

TANQUE DE ALMACENAMIENTO TERMICO

INDICE DE LA PARTE EXPERIMENTAL

	Pág.
INTRODUCCION.....	108
OBJETIVOS.....	110
DESCRIPCION DEL SISTEMA.....	111
MATERIALES.....	113
CONSTRUCCION.....	117
METODOLOGIA Y PRUEBAS.....	123
A) Pruebas para encontrar la mayor estratificación.....	124
Resultados del Registrador para esta prueba.....	127
Cálculos.....	178
Resultados de los cálculos.....	189
B) Pruebas con el tanque en su mayor estratificación.....	190
Resultados del Registrador para esta prueba.....	193
Cálculos y Resultados.....	197
C) Pruebas del calor entregado por el tanque en su mayor almacenamiento.....	202
Resultados.....	205
CONCLUSIONES.....	207
RECOMENDACIONES.....	209

INTRODUCCION

El almacenamiento de energía calorífica, como ya se explicó anteriormente, tiene por objeto guardar parte del calor producido por un sistema concentrador en el tanque de almacenamiento, hasta que se requiera de su utilidad, para así poder hacer más continuo el sistema y/o aumentar la capacidad del mismo.

Dentro de los sistemas de almacenamiento de energía calorífica, existe uno muy sencillo, el cual utiliza agua como fluido de almacenamiento, es de fácil construcción, además de que el agua es abundante, barata y de propiedades muy conocidas.

La cantidad de calor que se puede almacenar en estos tanques, las pérdidas de energía que sufre, así como el tiempo de carga, descarga y almacenamiento de energía son fenómenos de gran importancia que se deben conocer, tanto para las condiciones óptimas requeridas, como para el diseño.

Por lo que, el principal objetivo de esta parte de la tesis, está encaminada a estudiar el comportamiento de estos fenómenos en un tanque de almacenamiento térmico cuyo fluido de trabajo es agua.

Por otro lado, para que el calor almacenado permanezca guardado en el tanque el mayor tiempo posible (tiempo de almacenamiento) sin presentar muchas alteraciones, existe una técnica basada en la formación de

zonas a diferentes temperaturas en el interior del tanque (llamada estratificación) una caliente en el domo y la otra zona fría en el fondo del mismo.

Esto permite que el calor guardado en la zona caliente (una vez terminado el suministro de calor hacia el tanque) se difunda poco a poco hacia la zona fría en vez de hacia el exterior, logrando que no se pierda calor, sino que quede almacenado.

Si el tanque no estuviera estratificado sino que tuviera una temperatura homogénea en todo el interior, entonces el calor guardado se difundiría hacia el exterior ocasionando pérdidas.

Por lo que se trata de obtener una mayor estratificación para lograr almacenar el calor un tiempo mayor sin grandes cambios (pérdidas).

Se construirá un tanque de almacenamiento térmico, cuyas características físicas serán conocidas (altura, volumen, espesor del aislante, -- diámetro, etc.) y se le medirán los fenómenos anteriores, con los cuales se obtendrá un patrón del que se partirá para predecir y mejorar la eficiencia y diseño de tanques térmicos ya construídos o que están por construirse, y cuyo fluido almacenador es agua.

OBJETIVOS

- 1) Cantidad de calor almacenado
- 2) Pérdidas de calor durante el almacenamiento (noche)
- 3) Tiempo de almacenamiento
- 4) Tiempo de carga y descarga de calor
- 5) Cantidad de calor de descarga
- 6) Gráficas de estratificación, comportamiento del tan que bajo estas condiciones y optimización.

DESCRIPCION DEL SISTEMA

Se construirá un tanque en el que se almacenará el calor entregado por un colector solar, como se muestra a continuación:

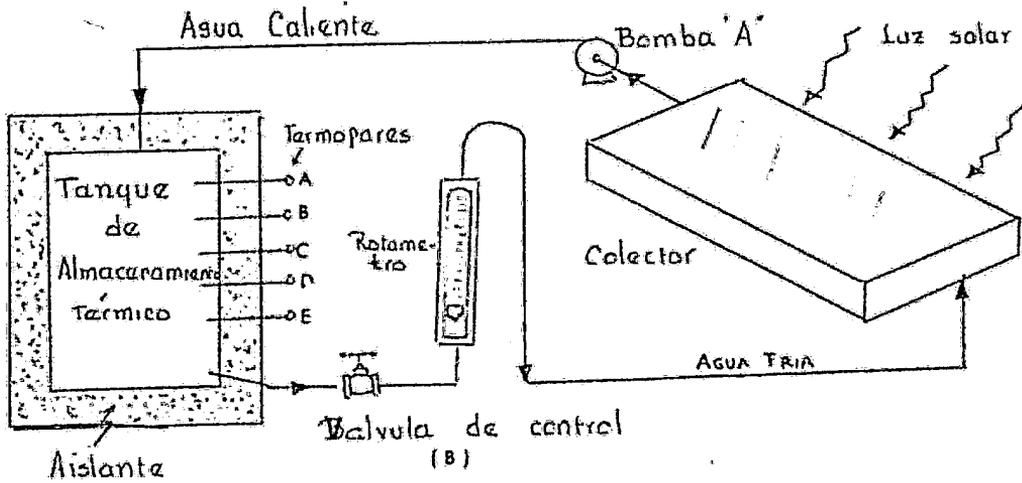


Diagrama de Flujo del sistema

El tanque estará aislado completamente para evitar en lo mayor posible las pérdidas por radiación, y para medir las temperaturas interiores del tanque, se le colocarán unos termopares que mandarían señales a un registrador en donde se graficarán las temperaturas a lo largo del día.

El fluido de trabajo (agua) se hará pasar a través de un colector por medio de una bomba (A) y a una velocidad determinada observada en un rotámetro y obtenida por medio de una válvula de control (B).

Una vez que se tenga almacenado una cierta cantidad de calor durante una prueba, se descargará dicho calor para obtener qué tan eficiente es, por lo que se contará también con un intercambiador de calor, como se muestra en el siguiente diagrama de flujo.

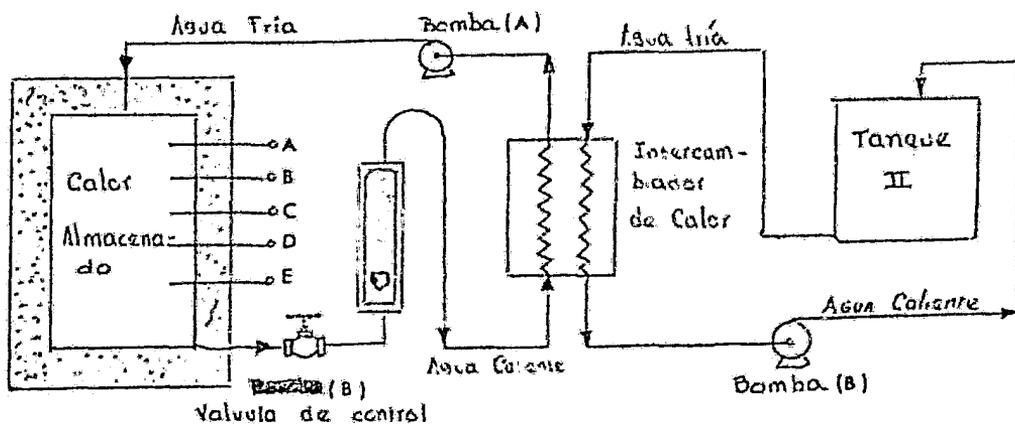


Diagrama de Flujo del tanque para descarga de Calor

El intercambiador presentará características ya conocidas para la facilidad de obtención del tiempo y cantidad de calor de descarga, por él se hará pasar el agua caliente del tanque de almacenamiento por medio de la misma bomba (A) y cederá su calor a otro fluido (agua fría) que provendrá de otro tanque (II) que será forzado a pasar por el intercambiador por medio de una segunda bomba (B).

MATERIALES

- 1) Como tanque almacenador se utilizó un tambo de lámina galvanizada, de 2 mm de espesor totalmente cerrado, con un volumen de 200 lts., 87.5 cm de altura y 57.5 cm de diámetro ($A=2.12 \text{ m}^2$).
- 2) Tres metros de aislante de 3 cm de espesor de fibra de vidrio.
- 3) Un tambo de aluminio utilizado como forro del tanque cuando ya esté aislado, de 1.10 mts. de altura, 65 cm de diámetro y un espesor de 1.5 mm.
- 4) Cinco termopares con resistencias de platino, PT 100 con calibraciones de $10 \text{ mv} = 1^\circ\text{C}$.
- 5) Un módulo (construido y utilizado para fines de medición de eficiencia de colectores en el Departamento de energía solar DIGAASES) el cual contiene una red de tuberías conectadas por medio de válvulas de paso a un rotámetro (con escala de 1 a 10 lts/min), - al colector y a un* intercambiador de calor con las características siguientes:

RW-1/2-II

FNr = 150

BJO = 80

P = 10 Bar

T = 150 C

*Dos intercambiadores conectados en serie cada uno con:

A = 0.197 m^2

Q = 26 000 W,a

fluido caliente

 $T_1 = 75^\circ \text{C}$

W = 1150 kg/h

fluido frío

 $T_1 = 10^\circ\text{C}$ $T_2 = 45^\circ\text{C}$ $W^2 = 640 \text{ kg/h}$

- 6) Dos tubos de PVC de 1/2" de 4 mts. cada uno.
- 7) Ocho codos de PVC de 1/2" y 2 coples de fierro (1/2").
- 8) Cuatro Tes de PVC de 1/2" y 5 coples de plástico (1/2").
- 9) Tres reducciones de 1/4" galvanizadas.
- 10) Tres tuerca unión de PVC de 1/2" de in
- 11) Una bomba modelo 3E-12N de 1 HP y 500 GPM para hacer circular al -
fluído a través del colector (bomba A).
- 12) Una bomba de 1/4 HP para mover el fluído frío a través del inter-
cambiador (Bomba B).
- 13) El colector de tubos de cobre tipo M (diámetro 1/2") cabezales de
1 1/2", 5 tubos espaciados 14.6 cm, placa de 88 x 2.60 cm, aislante
de fibra de vidrio de 1" de espesor, altura , ancho ,
área =
- 14) Diez mts de aislante para tubería (tipo esponja).
- 15) Dos mts de manguera de 1/2"(in)para conección.
- 16) 10 mts de extensión para luz.
- 17) Un contacto y 2 clavijas.

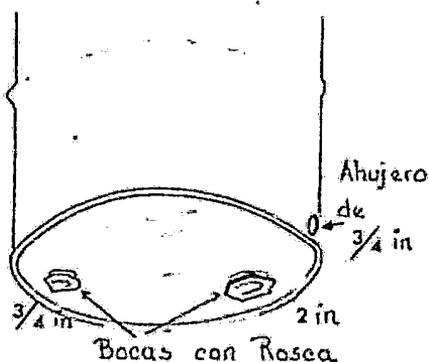
- 18) Tres llaves de paso.
- 19) Un tanque de plástico para el agua fría (tanque II) de una altura de 51 cm y diámetro de 34 cm.
- 20) 1/2 tanque para usarlo como enfriador de la bomba A que es de fuente y necesita un medio de enfriamiento, con una altura de 25 cm y 31 cm de diámetro.
- 21) 4 mts de ángulo perforado, para elevar a los tanques a una altura determinada del suelo.
- 22) 30 abrazaderas para aislante de tubería.
- 23) Un rollo de Masking-tape No. 121, (12 mm de espesor) para forro del aislante.
- 24) Una cinta de teflón para sellar las cuerdas de tubería y evitar goteras.
- 25) Un tubo de silicón para sellar goteras en los tanques.
- 26) Tornillos de (1/4) x 1", para ensamblar el ángulo y formar 2 bancos en donde irán los tanques.
- 27) Resina Epoxi para fijar y soldar plástico en lámina.

- 28) Un registrador DORNIER SONNILAN, el cual recibe y grafica en papel graficador las señales de los termopares, además de la temperatura ambiente y la insolación recibida durante el día (por un piranómetro).

- 29) Un piranómetro el cual medirá la insolación recibida durante la prueba mandando las señales hacia el registrador.

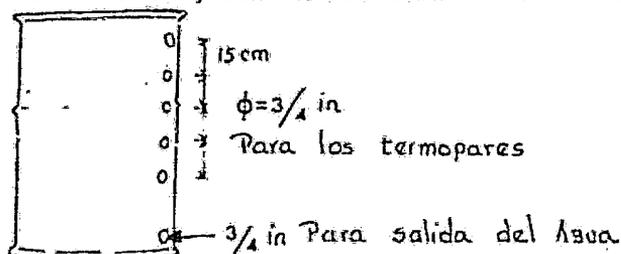
CONSTRUCCION DEL TANQUE

El tambo de 200 lts-se limpi6 cuidadosamente en su interior, y se procedi6 a perforarlo por un costado en la parte inferior (estando las bocas del tanque hacia abajo) con un diámetro de $3/4''$, el cual se utilizará como salida del agua hacia el colector.

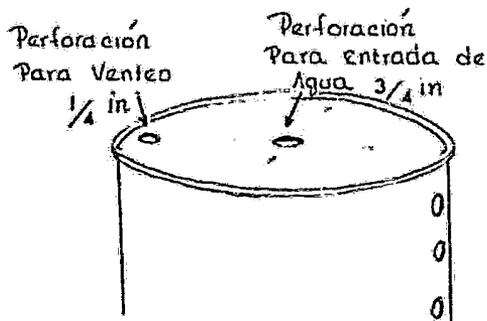


Las bocas del tanque están hacia abajo para poder utilizar la boca de $3/4''$, como purga -- del tanque aprovechando la rosca que ya tiene.

En el mismo lado se hicieron otras 5 perforaciones para colocar los 5 termopares, separados, 15 cm cada uno, con un diámetro de $3/4$ de in.

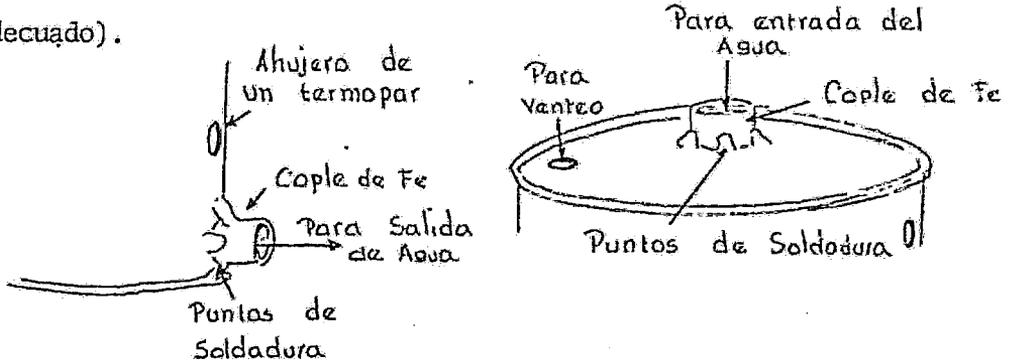


En la parte superior se hicieron dos perforaciones, una en el centro -- con un diámetro de $3/4''$ para utilizarla como entrada del agua, y la --



otra en la orilla, con un diámetro de $1/4''$, y del lado contrario a las perforaciones anteriores, para utilizarla como venteo, y mantener el tanque a la presión atmosférica.

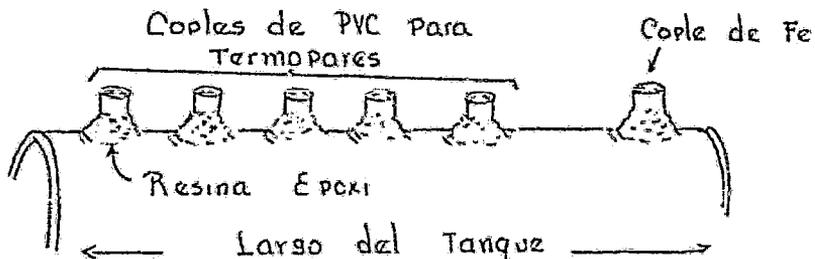
En las perforaciones destinadas a la salida y entrada del agua, se colocaron en cada una, un cople de fierro galvanizado de 1/2" de diámetro interior y se puntearon con soldadora eléctrica en derredor (no se soldaron en una forma completa al tambor, debido a la falta de equipo adecuado).



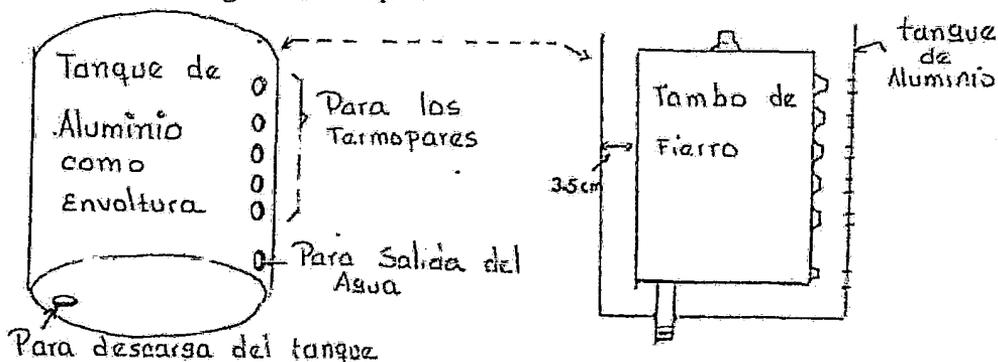
Para evitar fugas de agua y dar mayor consistencia en las parte no soldadas, se le colocó alrededor Resina Epoxi, que una vez seca adquiere una consistencia muy fuerte.



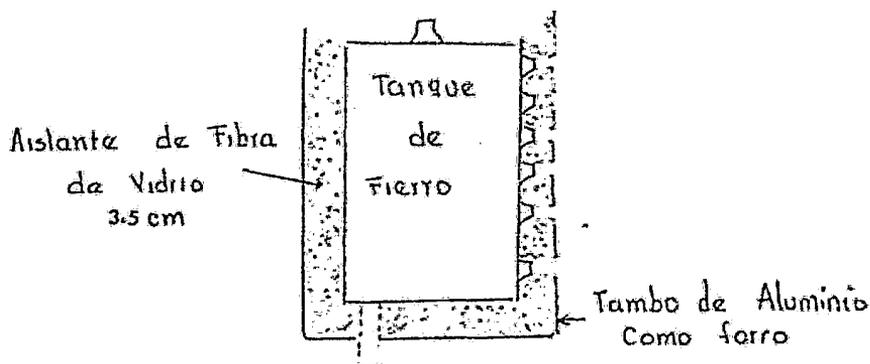
Para colocar los termopares, en las 5 perforaciones se adaptaron 5 coples de PVC (no se contaba a la mano con coples de fierro) pegados con Resina Epoxi, con 1/2" de diámetro interior.



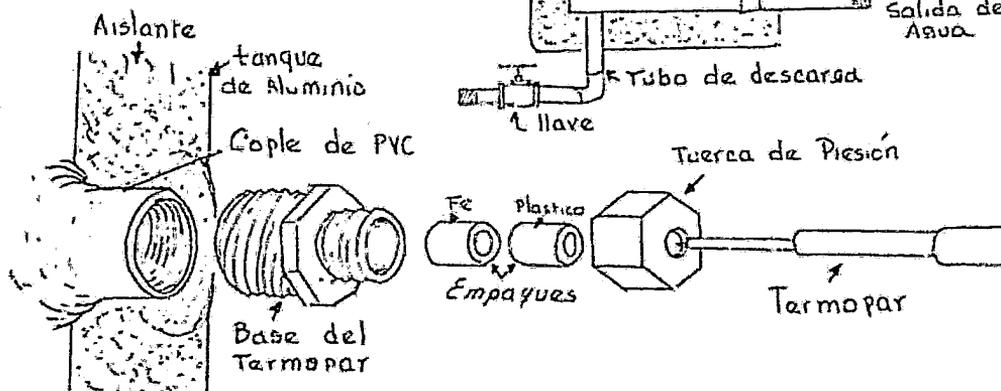
Después se perforó el tanque de aluminio que servirá de forro, para permitir las conexiones de los termopares, la salida del tubo de agua y el tubo de descarga del tanque.



El tanque de fierro se forró con el aislante de fibra de vidrio de tal manera que queda un grosor del aislante de 3 cm, alrededor y en la parte inferior del tanque, después se coloca dentro del tanque de aluminio procurando que los agujeros del forro de aluminio queden en la dirección de los coples pegados al tanque de fierro.

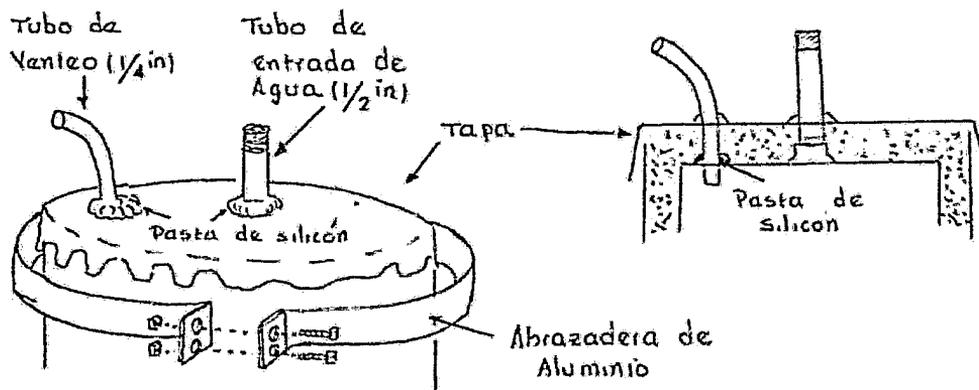


Después se colocó un niple de 15 cm de 3/4" en la descarga del tanque, con un codo y su llave de paso, en la salida del agua se coloca un niple de 15 cm de 1/2" y en donde van los niples de PVC se colocan las bases de los termopares.



Después se hizo una tapadera de aluminio, a la cual se le hicieron 2 perforaciones en donde se pudiera colocar el tubo de entrada de agua (que mide 15 cm de largo y 1/2" de diámetro) y el tubo de venteo de 20 cm de largo y 1/4" de diámetro, se rellena de aislante el espacio entre la tapadera y el tambo, sellando con silicón los espacios entre el tubo y los agujeros de la lámina para evitar la entrada de agua al aislante en época de lluvias.

Se hace una abrazadera de aluminio, la cual se coloca alrededor de la tapa para presionarla y asegurarla.



Al módulo que contiene al intercambiador de calor y al rotámetro conectado por válvulas de paso, se le hicieron varias modificaciones y adaptaciones (se le quitó un cople y adaptaron 2 llaves con un bypas) tratando de obtener un sistema en donde se pudiera aprovechar los dispositivos lo más posible sin modificar al módulo en gran parte.

Con las modificaciones hechas se llegó finalmente, que el módulo presentará el siguiente diagrama de flujo.

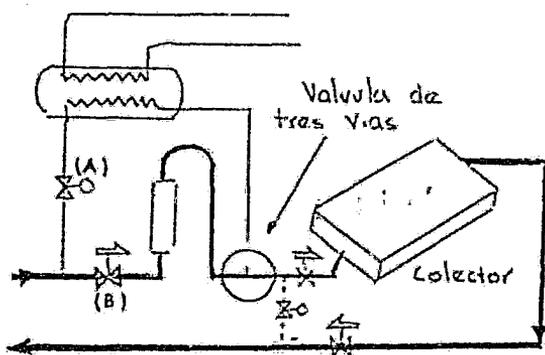


Diagrama Para almacenar calor

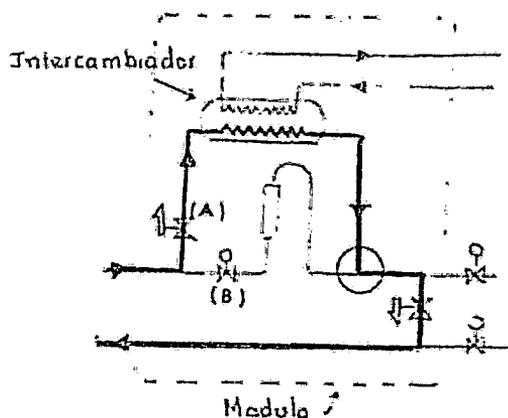
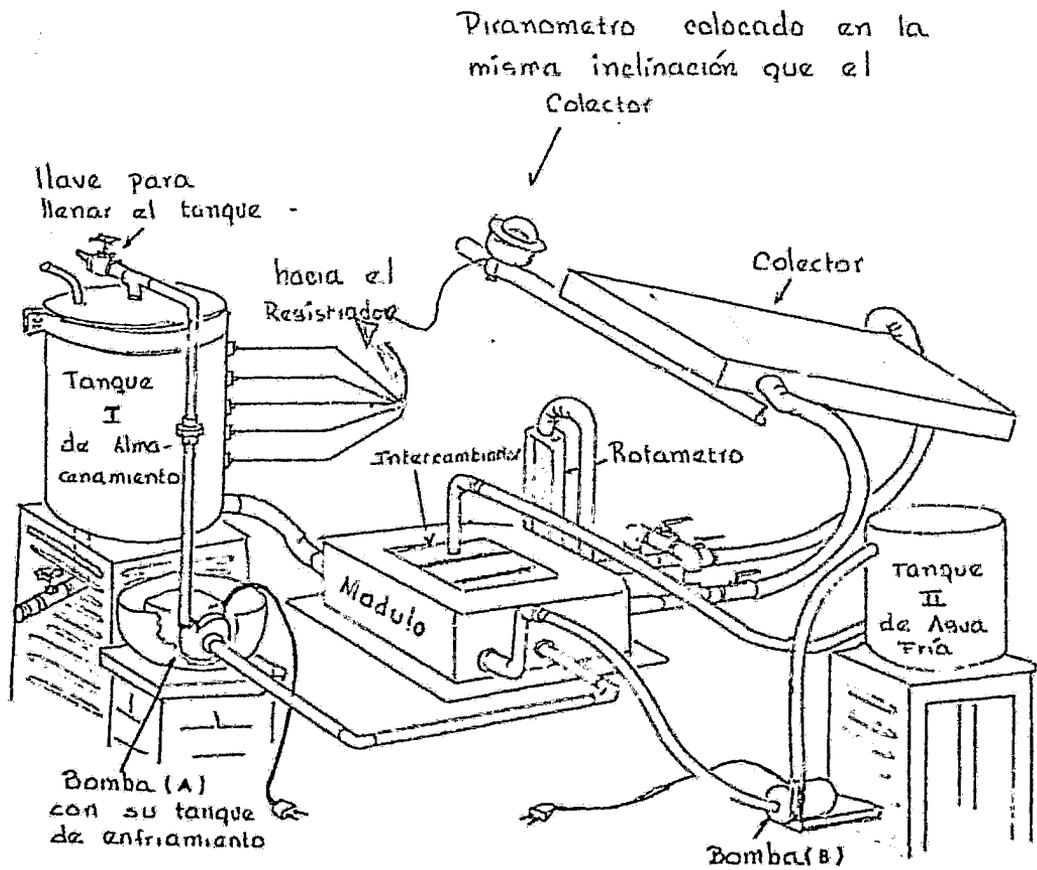


Diagrama para descargar del calor almacenado

Después para adaptar el módulo con el tanque de almacenamiento y con el tanque de agua fría (tanque II) se hicieron 2 bancos con ángulo de fierro, se conectaron las tuberías de entrada y salida de agua así como las bombas para el tanque de almacenamiento y tanque de agua fría, el colector se colocó en una estructura ya hecha y adaptada al módulo, quedando finalmente el tanque como se muestra a continuación.



Vista General del Sistema.

Por último se aisló la tubería de PVC, y se procedió a llenar el tanque para probar posibles fugas.

Una vez hecho esto, se probaron las bombas, quedando así listo para empezar las pruebas.

El piranómetro estará colocado en la misma posición del colector, para que registre la radiación que le llega en esa posición inclinada.

METODOLOGIA, PRUEBAS Y RESULTADOS

Las pruebas que se llevarán a cabo para el tanque, se harán de la manera siguiente:

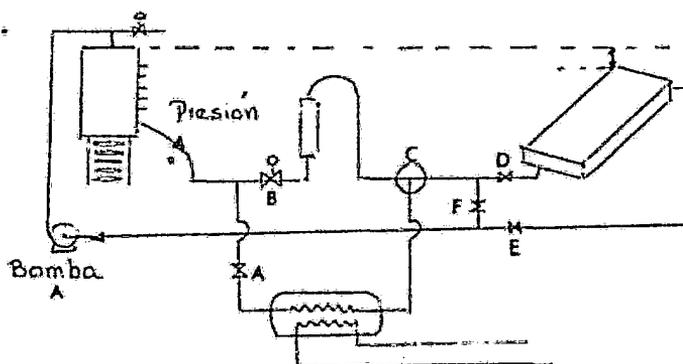
- A. Para encontrar las condiciones de estratificación en el tanque, se probará este a diferentes flujos (1, 1.5, 2, 2.5, 3 lts/min) de -- donde se obtendrá, el flujo al cual el tanque presenta la mayor es tratificación.

- B. Se comparará la acumulación de calor en el tanque cuando:
 - 1) El tanque presenta la mayor estratificación (haya una gran diferencia de temperaturas entre al domo y el fondo del tanque).
 - 2) El tanque esté totalmente homogéneo (el tanque esté totalmente a la misma temperatura).

- C. Se calcularán las pérdidas de calor de almacenamiento cuando el - tanque esté estratificado y cuando esté homogéneo. Y en base a - ésto, obtener el coeficiente total de transferencia de calor, la eficiencia del tanque y total del sistema, así como la cantidad - de calor de descarga.

A. Pruebas para encontrar el flujo que nos dé la mayor estratificación:

- 1) Al empezar la semana, se llenó el tanque de almacenamiento con agua de la línea, concentrando la manguera de suministro a la llave superior del tanque.
- 2) Se abrieron todas las llaves por donde circulará el fluido y se esperaron unos minutos (5 min. aproximadamente), para que se llenaran las tuberías e incluso, el colector (evitando así posibles burbujas que harían cavitar la bomba al arrancar), - ésto es aprovechando la presión hidrostática debida a que el tanque está sobre el banco a una altura mayor que el colector y el módulo.



- 3) Se arrancó la bomba (A), observando que el rotámetro del medidor de flujo llegara al máximo (la bomba maneja más de 10 lts (min), como el rotámetro empezó a bajar rápidamente, era signo de la presencia de burbujas en la tubería y/o colector, -- por lo que se desconectó la bomba, se esperaron unos minutos más para asegurar el llenado completo de la tubería, se volvió a arrancar la bomba hasta que el rotámetro se mantuvo en lo alto del medidor.

- 4) La válvula (B) de control de flujo, se fue cerrando poco a poco, hasta que el rotámetro marcara el flujo deseado (1, 1.5, 2, 2.5, 3 lts/min) según era la prueba.
- 5) Se encendió el registrador y el marcador de insolación, para que se graficaran las temperaturas recibidas de los termopares y del piranómetro, anotando a la vez en el papel graficador la hora y fecha de inicio de prueba.
- 6) Se dejó funcionando la bomba durante todo el día, hasta las 16 hrs (tiempo en que termina el turno de trabajo en DIGASES) en que se paró la bomba, finalizando la prueba de almacenamiento de energía.

El marcador de insolación también se apoyó y se anotó en el papel registrador la hora y la insolación marcada en la pantalla de dicho marcador.

Se dejó funcionando sólo el registrador durante toda la noche, para que se graficaran las temperaturas de almacenamiento y -- con ellas obtener las pérdidas de calor durante la noche.

- 7) Al siguiente día se hace lo mismo, de prender la bomba en la mañana y apagarla en la tarde, y ésto durante toda la semana (a un flujo determinado), a la semana siguiente se probará con otro flujo de la bomba y el marcador de insolación diariamente.

- 8) En total se hicieron 5 pruebas, que abarcaron 5 semanas (flujos de 1, 1.5, 2, 2.5 y 3 lts/min).

RESULTADOS

A continuación se muestra en forma tabulada, los resultados de las temperaturas en °C del tanque, tomadas del papel graficador a cada 10 min. hasta antes de apagar la bomba, esto es con el objeto de poder observar mejor si se presenta alguna estratificación, al graficar y ampliar la escala en papel milimétrico.

Después de apagar la bomba, se muestran los resultados cada hora, debido a que las pérdidas de almacenamiento por la noche, son prácticamente lineales (observándose los cambios cada hora).

Después de cada semana se muestra una gráfica representativa en el papel milimétrico, de la forma en que se distribuyen las temperaturas a lo largo del tanque.

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 1 lt/min.
(PRIMER DIA)

A	B	C	TERMOPARES		TIEMPO		INSOLACION
			D	E	Min.	Hrs.	
Azul (°C)	Verde (°C)	Morado (°C)	Guinda (°C)	Café (°C)			wtt-hr/m ²
25	22	22	22	21	0	0	0
25.5	22.5	22	22	21.5	10		
26.5	24	22	22	22	20		
28	25	22.5	22	22	30		
28	26	23	22	22	40		
28	26.5	24	22	22	50		
28.5	27	26	22	22	60	1	
29	27.5	27	22.5	22	70		
30	28.5	27.5	23.5	22	80		
30.5	29	28	24.5	22.5	90		
31.5	30	28	26	22.5	100		
32	31	29	27	23.5	110		
34	32	29.5	27.5	24	120	2	
34	33	30	28	25	130		
34.5	34	31	28.5	26	140		
35	34.5	32	29	27	150		
36	34.5	33.5	39.5	28	160		
36	35	34	30	28.5	170		
37	36	35	31	29	180	3	
36	36	35.5	32	29.5	190		
36	36	36	33	30	200		
37	36.5	36.5	34	32	210		
38	37	36.5	35	33	220		
38	37	37	36	34	230		
38	38	37.5	36	35	240	4	
39	38	38	36.5	35.5	250		
40	39	38	37	36.5	270		
40	40	39	38	37.5	280		
39	39	39.5	38	38	290		
39	39	38.5	38	38	300	5	

RESULTADOS DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

A °C	B °C	C °C	D °C	E °C	TIEMPO		INSOLACION wt-hr/m ²
					Min.	Hrs.	
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café			
39	39	38.5	38	38		0	
36	37.5	37.5	37.5	37.5		1	
35	36.5	36.5	36.5	36.5		2	
34	36	36	36	36		3	
33.5	36	36	36	36		4	
33.5	36	36	36	36		5	
33.5	33.5	33.5	33.5	33.5		6	
33	33.5	33.5	33.5	33.5		7	
33	35.0	35	35	35		8	
33	35	35	35	35		9	
32.5	35	35	35	35		10	
32	34.5	34.5	34.5	34.5		11	
32	34	34	34	34		12	
32	34	34	34	34		13	
32	34	34	34	34		14	
31.5	34	34	34	34		15	
31	34	34	34	34		16	
31.5	33.5	33.5	33.5	33.5		17	
33	33	33	33	33		18	
32	32	32	32	32		19	

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 1 lt/min.

(SEGUNDO DIA)

A °C	B °C	C °C	TERMOPARES		E °C	TIEMPO		INSOLACION wtt-hr/m ²
			D °C			Min.	Hrs.	
Azul	Verde	Morado	Guinda		Café			
32	32	32	32		32	0	0	0
32	32	32	32		32	10		
32	32	32	32		32	20		
32	32	32	32		32	30		
32	32	32	32		32	40		
32	32	32	32		32	50		
32	32	32	32		32	60	1	
32.5	32.5	32.5	32.5		32.5	70		
33	33	33	33		33	80		
34	34	34	34		34	90		
34.5	34	34	34		34	100		
35.5	35	35	35		34	110		
36	36	36	35		34	120	2	
37	37	36	36		34.5	130		
38	38	36.5	36		35.5	140		
40	40	36.5	36		36	150		
40.5	40.5	39	36		36	160		
41.5	41.5	40	36		36	170		
42	42	40.5	36.5		36	180	3	
43	43	41	38		36	190		
43.5	44	42	39		36	200		
44	44.5	43	40		36.5	210		
44	44.5	44	40.5		38	220		
44	44.5	45	41.5		39	230		
44	44.5	45	42.5		40	240	4	
44	45	45	44.5		40.5	250		
44	45	45	45		42	260		

TERMOPARES

A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION wtt-hr/m ²
					Min.	Hrs.	
Azul °C	Verde °C	Morado °C	Guinda °C	Café °C			
44	45	45	45	44	270		
44.5	44.5	44.5	44.5	44.5	280		
45	45.5	45.5	45.5	45.5	290		
45	45.5	45.5	45.5	45.5	300	5	
45	45.5	45.5	45.5	45.5	310		
45.5	46	46	46	46	320		
45.5	46	46	46	46	330		
46	46	46	46	46	340		
46	46	46	46	46	350		
45	46.5	46	46	46	360	6	
45	46	46	46	46	370		
44.5	46	46	46	46	380		
45	46	46	46	46	390		
46	46	46	46	46	400		
46	46	46	46	46	410		
46	46	46	46	46	420	7	
45.5	46	46	46	46	430		
45	46	46	46	46	440		
44.5	46	46	46	46	450		
44	45.5	46	46	46	460		
44	45.5	45.5	45.5	45.5	470		
43.5	45	45.5	45.5	45.5	480	8	4 137

RESULTADOS DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

A	B	C	TERMOPARES		TIEMPO		
			D	E	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café			
43.5	45	45.5	45.5	45.5		0	
43	45	45	45	45		1	
42.5	44.5	44.5	44.5	44.5		2	
42.5	44.5	44.5	44.5	44.5		3	
42	44	44	44	44		4	
42	44	44	44	44		5	
41.5	43.5	43.5	43.5	43.5		6	
41	43.5	43.5	43.5	43.5		7	
41	43.5	43.5	43.5	43.5		8	
40.5	43	43	43	43		9	
40.5	42.5	42.5	42.5	42.5		10	
40	42	42	42	42		11	
39.5	42	42	42	42		12	
39	41.5	41.5	41.5	41.5		13	
39	41	41	41	41		14	
39	41	41	41	41		15	
40	40	40	40	40		16	

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 1 lt/min.

(TERCER DIA)

A	B	C	TERMOPARES		TIEMPO	INSOLACION	
			D	E			
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café	min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
40	40	40	40	40	0	0	0
38.5	39	39	39	39	10		
38	38.5	38.5	38.5	38.5	20		
37.5	38	38	38	38	30		
38	38.5	38.5	38.5	38.5	40		
38.5	39	39	38.5	38.5	50		
39	39	39.5	38.5	38.5	60	1	
39.5	39.5	39.5	39	38.5	70		
39.5	39.5	39.5	39	38.5	80		
40	40	40	39.5	38.5	90		
41	41	41	40	39	100		
41.5	41	41.5	40.5	39.5	110		
42	42.5	42	41	40	120	2	
43	43.5	43	41	40	130		
44	44	44	41.5	40.5	140		
44	44	44	42	41	150		
44.5	44.5	44.5	43	41.5	160		
44.5	45	44.5	44	42	170		
45	45	45	45	42.5	180	3	
45	45	45	45	43.5	190		
45.5	46	45.5	45	44	200		
46	47	46	45	44	210		
47	48	47	45.5	45	220		
48	48.5	48	45.5	45.5	230		
48.5	49	48.5	46	45.5	240	4	
49.5	50	49.5	47	45.5	250		
50	50.5	50	48	46	260		
51	51.5	51	48.5	46.5	270		
51.5	52	51.5	49.5	57.5	280		
52	52	52	50	48	290		
52	52	52	50.5	48.5	300	5	

TERMOPARES

A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
52	52.5	52	51.5	49.5	310		
52.5	53	53	52	50	320		
52.5	53.5	53.5	53	51	330		
52.5	53.5	53.5	53	52	340		
52.5	53.5	53.5	53	52.5	350		
53	54	54	53.5	53	360	6	
54	54	54	54	54	370		
53.5	54	54	54	54	380		
53.5	54	54	54	54	390		
53	54	54	54	54	400		
52.5	53.5	53.5	53.5	53.5	410		
52.5	53.5	53.5	53.5	53.5	420	7	
52.5	53.5	53.5	53.5	53.5	430		
52	53	53	53	53	440		
52	53	53	53	53	450		

RESULTADOS DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

52	53	53	53	53	0		
52	53	53	53	53	1		
51	52.5	52.5	52.5	52.5	2		
50.5	52	52	52	52	3		
50	52	52	52	52	4		
50	52	52	52	52	5		
50	52	52	52	52	6		
49.5	51.5	51.5	51.5	51.5	7		
49	51	51	51	51	8		
48	50	50	50	50	9		
48	50	50	50	50	10		
47.5	50	50	49.5	49.5	11		

TERMOPARES

A	B	C	D	E	TIEMPO (hrs)
47	49.5	49.5	49	48.5	12
46.5	49	49	48.5	48	13
46	48.5	48.5	48	47.5	14
46	48.5	48.5	48	47.5	15
46	48	47.5	47.5	46.5	16
46	46	46	46	46	17

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TAN : A 1 lt/min.
(CUARTO DIA)

A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café	min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
42	42	42	42	42	0	0	0
42	42	42	42	42	10		
41.5	42	42	42	42	20		
41	42	42	42	42	30		
41	42	42	42	42	40		
41	42	42	42	42	50		
41	42	42	42	42	60	1	
41.5	42	42	42	42	70		
42	42	42	42	42	80		
42	42.5	42	42	42	90		
43	43.5	43.5	42	42	100		
44	44.5	44	42.5	42	110		
44.5	45	44.5	43	42.5	120	2	
46	46	46	43.5	42.5	130		
46	46.5	46.5	44	43	140		
46	47	47	45	43.5	150		
47	47.5	47.5	46	44	160		
47.5	48	48	47	44	170		
48	48	48	47	45.5	180	3	
49	49	49	47.5	46	190		
49	49.5	49.5	48	46.5	200		
49.5	50	50	49	47.5	210		
50	55	55	50	48	220		
50	51	51	50	48.5	230		
50.5	51.5	51.5	50.5	49	240	4	
51	52	52	51	50	250		
52	52.5	52	52	50	260		
52	53	53	51	52	270		
52	53	53	52	51	280		
53	53.5	53.5	53	51.5	290		
53.5	54	54	53.5	52	300	5	

137.

TERMOPARES

A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café	min.	hrs.	wtt-hr/m ²
53.5	54	54	54	53.5	310		
53.5	54	54	54	54.5	320		
53	54	54	54	54	330		
53.5	54	54	54	54	340		
54	54	54	54	54	350		
54	54	54	54	54	360	6	
54	54.5	54.5	54.5	54	370		
54	54.5	54.5	54.5	54.5	380		
54	55	55	55	55	390		
54	55	55	55	55	400		
54	55	55	55	55	410		
53.5	54	54	54	54	420	7	
53.5	54	54	54	54	430		
53	54	54	54	54	440		
53	54	54	54	54	450		
52.5	54	54	54	54	460		
52.5	54	54	54	54	470		
52.5	54	54	54	54	480	8	5 520

RESULTADOS DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

52.5	54	54	54	54	0		
52	54	54	54	54	1		
51.5	53.5	53.5	53.5	53.5	2		
51	53	53	53	53	3		
50.5	52.5	52.5	52.5	52.5	4		
50	52	52	52	52	5		
50	52	52	52	52	6		
49.5	52	52	52	52	7		

TERMOPARES

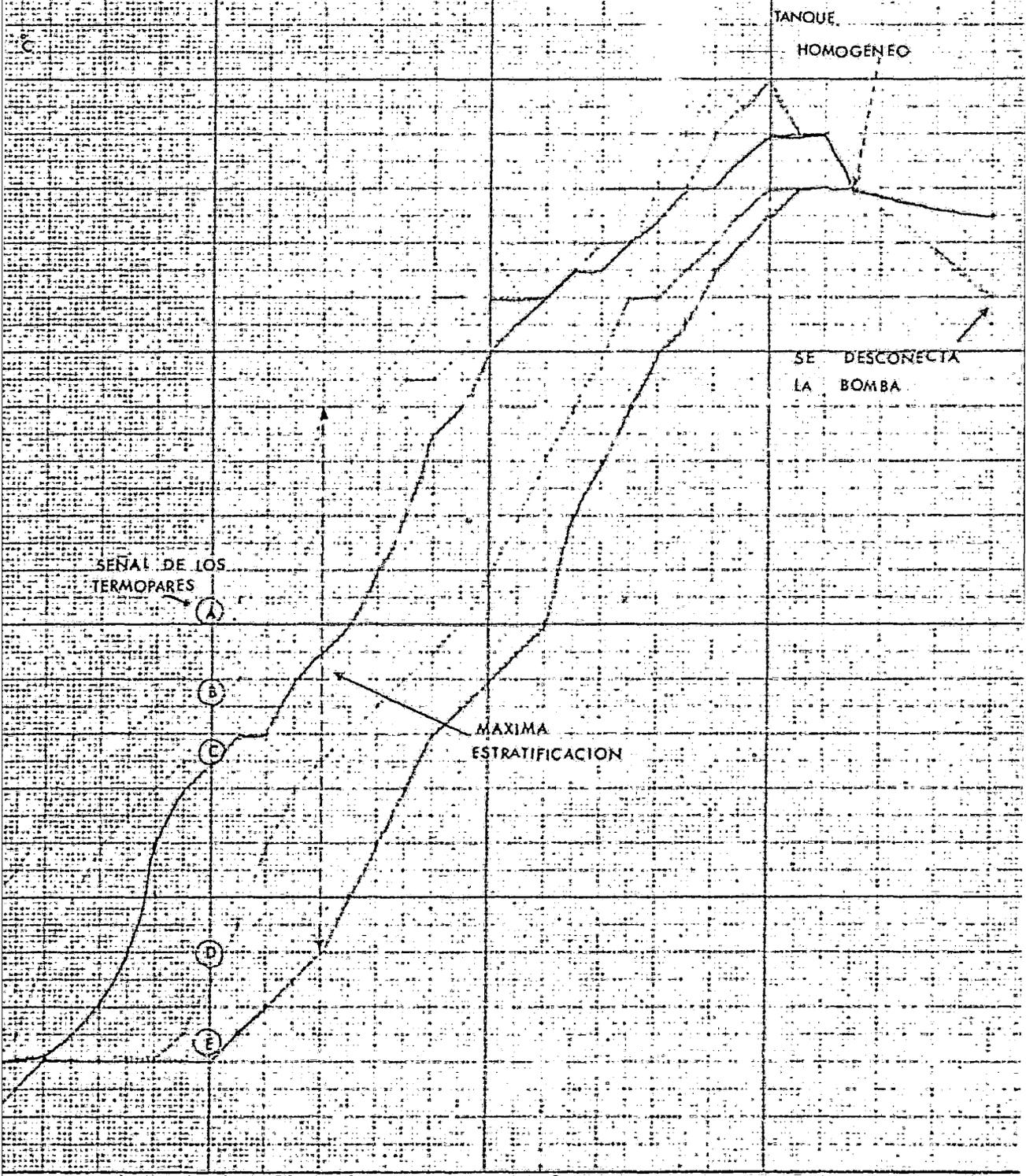
A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
49	51	51	51	51	8		
48.5	50.5	50.5	50.5	50.5	9		
48	50	50	50	50	10		
48	50	50	50	50	11		
47	50	50	49.5	49	12		
47	49.5	49.5	49	48.5	13		
46.5	49	49	48.5	48	14		
46	48	48	48	47	15		
47	48	48	48	47	16		
47	48	48	48	47	17		

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 1 lt/min.
(QUINTO DIA)

TERMOPARES							
A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
47	47	47	47	47	0	0	0
46	46	46	46	46	10		
45	45.5	45.5	45.5	45.5	20		
45.5	45	45	45	45	30		
44	45	45	45	45	40		
44	45	45	45	45	50		
44.5	45	45	45	45	60	1	
45	45	45	45	45	70		
45	46	45.5	45.5	45	80		
45.5	46	46	45.5	45.5	90		
45.5	46	46	45.5	45.5	100		
46	45	46	45.5	45.5	110		
47	47.5	47	46	45.5	120	2	
47	48	47.5	46.5	46	130		
48	48	48	46.5	46	140		
48	49	48	46.5	46	150		
49	49.5	48.5	47	46.5	160		
50.5	50.5	49	48	47	170		
51	51	50	48	47	180	3	
51.5	52	51.5	48.5	47.5	190		
52	52	52	49	48	200		
52	52	52	48.5	48	210		
52.5	52.5	52.5	50	49	220		
53	53	53	51	49	230		
54	54	54	52	50	240	4	
54	54	54	52	50.5	250		
54	54	54	52.5	51	260		

A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café	min.	hrs.	wtt-hr/m ²
50.5	50.5	49	58	47	170		
51	51	50	48	47	180	3	
51.5	52	51.5	48.5	47.5	190		
52	52	52	49	48	200		
52	52	52	48.5	48	210		
52.5	52.5	52.5	50	49	220		
53	53	53	51	49	230		
54	54	54	52	50	240	4	
54	54	54	52	50.5	250		
54	54	54	52.5	52	260		
54	54	54	53.5	52	270		
54.5	54.5	54.5	53.5	52	280		
54	54	54	54	52.5	290		
54	54	54	54	53	300	5	
54	54	54	54	54.5	310		
54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	320		
55	55	55	55	55	330		
54	54.5	54.5	54.5	54.5	340		
54	54.5	54.5	54.5	54.5	350		
53.5	54.5	54.5	54.5	54.5	360	6	
53.5	54.5	54.5	54.5	54.5	370		
53.5	54.5	54.5	54.5	54.5	380		
53.5	54.5	54.5	54.5	54.5	390		
53	54.5	54.5	54.5	54	400		3 222

(GRAFICA REPRESENTATIVA)



RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 1.5 lt/min.

(PRIMER DIA)

<u>TERMOPARES</u>							
A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
22	19	19	19	19	0	0	0
22	19	19	19	19	10		
22	19	19	19	19	20		
22	19.5	19.5	19.5	19.5	30		
23	20	20	20	20	40		
24	21	21	21	21	50		
25.5	22	21.5	21.5	21	60	1	
26	23.5	23.5	23.5	21	70		
27.5	24	24	24	22	80		
28	25.5	25.5	25.5	23	90		
29	26	26	26	25	100		
30	27	27	27	27	110		
31	27.5	27.5	27.5	27.5	120	2	
31.5	28	28	28	27.5	130		
32	29	29	29	28	140		
32	30	30	29.5	28	150		
33	31	31	30	28	160		
33.5	32	32	32	29.5	170		
34	33	33	33	31	180	3	
34.5	34	34	34	32	190		
35	34.5	34.5	34.5	32.5	200		
35.5	35	35	35	33.5	210		
36	35.5	35.5	35.5	34	220		
36.5	36	36	36	35	230		
37	37	37	36	35.5	240	4	
37	37	37	37	35.5	250		
37	37	37	37	37	260		
37	37	37	37	37	270		
38	30	30	30	30	280		

A	B	C	TERMOPARES		TIEMPO		INSOLACION
			D	E	Min.	Hrs.	
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café			wtt-hr/m ²
37	37	37	37	37	290		
37	37	37	37	37	200	5	3 539

RESULTADOS DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

37	37	37	37	37		0
34.5	36	36	36	36		1
34	36	36	36	36		2
34	36	36	36	36		3
34	34	36	36	36		4
34	36	36	36	36		5
33.5	36	36	36	36		6
33	36	36	36	36		7
33	35.5	35.5	35.5	35.5		8
32.5	35.5	35.5	35.5	35.5		9
32	35	35	35	35		10
32	34.5	34.5	34.5	34.5		11
32	34	34	34	34		12
31.5	34	34	34	34		13
31	34	34	34	34		14
31	34	34	34	34		15
30.5	33.5	33.5	33.5	33.5		16
31	33	33	33	33		17
32	32	32	32	32		18

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 1.5 lt/min.
(SEGUNDO DIA)

A	B	C	TERMOPARES		TIEMPO		INSOLACION wtt-hr/m ²
			D	E	Min.	Hrs.	
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	
30	30	30	30	30	0	0	0
30	30	30	30	30	10		
30	30.5	30.5	30.5	30.5	20		
30	30.5	30.5	30.5	30.5	30		
30.5	31	31	31	31	40		
31	31.5	31.5	31.5	31.5	50		
31	31.5	31.5	31.5	31.5	60	1	
32	32	32	32	32	70		
32	32	32	32	32	80		
32.5	32.5	32.5	32.5	32.5	90		
33	33	33	33	33	100		
34	34	34	34	34	110		
34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	120	2	
35	35	35	35	34.5	130		
36	36	36	36	34.5	140		
36.5	36.5	36.5	36.5	35	150		
37	37	37	37	36	160		
37.5	37.5	37.5	37.5	36.5	170		
38	38	38	38	38	180	3	
38.5	38.5	38.5	38.5	38	190		
39	39	39	39	38.5	200		
39.5	39.5	39.5	39.5	39	210		
40	40	40	40	40	220		
40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	230		
41	41	41	41	41	240	4	
41	42	42	42	41	250		
42	42	42	42	42	260		
42	42.5	42.5	42.5	42.5	270		
43	43	43	43	42	280		
44	44	44	44	43	290		

A	B	C	TERMOPARES		TIEMPO		INSOLACION
			D	E	Min.	Hrs.	
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
44	43	44	44	43	290		
44	44.5	44.5	44.5	44.5	300		
44	45	45	45	45	320		
45	46	46	46	46	330		
45	46	46	46	46	340		
45	46	46	46	46	350		
44.5	46	46	46	46	360	6	
44	46	46	46	46	370		
44	46	46	46	46	380		
44	45.5	45.5	45.5	45.5	390		
44	45.5	45.5	45.5	45.5	400		
44	45.5	45.5	45.5	45.5	410		
44.5	46	46	46	46	420	7	
45	46	46	46	46	430		
44	46	46	46	46	440		
44.5	46	46	46	46	450		
45	46	46	46	46	460		4 625

RESULTADOS DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

45	46	46	46	46	0
44	46	46	46	46	1
43	45.5	45.5	45.5	45.5	2
43	45.5	45.5	45.5	45.5	3
42.5	45	45	45	45	4
42	44.5	44.5	44.5	44.5	5
42	44	44	44	44	6
42	44	44	44	44	7
41.5	44	44	44	44	8
41	43.5	43.5	43.5	43.5	9

A	B	C	TERMOPARES		TIEMPO		INSOLACION
			D	E	Min.	Hrs.	
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
41	43	43	43	43		10	
40.5	42.5	42.5	42.5	42.5		11	
40	42	42	42	42		12	
40	42	42	42	42		13	
39	42	42	42	41		14	
39	42	42	42	41		15	
40	41	41	41	41		16	
40	40	40	40	40		17	

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 1.5 lt/mín.
(TERCER DIA)

A	B	C	TERMOPARES		TIEMPO		INSOLACION
			D	E	Mín.	Hrs.	
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café	Mín.	Hrs.	wtt-hrs/m ²
39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	0	0	0
39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	10		
39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	20		
39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	30		
39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	40		
39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	50		
39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	60	1	
40	40	40	40	40	70		
40.5	40.5	40.5	40.5	40	80		
41	41.5	41.5	41.5	40	90		
42	42	42	42	42	100		
42	42	42	42	41.5	110		
43	43	43	42	42	120	2	
43.5	43.5	44	44	42	130		
44	44.5	44.5	44.5	42	140		
44	45	45	45	43	150		
44.5	45.5	45.5	45.5	44	160		
45	46	46	46	44.5	170		
46	46.5	46.5	46.5	45	180	3	
46	46	46	46	45	190		
47	47.5	47.5	47.5	45.5	200		
48	48	48	47	46	210		
48	48	48	47	46.5	220		
48.5	49	48.5	48	47	230		
49.5	50	50	49.5	48	240	4	
50	50.5	50.5	50	48	250		
50	51	50	50	49	260		
50.5	51	51	50.5	49.5	270		
51	51.5	51.5	51	50	280		
51	51.5	51.5	51.5	51	290		

<u>TERMOPARES</u>							
A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café	Mín.	Hrs.	wtt-hrs/m ²
51	52	52	52	52	300	5	
51	52	52	52	52	310		
51	52	52	52	52	320		
52	53	53	52	52	330		
52.5	53.5	53.5	52	52	340		
53.5	54	54	53	52	350		
54	54	54	53	52.5	360	6	
53	54	54	54	54	370		
52.5	54	54	54	54	380		
52	53	53	53	53	390		
51.5	53	53	53	53	400		
51	52	52	52	52	410		
51	52	52	52	52	420	7	
51	52	52	52	52	430		
50.5	52	52	52	52	440		
50	52	52	52	52	450		
50	51.5	51.5	51.5	51.5	460		4 856

RESULTADOS DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

50	51.5	51.5	51.5	51.5		0	
49	51	51	51	51		1	
48.5	50.5	50.5	50.5	50.5		2	
48	50	50	50	50		3	
48	50	50	50	50		4	
48	50	50	50	50		5	
47.5	50	50	50	50		6	
47	49.5	49.5	49.5	49.5		7	

TERMOPARES

A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION wtt-hrs/m ²
					Min.	Hrs.	
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café			
46.5	49	49	49	49		8	
46	48	48	48	48		9	
46	48	48	48	48		10	
46	48	48	48	48		11	
45	47.5	47.5	47.5	47.5		12	
44.5	47	47	47	47		13	
44	46	46	46	46		14	
44	46	46	46	45		15	
45	46	46	46	45		16	

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 1.5 lt/min.
(CUARTO DIA)

A	B	C	TERMOPARES		TIEMPO		INSOLACION
			D	E	Mín.	Hrs.	
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café	Mín.	Hrs.	wtt/hrs/m ²
41	41	41	41	41	0	0	0
41	41.5	41.5	41.5	41.5	10		
41	41.5	41.5	41.5	41.5	20		
41.5	42	42	42	42	30		
41.5	42	42	42	42	40		
41.5	42	42	42	42	50		
41.5	42	42	42	42	60	1	
42	42	42	42	42	70	2	
42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	80		
43	43	43	43	43	90		
44	44	44	44	44	100		
44.5	44.5	44.5	44.5	44.5	110		
45	45	45	45	44	120	2	
45.5	45.5	45.5	45.5	44	130		
46	46	46	46	44	140		
46	46.5	46.5	46.5	45	150		
46.5	46.5	46.5	46.5	46	160		
46.5	47	47	47	46.5	170		
46.5	47.5	47.5	47.5	46.5	180	3	
47	48	48	48	48	200		
47	48	48	48	48	210		
47.5	48	48	48	48	220		
47.5	48	48	48	48	230		
48	48.5	48.5	48.5	48.5	240	4	
48.5	49	49	49	49	250		
49	50	49.5	49.5	49.5	260		
49.5	50.5	50.5	50	49	270		
50	51	51	50.5	49.5	280		
50	51.5	51.5	51	50	290		
50.5	51.5	51.5	51	50.5	300	5	
51	52	52	51.5	51	310		

TERMOPARES							
A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	w-t/hrs/m ²
50.5	51.5	51.5	51.5	51.5	320		
50	51	51	51	51	330		
50	51	51	51	51	340		
49.5	50.5	50.5	50.5	50.5	350		3 714

RESULTADOS DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

49.5	50.5	50.5	50.5	50.5	0	
49	50.5	50.5	50.5	50.5	1	
48.5	50	50	50	50	2	
48	50	50	50	50	3	
48	50	50	50	50	4	
47.5	50	50	50	50	5	
47	49.5	49.5	49.5	49.5	6	
47	49	49	49	49	7	
46.5	48.5	48.5	48.5	48.5	8	
46	48	48	48	48	9	
46	48	48	48	48	10	
45.5	47.5	47.5	47.5	47.5	11	
45	47	47	47	47	12	
44.5	46	46	46	46	13	
44	46	46	46	45	14	
44	46	46	46	45	15	
44	46	46	46	45	16	
44	45.5	45.5	45.5	45.5	17	
44	44	44	44	44	18	

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 1.5 lt/min.

(QUINTO DIA)

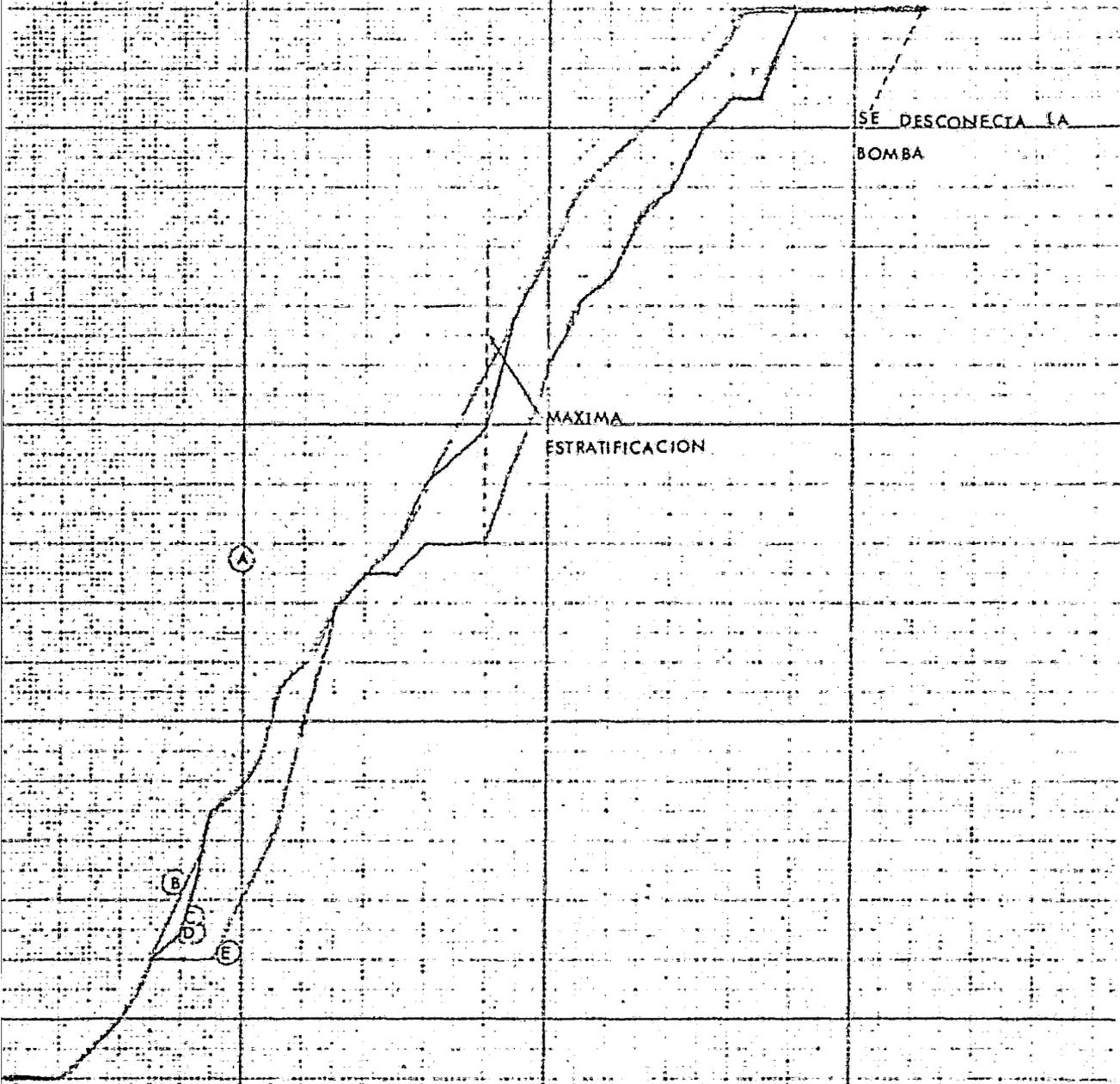
A	B	C	TERMOPARES		TIEMPO		INSOLACION
			D	E	Min.	Hrs.	
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
42	42	42	42	42	0	0	0
42	43	43	43	43	10		
42	43	43	43	43	20		
42	43	43	43	43	30		
42.5	43	43	43	43	40		
43	43	43	43	43	50		
43	43.5	43.5	43.5	43.5	60	1	
43	44	44	43.5	43	70		
43.5	44.5	44.5	44	43.5	80		
44	45	45	45	44	90		
44	45	45	44.5	44	100		
44	45.5	45.5	45.5	44	110		
45	46	46	44.5	44.5	120	2	
45.5	46	46	45	45	130		
45.5	46	46	45.5	45	140		
46	47	47	46	45	150		
46	47	47	46	45.5	160		
46	47.5	47.5	46.5	46	170		
47	48	48	47	46	180	3	
47	48.5	48.5	47	46.5	190		
48	49	49	48	47	200		
48	49	49	48	47.5	210		
48	48.5	48.5	48.5	48.5	220		
47.5	48	48	48	48	230		
47.5	48	48	48	48	240	4	
47.5	48	48	48	48	250		
48.5	49	49	49	49	260		
49	49.5	49.5	49.5	48.5	270		
49	50	50	50	48.5	280		
49.5	50	50	50	50	290		

A	B	C	<u>TERMOPARES</u>		TIEMPO		INSOLACION wtt-hr/m ²
			D	E	Min.	Hrs.	
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	
49.5	50.5	50.5	50	49	300	5	
49.5	50.5	50.5	50.5	49.5	310		
49.5	50.5	50.5	50.5	50	320		
50	50.5	50.5	51	51	330		
49.5	51	51	51	51	340		
49.5	50.5	50.5	50.5	50.5	350		
49.5	50.5	50.5	50.5	50.5	360	6	
49.5	50	50	50	50	370		
49	50	50	50	50	380		
49	50	50	50	50	390		
49	50	50	50	50	400		
48.5	50	50	50	50	410		
48	50	50	50	50	420	7	3 817

GRAFICA REPRESENTATIVA DEL TANQUE A

UN FLUJO DE 1.5 lt/min

t_c



RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 2 lt/min.

(PRIMER DIA)

A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	Wtt-hr/m ²
27	27	27	27	26	0	0	0
28	26	26	26	26	10		
27.5	26	26	26	26	20		
28	26.5	26.5	26.5	26.5	30		
28	27	27	27	27	40		
28.5	27.5	27.5	27.5	27.5	50		
29	28	28	28	28	60	1	
29.5	28.5	28.5	28.5	28.5	70		
30.5	29	29	29	29	80		
31	30	30	30	30	90		
32	31	31	31	31	100		
32.5	32	32	32	32	101		
33	32	32	32	32	120	2	
33.5	33	33	33	33	130		
34	33.5	33.5	33.5	33.5	140		
34.5	34	34	34	34	150		
35	35	35	35	35	160		
36	36	36	36	36	170		
36.5	36	36	36	36	180	3	
37	37	37	37	37	190		
38	38	38	38	38	200		
38.5	38.5	38.5	38.5	38.5	210		
39	39	39	39	39	220		
39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	230		
40	40	40	40	40	240	4	
40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	250		
41	41	41	41	41	260		
41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	270		
42	42	42	42	42	280		
42.5	42.6	42.5	42.5	42.5	290		
42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	300	5	
42.5	43	43	43	43	310		

A	B	C	D	E	Min.	Hrs.	Wtt-hr/m ²
42.5	43	43	43	43	320		
42.5	43.5	43.5	43.5	43.5	330		
42.5	43.5	43.5	43.5	43.5	340		
42	43	43	43	43	350		
42	43	43	43	43	360	6	
42	43	43	43	43	370		
42	43	43	43	43	380		
42	43	43	43	43	390		
42	43	43	43	43	400		
42	43	43	43	43	410		
41.5	43	43	43	43	420	7	2 233

RESULTADOS DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

41.5	43	43	43	43	0		
41	42.5	42.5	42.5	42.5	1		
40	42	42	42	42	2		
40	42	42	42	42	3		
40	42	42	42	42	4		
40	42	42	42	42	5		
39.5	42	42	42	42	6		
39	41.5	41.5	41.5	41.5	7		
38.5	41.5	41.5	41.5	41.5	8		
38	41	41	41	41	9		
38	40.5	40.5	40.5	40.5	10		
38	40	40	40	40	11		
37.5	40	40	40	40	12		
37	40	40	40	40	13		
36.5	39.5	39.5	39.5	39.5	14		
36.5	39	39	39	39	15		
38	39	39	39	38	16		

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 2 lt/min.

(SEGUNDO DIA)

A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	Wtt-hr/m ²
38	39	39	39	38	0	0	0
38	39	39	39	38	10		
38	39	39	39	38	20		
38.5	39	39	39	38	30		
39	39	39	39	38	40		
39	39	39	39	38	50		
39	39	39	39	38	60	1	
39	39	39	39	38	70		
39	39	39	39	38	80		
39	39	39	39	38	90		
39	39	39	39	38	100		
39	39	39	39	38	110		
39	39	39	39	37.5	120	2	
39	39	39	39	37.5	130		
39	39	39	39	37.5	140		
39	39	39	39	37.5	150		
39	39	39	39	37.5	160		
39	39	39	39	37.5	170		
39	39	39	39	37.5	180	3	
39.5	39	39	38.5	37.5	190		
39.5	39	39	38.5	37.5	200		
39.5	39	39	38.5	37	210		
39.5	39	39	38.5	37	220		
39.5	39	39	38.5	37	230		
39.5	39	39	38.5	37	240	4	
39.5	39	39	38.5	37	250		
39.5	39	39	38.5	37	260		
39.5	39	39	38.5	37	270		
39.5	39	39	38.5	37	280		
39.5	39	39	38.5	37	290		

A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	Wtt-hr/m ²
39.5	39	39	38.5	37	300	5	
39.5	39	39	38.5	37	310		
39.5	39	39	38.5	37	320		
39.5	39	39	38.5	37	330		
39.5	39	39	38.5	37	340		
39.5	39	39	38.5	37	350		
39.5	39	39	38.5	37	360	6	
39.5	39	39	38.5	37	370		
39.5	39	39	38.5	37	380		
39.5	39	39	38.5	37	390		
39.5	39	39	38.5	37	400		
40	39	39	38.5	37	410		
40	39	39	38.5	36.5	420	7	
40	39	39	38.5	36.5	430		
40	39	39	38	36.5	440		
40	39	39	38	36.5	450		
39	39	39	38	36.5	460		
39	39	39	38	36.5	470		
38.5	38.5	38.5	38	36.5	480	8	

A causa de suspensión de labores al siguiente día, en la Dirección, se apagó todo el sistema completo para continuar hasta el cuarto día de la semana.

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 2 lt/min.
(CUARTO DIA)

A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	Wtt-hr/m ²
34	34	34	34	34	0	0	0
34	34	34	34	34	10		
34	34	34	34	34	20		
34	34	34	34	34	30		
34	34	34	34	34	40		
34	34	34	34	34	50		
35	35	35	35	35	60	1	
35.5	35.5	35.5	35.5	35.5	70		
36	36	36	36	36	80		
36	36	36	36	36	90		
37	37	37	37	37	100		
38	38	38	38	38	110		
38	38	38	38	38	120	2	
39	39	39	39	39	130		
39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	140		
40	40	40	40	40	150		
40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	160		
41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	170		
42	42	42	42	42	180	3	
42	42	42	42	42	190		
42	42	42	42	42	200		
42	42	42	42	42	210		
42.5	43	43	43	43	220		
43	44	44	44	44	230		
44	44.5	44.5	44.5	44.5	240	4	
44.5	44.5	44.5	44.5	44.5	250		
45	45	45	45	45	260		
45.5	46	46	46	46	270		
45.5	46	46	46	46	280		
45.5	46.5	46.5	46.5	46.5	290		

A	B	C	D	E	Min.	Hrs.	Wtt-hr/m ²
46	47	47	47	47	300	5	
46.5	47.5	47.5	47.5	47.5	310		
46.5	47.5	47.5	47.5	47.5	320		
47	47.5	47.5	47.5	47.5	340		
47.5	48	48	48	48	350		
47.5	48	48	48	48	360	6	
47.5	48	48	48	48	370		
47.5	48	48	48	48	380		
47.5	47.5	48	48	48	390		
47.5	48	48	48	48	400		
47.5	48	48	48	48	410		
47.5	48	48	48	48	420	7	
47.5	48	48	48	48	430		
47	48	48	48	48	440		
46	48	48	48	48	450		4 674

RESULTADOS DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

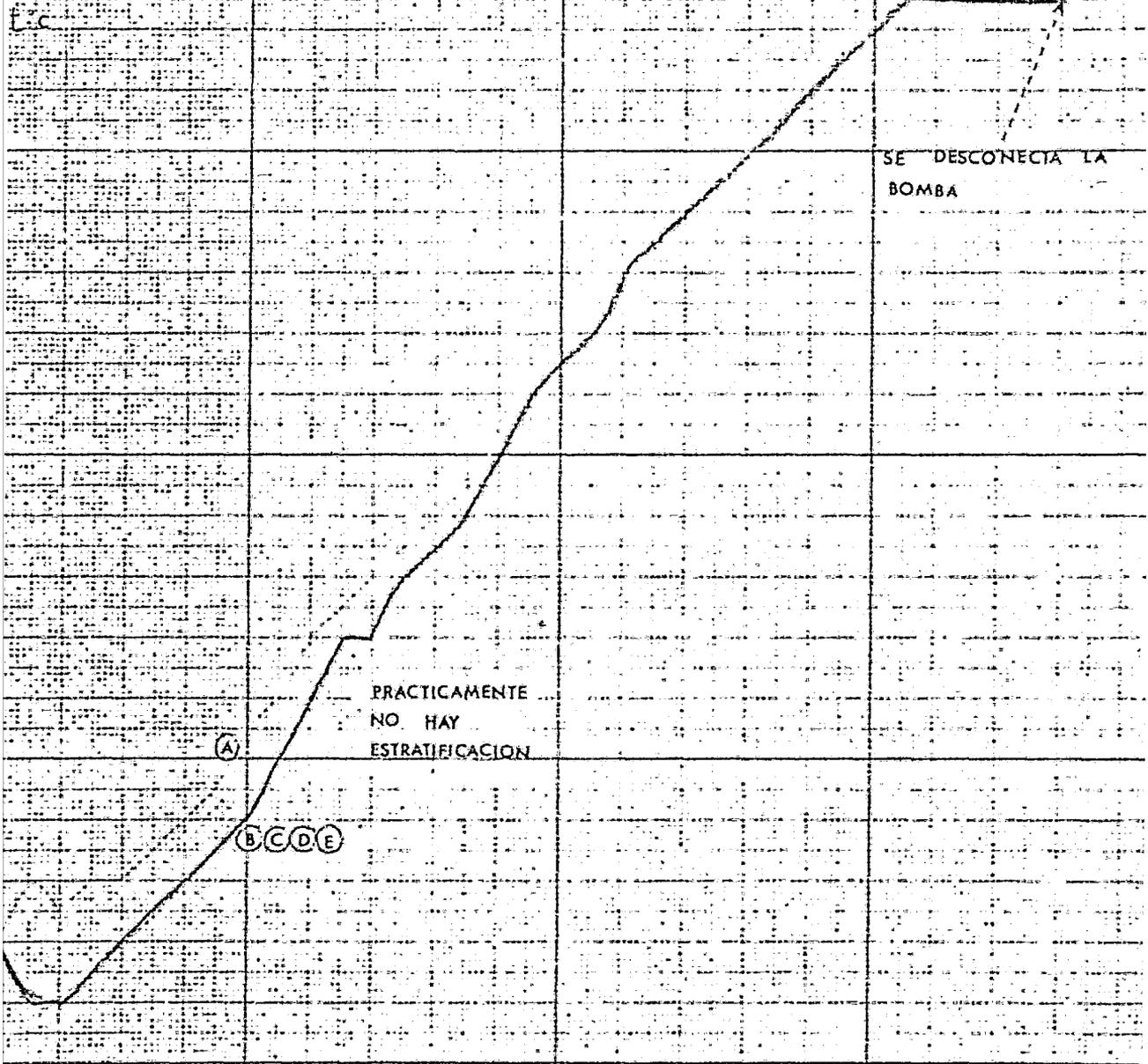
46	48	48	48	48	0	
46	48	48	48	48	1	
46	48	48	48	48	2	
45.5	47.5	47.5	47.5	47.5	3	
45	47	47	47	47	4	
45	47	47	47	47	5	
44.5	46.5	46.5	46.5	46.5	6	
44	46	46	46	46	7	
43.5	46	46	46	46	8	
43	45.5	45.5	45.5	45.5	9	
43	45.5	45.5	45.5	45.5	10	
42.5	45	45	45	45	11	
42.5	44.5	44.5	44.5	44.5	12	
42	44	44	44	44	13	
41.5	44	44	44	44	14	
41	43.5	43.5	43.5	43	15	

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 2 lt/min.
(QUINTO DIA)

A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azul	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	Wtt-hr/m ²
41	41	41	41	41	0	0	0
41	41	41	41	41	10		
41	41	41	41	41	20		
41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	30		
41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	40		
42	42	42	42	42	50		
42	42	42	42	42	60	1	
42	42	42	42	42	70		
42	42.5	42.5	42.5	42.5	80		
42.5	43	43	43	43	90		
42.5	43	43	43	43	100		
43	43.5	43.5	43.5	43.5	110		
43.5	44	44	44	44	120	2	
43.5	44	44	44	44	130		
44	44.5	44.5	44.5	44.5	140		
44.5	45	45	45	45	150		
44.5	45	45	45	45	160		
45	45.5	45.5	45.5	45.5	170		
45.5	46	46	46	46	180	3	
45.5	46.5	46.5	46.5	46.5	190		
46	46.5	46.5	46.5	46.5	200		
46.5	47	47	47	47	210		
47	47.5	47.5	47.5	47.5	220		
47.5	48	48	48	48	230		
48	48.5	48.5	48.5	48.5	240	4	
48.5	49	49	49	49	250		
49	49.5	49.5	49.5	49.5	260		
49	49.5	49.5	49.5	49.5	270		
49.5	50	50	50	50	280		
50	50.5	50.5	50.5	50.5	290		
50.5	51	51	51	51	300	5	
51.5	52	52	52	52		6	

GRAFICA REPRESENTATIVA DEL TANQUE A

UN FLUJO DE 2 Lt/min



(A)

(B) (C) (D) (E)

PRATICAMENTE
NO HAY
ESTRATIFICACION

SE DESCONECTA LA
BOMBA

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 2.5 lt/min.

(PRIMER DIA)

A	B	C	<u>TERMOPARES</u>		TIEMPO		INSOLACION
			D	E	Min.	Hrs.	
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
25.5	22.5	22.5	22.5	22.5	0	0	0
25.5	23	23	23	23	10		
25.5	24	24	24	24	20		
26	24.5	24.5	24.5	24.5	30		
27	25	25	25	25	40		
27.5	26	26	26	26	50		
28	26	26	26	26	60	1	
28.5	27	27	27	27	70		
29.5	28	28	28	28	80		
30	28	28	28	28	90		
31	29	29	29	29	100		
31.5	30	30	30	30	110		
32	31	31	31	31	120	2	
33	31.5	31.5	31.5	31.5	130		
34	32	32	32	32	140		
34	33	33	33	33	150		
35	34	34	34	34	160		
36	34	34	34	34	170		
37	35	35	35	35	180	3	
37.5	36	36	36	36	190		
38	37	37	37	37	200		
39	37.5	37.5	37.5	37.5	210		
39.5	38	38	38	38	220		
40	39	39	39	39	230		
40.5	40	40	40	40	240	4	
41	40	40	40	40	250		
41	41	41	41	41	260		
41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	270		
42	42	42	42	42	280		
42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	290		
43	43	43	43	43	300	5	

A	B	C	<u>TERMOPARES</u>		TIEMPO		INSOLACION
			D	E	Min.	Hrs.	
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café			wtt-hr/m ²
43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	310		
44	44	44	44	44	320		
44	44	44	44	44	330		
44.5	44.5	44.5	44.5	44.5	340		
45	45	45	45	45	350		
45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	360	6	
46	46	46	46	46	370		
46	46	46	46	46	380		
46	46	46	46	46	390		
45.5	46	46	46	46	400		
45.5	46	46	46	46	410		
45.5	46	46	46	46	420	7	5 152

RESULTADOS DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

45.5	46	46	46	46		0	
45.0	46	46	46	46		1	
44	46	46	46	46		2	
44	46	46	46	46		3	
43.5	46	46	46	46		4	
43	45.5	45.5	45.5	45.5		5	
43	45	45	45	45		6	
42.5	44.5	44.5	44.5	44.5		7	
42	44.5	44.5	44.5	44.5		8	
42	44	44	44	44		9	
42	44	44	44	44		10	
41	43.5	43.5	43.5	43.5		11	
40.5	43.5	43.5	43.5	43.5		12	
40.5	43	43	43	43		13	
40	42.5	42.5	42.5	42.5		14	
40	42	42	42	41.5		15	
41.5	42	42	42	42		16	

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 2.5 lt/min.

(SEGUNDO DIA)

A	B	C	<u>TERMOPARES</u>		TIEMPO		INSOLACION
			D	E	Min.	Hrs.	
AzÚI	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
40	40	40	40	40	0	0	0
40	40	40	40	40	10		
40	40	40	40	40	20		
40	40	40	40	40	30		
40	40	40	40	40	40		
40	40	40	40	40	50		
40	40	40	40	40	60	1	
40.5	41	41	41	41	70		
41	41.5	41.5	41.5	41.5	80		
41.5	42	42	42	42	90		
42	42	42	42	42	100		
42	42.5	42.5	42.5	42.5	110		
42.5	43	43	43	43	120	2	
43	43.5	43.5	43.5	43.5	130		
44	44	44	44	44	140		
44	44	44	44	44	150		
44.5	45	45	45	45	160		
45	45.5	45.5	45.5	45.5	170		
46	46	46	46	46	180	3	
46	46.5	46.5	46.5	46.5	190		
46.5	47	47	47	47	200		
47	47.5	47.5	47.5	47.5	210		
47.5	48	48	48	48	220		
48	48.5	48.5	48.5	48.5	230		
48	49	49	49	49	240	4	
49	49.5	49.5	49.5	49.5	250		
49.5	50	50	50	50	260		
49.5	50	50	50	50	270		
49.5	50	50	50	50	280		
49.5	50.5	50.5	50.5	50.5	290		

A	B	C	TERMOPARES		TIEMPO		INSOLACION wtt-hr/m ²
			D	E	Min.	Hrs.	
Azú1	Verde	Morado	Guinda	Café			
50	51	51	51	51	300	5	
51	51.5	51.5	51.5	51.5	310		
51.5	52	52	52	52	320		
51.5	52	52	52	52	330		
52	52.5	52.5	52.5	52.5	340		
52	52.5	52.5	52.5	52.5	350		
52.5	53	53	53	53	360	6	
52.5	53	53	53	53	370		
52.5	53	53	53	53	380		
52.5	53	53	53	53	390		
52.5	53.5	53.5	53.5	53.5	400		
52.5	53.5	53.5	53.5	53.5	410		
52.5	53.5	53.5	53.5	53.5	420	7	
52.5	54	54	54	54	430		
52.5	53.5	53.5	53.5	53.5	440		
52.5	53.5	53.5	53.5	53.5	450		
52.5	53.5	53.5	53.5	53.5	460		
52.5	53.5	53.5	53.5	53.5	470		
52	53	53	53	53	480	8	
52	53	53	53	53	490		
51.5	52.5	52.5	52.5	52.5	500		
51.5	52	51	52	52	510		

Debido a suspensión de labores en la Dirección, en los días siguientes de la semana, se detuvo la prueba.

GRAFICA REPRESENTATIVA DEL TANQUE A

UN FLUJO DE 2.5 Lt/min

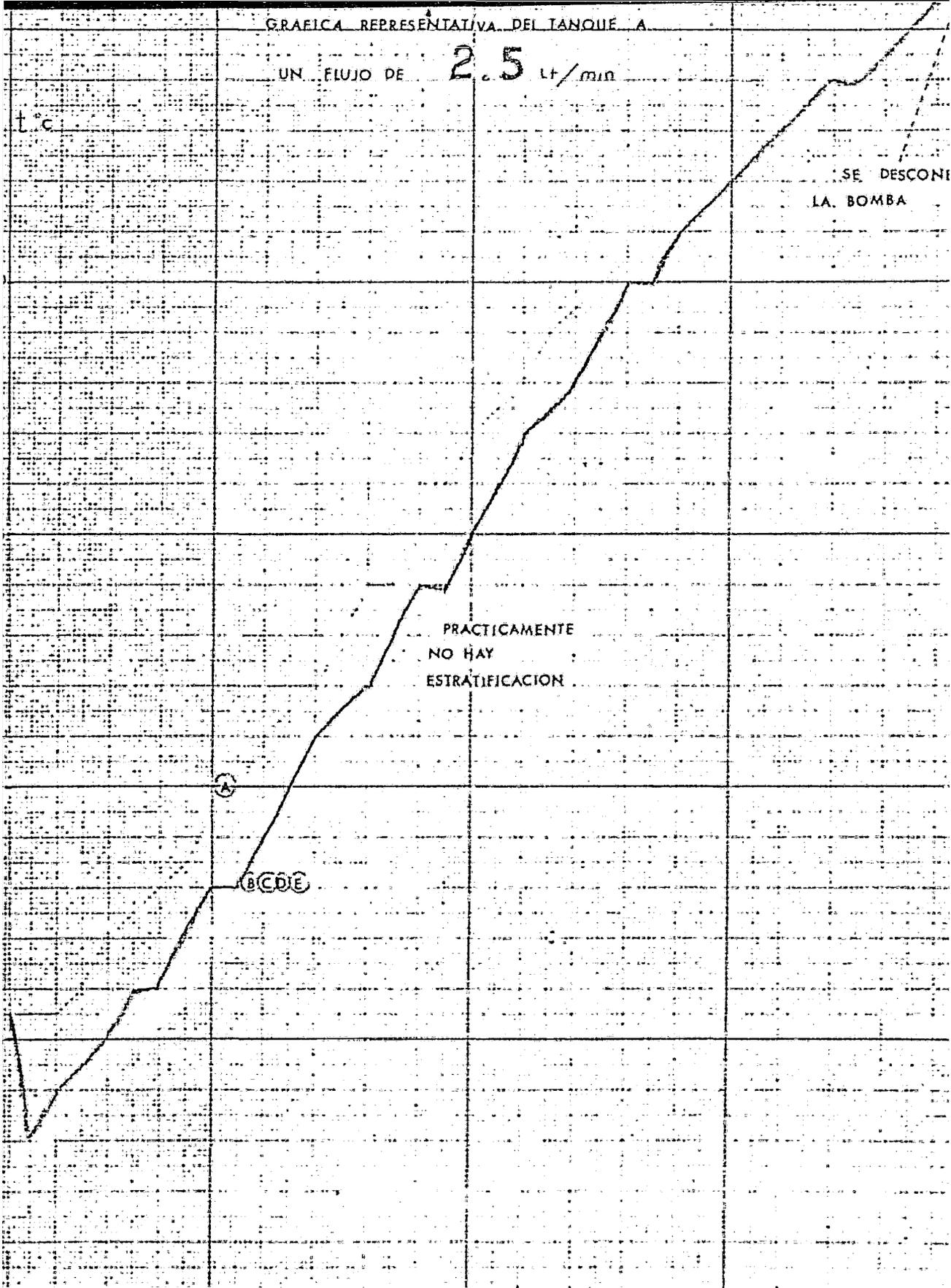
t °C

SE DESCONI
LA. BOMBA

PRACTICAMENTE
NO HAY
ESTRATIFICACION

(A)

(BCDE)



RESULTADOS DE TEMPERATURA DEL TANQUE A 3 lt/min.
(SEGUNDO DIA)

A	B	C	D	E	Min.	Hrs.	Wtt-hr/m ²
29.5	28.5	28.5	28.5	28.5	0	0	0
30	29	29	29	29	10		
30.5	29.5	29.5	29.5	29.5	20		
31	30.5	30.5	30.5	30.5	30		
32	31	31	31	31	40		
32.5	32	32	32	32	50		
33	32.5	32.5	32.5	32.5	60	1	
33.5	33	33	33	33	70		
34.5	34	34	34	34	80		
34.5	34.5	34.5	34.5	34.5	90		
35	35	35	35	35	100		
36	36	36	36	36	110		
36	36	36	36	36	120	2	
37	37	37	37	37	130		
38	38	38	38	38	140		
38.5	38.5	38.5	38.5	38.5	150		
39	39	39	39	39	160		
40	40	40	40	40	170		
41	41	41	41	41	180	3	
41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	190		
42	42	42	42	42	200		
42.5	42.5	42.5	42.5	42.5	210		
43	43	43	43	43	220		
44	44	44	44	44	230		
44	44	44	44	44	240	4	
44.5	45	45	45	45	250		
45	45.5	45.5	45.5	45.5	260		
45.5	46	46	46	46	270		
46	46	46	46	46	280		
46	46.5	46.5	46.5	46.5	290		

A	B	C	D	E	Min.	Hrs.	Wtt-hr/m ²
46.5	47	47	47	47	300	5	
47	47.5	47.5	47.5	47.5	310		
47.5	48	48	48	48	320		
47.5	48	48	48	48	330		
48	48	48	48	48	340		
48	48.5	48.5	48.5	48.5	350		
48	48.5	48.5	48.5	48.5	360	6	
48	48.5	48.5	48.5	48.5	370		
48	48.5	48.5	48.5	48.5	380		
48	48.5	48.5	48.5	48.5	390		
48	48.5	48.5	48.5	48.5	400		4 845

RESULTADOS DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

48	48.5	48.5	48.5	48.5		0
47	48	48	48	48		1
47	48	48	48	48		2
46	48	48	48	48		3
45.5	48	48	48	48		4
45	47.5	47.5	47.5	47.5		5
44.5	47	47	47	47		6
44	46.5	46.5	46.5	46.5		7
44	46	46	46	46		8
43.5	46	46	46	46		9
43	45.5	45.5	45.5	45.5		10
42.5	45	45	45	45		11
42.5	45	45	45	45		12
42	44	44	44	44		13
41.5	44	44	44	43.5		14
41.5	44	44	44	43.5		15
42	43.5	43.5	43.5	43		16

RESULTADOS DE TEMPERATURA DEL TANQUE A 3 lt/min.
(TERCER DIA)

A	B	C	D	E	Min.	Hrs.	Wtt-hr/m ²
40	40	40	40	40	0	0	0
40	40	40	40	40	10		
40	40	40	40	40	20		
39	40	40	40	40	30		
39	40	40	40	40	40		
39.5	40	40	40	40	50		
39.5	40	40	40	40	60	1	
39.5	40.5	40.5	40.5	40.5	70		
40	40.5	40.5	40.5	40.5	80		
40.5	41	41	41	41	90		
41	41.5	41.5	41.5	41.5	100		
41	41.5	41.5	41.5	41.5	110		
41.5	42	42	42	42	120	2	
42	42.5	42.5	42.5	42.5	130		
42.5	43	43	43	43	140		
43	43.5	43.5	43.5	43.5	150		
43.5	44	44	44	44	160		
43.5	44	44	44	44	170		
43.5	44	44	44	44	180	3	
45	45	45	45	45	190		
45	45.5	45.5	45.5	45.5	200		
45.5	46	46	46	46	210		
45.5	46.5	46.5	46.5	46.5	220		
46	47	47	47	47	230		
47	47.5	47.5	47.5	47.5	240	4	
47.5	48	48	48	48	250		
48	48.5	48.5	48.5	48.5	260		
48.5	49	49	49	49	270		
49	49.5	49.5	49.5	49.5	280		

(TERCER DIA)

A	B	C	D	E	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
49.5	50	50	50	50	290		
49.5	50.5	50.5	50.5	50.5	300	5	
50	50.5	50.5	50.5	50.5	310		
50.5	51	51	51	51	320		
51	51.5	51.5	51.5	51.5	330		
51.5	52	52	52	52	340		
51.5	52	52	52	52	350		
51.5	52.5	52.5	52.5	52.5	360	6	
52	52.5	52.5	52.5	52.5	370		
52	52.5	52.5	52.5	52.5	380		
52	53	53	53	53	390		
52	53	53	53	53	400		
52.5	53	53	53	53	410		
52.5	53	53	53	53	420	7	
52	53	53	53	53	430		
52	52.5	52.5	52.5	52.5	440		
52	52.5	52.5	52.5	52.5	450		
51.5	52.5	52.5	52.5	52.5	460		
51.	52	52	52	52	470		
51	52	52	52	52	480	8	5 117

 RESULTADO DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

A	B	C -	D	E	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
51	52	52	52	52		0	
50	52	52	52	52		1	
49.5	51.5	51.5	51.5	51.5		2	
49	51	51	51	51		3	
48.5	40.5	50.5	50.5	50.5		4	
48.5	50	50	50	50		5	
48	50	50	50	50		6	
47.5	49.5	49.5	49.5	49.5		7	
47	49	49	49	49		8	
46	49	49	49	49		9	
46	48	48	48	48		10	
46	48	48	48	48		11	
45.5	48	48	48	47.5		12	
45	47.5	47.5	47.5	46		13	
44.5	47	47	47	46		14	
44.5	46.5	46.5	46.5	45.5		15	
45	46	46	46	45		16	

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 3 lt/min.
(CUARTO DIA)

A	B	C	D	E	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
43	43	43	43	43	0	0	0
43	43	43	43	43	10		
43	43	43	43	43	20		
42.5	43	43	43	43	30		
42.5	43.5	43.5	43.5	43.5	40		
43	43.5	43.5	43.5	43.5	50		
43	44	44	44	44	60	1	
43.5	44	44	44	44	70		
43.5	44.5	44.5	44.5	44.5	80		
44	44.5	44.5	44.5	44.5	90		
44.5	45	45	45	45	100		
44.5	45.5	45.5	45.5	45.5	110		
45	46	46	46	46	120	2	
45.5	46	46	46	46	130		
45.5	46.5	46.5	46.5	46.5	140		
46	46.5	46.5	46.5	46.5	150		
46.5	47	47	47	47	160		
46.5	47.5	47.5	47.5	47.5	170		
47	48	48	48	48	180	3	
47.5	48	48	48	48	190		
47.5	48.5	48.5	48.5	48.5	200		
48	48.5	48.5	48.5	48.5	210		
48	49	49	49	49	220		
48.5	49.5	49.5	49.5	49.5	230		
49	49.5	49.5	49.5	49.5	240	4	
49	50	50	50	50	250		
49	50	50	50	50	260		
49	50	50	50	50	270		
48.5	50	50	50	50	280		
49.5	50	50	50	50	290		
49.5	50.5	50.5	50.5	50.5	300	5	

A	B	C	D	E	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
50	50.5	50.5	50.5	50.5	310		
50	51	51	51	51	320		
50.5	51	51	51	51	330		
50.5	51.5	51.5	51.5	51.5	340		
50.5	51	51	51	51	350		
50	51	51	51	51	360	6	

RESULTADOS DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

50	51	51	51	51		0
48	49.5	49.5	49.5	49.5		1
45	46.5	46.5	46.5	46.5		2
44	46	46	46	46		3
43.5	46	46	46	46		4
43.5	45.5	45.5	45.5	45.5		5
43	45.5	45.5	45.5	45.5		6
42.5	45	45	45	45		7
42.5	44.5	44.5	44.5	44.5		8
42	44	44	44	44		9
41.5	44	44	44	44		10
41	44	44	44	44		11
41	43.5	43.5	43.5	43.5		12
40.5	43	43	43	43		13
40	42.5	42.5	42.5	42.5		14
40	42	42	42	42		15
39.5	42	42	42	42		16
40	41.5	41.5	41.5	41.5		17
40.5	41.5	41.5	41.5	41.5		18
40.5	41.5	41.5	41.5	41.5		19

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE A 3 lt/min.
(QUINTO DIA)

A	B	C	D	E	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
40	40	40	40	40	0	0	0
40	40	40	40	40	10		
41	41	41	41	41	20		
41.5	41.5	41.5	41.5	41.5	30		
42	42	42	42	42	40		
42	42.5	42.5	42.5	42.5	50		
42.5	43	43	43	43	60	1	
43	43.5	43.5	43.5	43.5	70		
44	44	44	44	44	80		
44	44.5	44.5	44.5	44.5	90		
44.5	45	45	45	45	100		
45	45.5	45.5	45.5	45.5	110		
45.5	46	46	46	46	120	2	
46	46.5	46.5	46.5	46.5	130		
46.5	47	47	47	47	140		
47	47.5	47.5	47.5	47.5	150		
47.5	48	48	48	48	160		
48	48.5	48.5	48.5	48.5	170		
48.5	49	49	49	49	180	3	
48.5	49.5	49.5	49.5	49.5	190		
49	50	50	50	50	200		
49	50	50	50	50	210		
49.5	50.5	50.5	50.5	50.5	220		
50	51	51	51	51	230		
50	51	51	51	51	240	4	
50.5	51.5	51.5	51.5	51.5	250		
50.5	51.5	51.5	51.5	51.5	260		
50.5	51.5	51.5	51.5	51.5	270		
51	52	52	52	52	280		
51.5	52	52	52	52	290		

A	B	C	D	E	Min.	Hrs.	wtt-hr/m ²
51.5	52	52	52	52	300	5	
52	52.5	52.5	52.5	52.5	310		
52	53	53	53	53	320		
52	53	53	53	53	330		
52.5	53	53	53	53	340		
52.5	53	53	53	53	350		
52	53	53	53	53	360	6	
52	53	53	53	53	370		
52	53	53	53	53	380		
51.5	52.5	52.5	52.5	52.5	390		
51	52	52	52	52	400		
50	52	52	52	52	410		

GRAFICA REPRESENTATIVA DEL TANQUE A

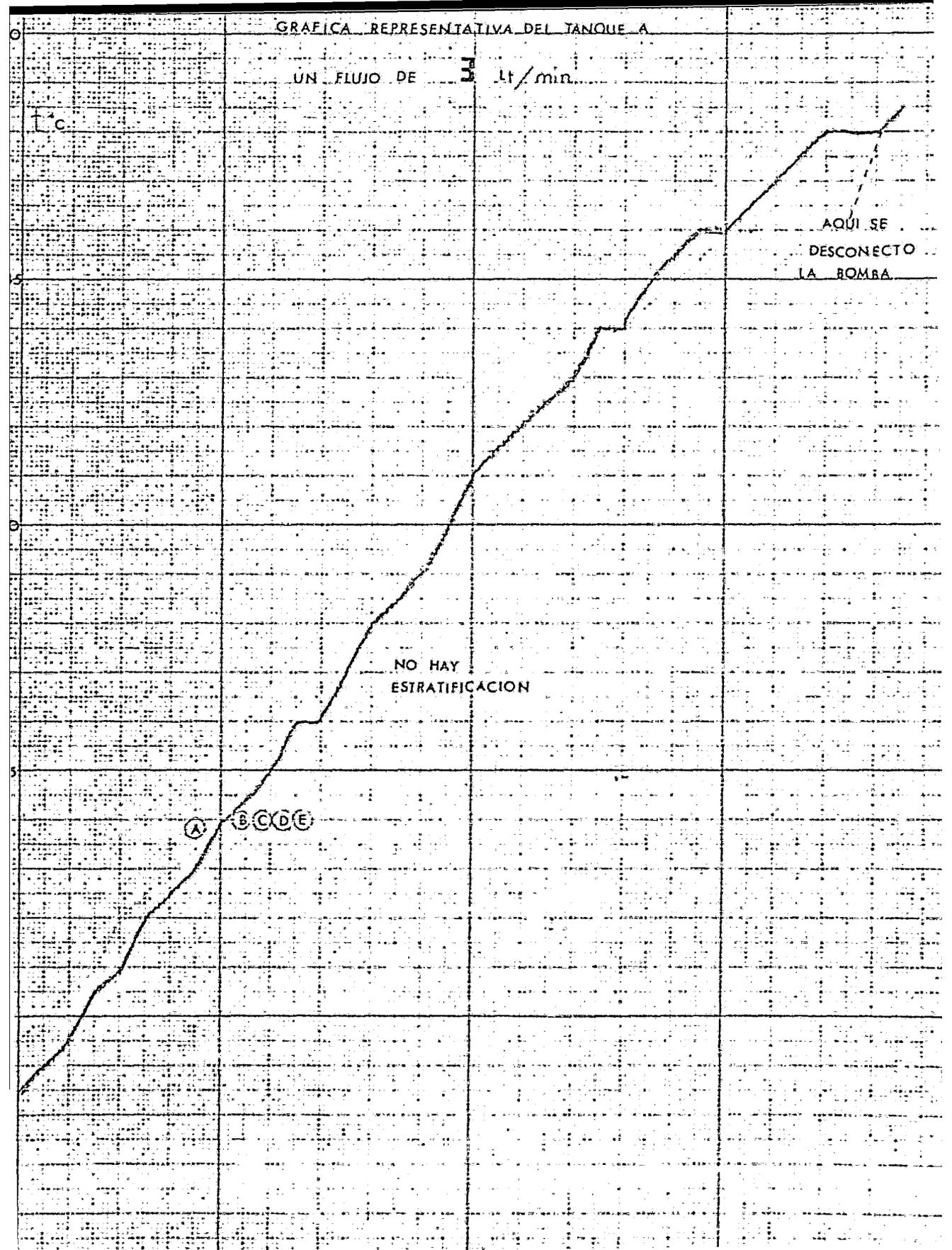
UN FLUJO DE 3 Lt/min.

$t^{\circ}C$

AQUÍ SE
DESCONECTO
LA BOMBA.

NO HAY
ESTRATIFICACION

(A) (B) (C) (D) (E)



De las cuales observamos que el flujo en el cual se presenta la mayor estratificación, es en el flujo de 1 lt/min.

De las demás gráficas observamos que; conforme aumenta el flujo, la estratificación disminuye y el tanque se calienta de una manera casi homogénea.

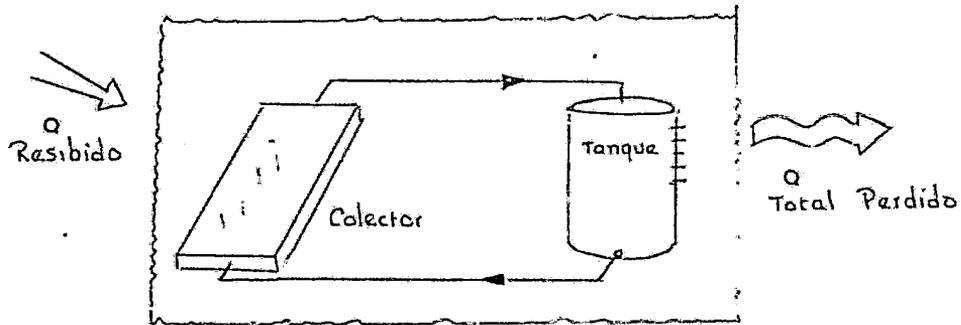
Por otro lado, en estas pruebas observamos que, el tanque está al inicio a una temperatura homogénea fría, después se va calentando presentándose poca o mucha estratificación (según sea el flujo) y después se homogeneiza a una temperatura final más alta, lo mismo que cuando se para la bomba, el tanque pasa de una temperatura homogénea alta a una temperatura final homogénea menos caliente.

Aprovechando sólo el análisis de estos puntos, de pasar el tanque de una temperatura homogénea inicial a una temperatura homogénea final, y sin dar importancia por ahora a la estratificación, podemos calcular:

- 1) Calor almacenado por un día.
- 2) Pérdidas de calor durante la noche.
- 3) Coeficiente total de pérdidas de calor del tanque
- 4) Eficiencia del tanque.

De la siguiente manera:

El sistema en general es:



1) CALOR ALMACENADO DURANTE EL DIA.

Como el tanque pasa de una temperatura homogénea inicial al comenzar la prueba, a una final homogénea (t_f) al terminar ésta, el calor almacenado durante la prueba estará dado por la siguiente ecuación:

$$Q_{alm} = m \bar{C}_p (t_f - t_i)$$

Donde:

Q_{alm} = Calor almacenado en el tanque

m = Masa total del fluido en el tanque (200 lt)

= (200 lt) (1Kg/lt) = 200 Kg.

\bar{C}_p = Capacidad calorífica media (1 Kcal/Kg °C)

t_f = Temperatura del tanque al finalizar la prueba.

t_i = Temperatura del tanque al inicio de la prueba.

Por ejemplo, para un flujo de 1 lt/min en el primer día, empieza con una t_f de 22°C y termina con una t_f de 36°C homogéneas, al substituir obtenemos:

$$Q_{alm} = 200 \text{ Kg} (1 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}) (36 - 22)^\circ\text{C}$$

$$Q_{alm} = 2800 \text{ Kcal.}$$

$$= (2800 \text{ Kcal}) (1 \text{ Btu}/0.252 \text{ Kcal}) (0.293 \text{ Wtt-hr}/1 \text{ Btu})$$

$$Q_{alm} = 3255.6 \text{ Wtt-hr.}$$

2) PERDIDAS DE CALOR DURANTE LA NOCHE

Las pérdidas de calor que ocurren durante el período de almacenamiento, son las que ocurren desde el momento en que se deja de alimentar calor al tanque, es decir, en el momento en que se para la bomba al finalizar la prueba, hasta el momento en que se inicia la otra, al siguiente día.

Por lo que el tanque pasará de una temperatura caliente a una temperatura fría T_f , a un volumen cte. y el calor perdido podrá calcularse como en el caso anterior.

$$Q_{pa} = m \bar{C}_p (T_i - T_f)$$

Donde:

Q_{pa} = Calor perdido durante el almacenamiento.

T_i = Temperatura inicial del tanque después de la prueba.

T_f = Temperatura final del tanque al siguiente día.

Que para el mismo caso anterior, del primer día a un flujo de 1 Lt /min, se dejó en $T_i = 36^\circ\text{C}$ y al siguiente día $T_f = 33^\circ\text{C}$, substituyendo obtendremos:

$$Q_{Pa} = 200 \text{ Kg (1 Kcal/Kg } ^\circ\text{C) (36 - 33) } ^\circ\text{C}$$

$$Q_{Pa} = 600 \text{ Kcal}$$

$$= 697.62 \text{ Wtt-hr.}$$

Como prácticamente (según los datos y gráficas de temperatura obteni--das del registrador) es lineal la caída de temperatura, durante el --- tiempo de almacenamiento; se puede obtener las pérdidas de calor por - unidad de tiempo.

Para nuestro ejemplo anterior tendremos (13 hrs. de almacenamiento).

$$\frac{Q_{Pa}}{\theta} = \frac{600 \text{ Kcal}}{13 \text{ hr}} = 46.2 \text{ Kcal/hr}$$

Es decir, que para el ejemplo anterior, el tanque pierde a través de - superficie total, 46.2 Kcal cada hora.

3) COEFICIENTE TOTAL DE PERDIDAS DE CALOR DEL TANQUE (U_t)

Según la ley de Fourier tenemos que:

$$Q = U_t A \Delta t \quad \dots \text{ que aplicada al tanque (pérdidas)}$$

$$Q_{Pa} = m \bar{C}_p (T_i - T_f) = U_t A_t \Delta_t \text{ por lo que}$$

$$Q_{Pa} = U_t A_t \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \Delta t_1 / \Delta t_2} \quad \text{Despejando tendremos:}$$

$$U_t = \frac{Q_{Pa}}{A_t (\Delta t_1 - \Delta t_2) / \ln \Delta t_1 / \Delta t_2}$$

Donde:

Q_{Pa} = Calor perdido durante el almacenamiento, por unidad de tiempo (Kcal/hr).

U_t = Coeficiente total de calor (Kcal/hr m² °C).

A_t = Area total del tanque (2.12 m²).

Δt_2 = (T₁ - t_{ambiente I})

Δt_1 = (T_f - t_{ambiente I})

Del ejemplo anterior en donde T_i = 33°C, t_{amb I} = 20°C y t_{amb} = 20°C, obtendremos al substituir:

$$U_t = \frac{46.2 \text{ Kcal/hr}}{2.12 \text{ m}^2 \left(\frac{16 - 13}{\ln 16/13} \right)} \quad \begin{array}{l} 36 - 20 = 13 \text{ }^\circ\text{C} \\ 33 - 20 = 16 \text{ }^\circ\text{C} \end{array}$$

4) EFICIENCIA DEL TANQUE (η_t)

La eficiencia del tanque está dada por la siguiente ecuación:

$$\eta_t = \frac{Q_{alm}}{Q_{util}}$$

Donde:

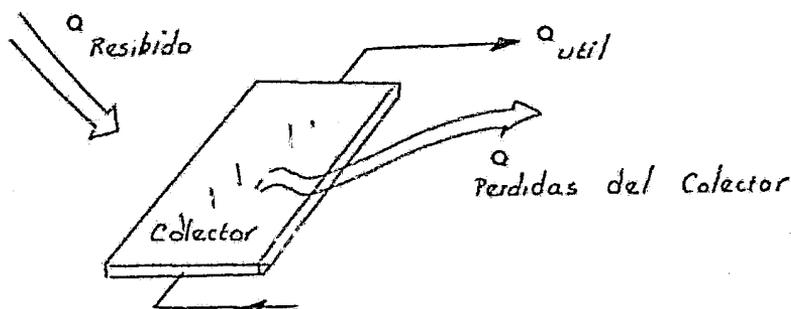
Q_{alm} = Calor almacenado en el tanque.

Q_{util} = Calor entregado por el colector hacia el tanque.

η_t = Eficiencia del tanque

El Q_{util} puede obtenerse de la manera siguiente:

Sabemos que el calor recibido por el colector, es igual al calor aprovechado más el calor perdido por el mismo, es decir:



$$Q_{resi} = Q_{util} + Q_{Pcol} \quad \text{Despejando}$$

$$Q_{util} = Q_{resi} - Q_{Pcol} \dots \dots \dots (A)$$

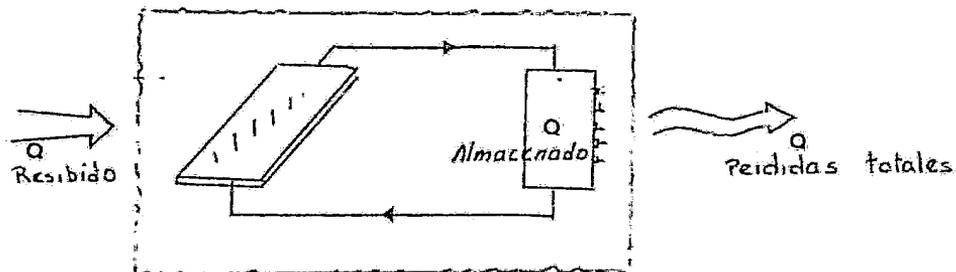
Donde: $Q_{resi} = I A_{col}$

I = Insolación (Ktt-hr/m^2)

A_{col} = Area del colector

$$= 2.1165 \text{ m}^2$$

Las pérdidas del colector se obtienen haciendo un balance total.



$$Q_{\text{resi}} = Q_{\text{almac}} + Q_{\text{p totales}} \quad \text{Despejando}$$

$$Q_{\text{p totales}} = Q_{\text{resi}} - Q_{\text{almac}}$$

Substituyendo valores del ejemplo anterior obtendremos:

$$\begin{aligned} Q_{\text{resi}} &= I A_{\text{col}} = (2323 \text{ Wtt-hr/m}^2) (2.1165 \text{ m}^2) \\ &= 4916.63 \text{ Wtt-hr} \\ &= 4228.64 \text{ Kcal} \end{aligned}$$

Como el $Q_{\text{alm}} = 2800 \text{ Kcal}$ (del ejemplo anterior) entonces:

∴

$$Q_{\text{p totales}} = (4228.64 \text{ Kcal}) - (2800 \text{ Kcal})$$

$$Q_{\text{p totales}} = 1428.64 \text{ Kcal.}$$

$$= 1661.08 \text{ Wtt-hr.}$$

Como $Q_{\text{p totales}} + Q_{\text{p tanque}} + Q_{\text{p colector}}$

$$= 1428.64 \text{ Kcal (para el ejemplo anterior)}$$

Despejando:

$$Q_p \text{ colector} = Q_p \text{ totales} - Q'_p \text{ tanque} \dots\dots (B)$$

Nota: El Q_p tanque es el calor perdido del tanque durante el período de prueba, NO es igual al calor perdido en el período de almacenamiento Q_{pa} .

Este Q'_p tanque se puede calcular por medio de la ley de Fourier:

$$Q'_p \text{ tanque} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \Delta t_2 / \Delta t_1}$$

Donde:

$Q'_p \text{ total}$ = Pérdidas de calor durante la prueba.

U_t = Coeficiente total de calor.

Δt_1 = $t_i - t_{\text{ambiente}_i}$

Δt_2 = $t_f - t_{\text{ambiente}_f}$

Substituyendo los valores del ejemplo anterior, para obtener las pérdidas del tanque durante la prueba:

$$Q_p^{\text{tanque}} = (1.5 \text{ Kcal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) (2.12) (16 - 1.5)/\ln 16/1.5$$

$$= 19.5 \text{ Kcal/hr}$$

Como la prueba duro 10 hrs.

$$22.5 - 24 = 1.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$36.0 - 20 = 16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$Q_p^{\text{tanque}} = 195 \text{ Kcal.}$$

Substituyendo en la ecuación (B) con $Q_p^{\text{total}} = 1428.64 \text{ Kcal.}$

$$Q_p^{\text{colec}} = 1428.64 - 195$$

$$= 1233.6 \text{ Kcal}$$

Ahora substituímos en la ecuación (A)

$$Q_{\text{util}} = Q_{\text{resi}} - Q_p^{\text{colector}}$$

$$= 4228.64 - 1233.6$$

$$= 2995 \text{ Kcal}$$

Por lo tanto, la eficiencia calculada para este ejemplo será:

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{alm}}}{Q_{\text{util}}} = \frac{2800 \text{ Kcal}}{2995 \text{ Kcal}} = 0.9355$$

$$= 93.5\%$$

A continuación se muestran en forma de tabla, los resultados obtenidos siguiendo las ecuaciones anteriores, para los demás días y demás flujos.

DATOS OBTENIDOS DE LAS GRAFICAS DEL REGISTRADOR

Flujo	Día	t_i	t_{amb_i}	t_f	t_{amb_f}	T_i	T_f	t_{amb_I}	t_{amb_F}	Θ_{pru}	Θ_{alm}
lt/min		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	hrs.	hrs.
1	1	22	24	36	20	36	33	20	20	10	13
	2	32	20	45	24	45	40	24	21	8	16
	3	40	21	53	30	53	46	30	21	7	16.5
	4	43	21	54	30	54	46	30	23	8	16
	5	46	23	54	31	54	--	31	--	6	--
1.5	1	29	26	36	22	36	33	22	20	5.5	18
	2	32	20	46	30*	46	41	30*	24	7.5	16
	3	40	24	51	26	51	42	26	24	8	16.5
	4	42	24	51	27	51	44	27	22	6	18
	5	44	22	50	24	50	--	24	--	7	--
2	1	26	27*	44	28	44	38	28	22	7	16
	4	34	22	48	29	48	43	29	20	7.5	16
	5	43	20	51	28	51	--	28	--	7.6	--
2.5	1	22	28	46	33	46	42	33	20	7	16
	2	42	20	53	31	53	--	31	--	8.5	--
3	2	27	24	48	33	48	41	33	20	6.6	16
	3	41	20	52	27	52	42	27	21	8	16
	4	42	21	51	30	51	41	30	25	6	19
	5	41	25	52	28	52	--	28	--	6.5	--

RESULTADOS DE LOS CALCULOS CON LAS ECUACIONES

Flujo	Día	Insolación	Q_{resi}	Q_{alma}	Q_{palm}	U_t	$Q_{p_{tan}}$	Q_{util}	η_t
lt/min		Wtt-hrs/m ²	Kcal	Kcal	Kcal	$\frac{Kcal}{h.m.C}$	Kcal	Kcal	T
	1	2323	4926	2800	600	1.5	195	2995	94
	2	4137	7542	2600	1000	1.5	355	2955	88
1	3	----	----	2600	1400	1.6	497	----	--
	4	52409	9554	2200	1400	1.7	662	2863	76
	5	3222	5875	1600	----	---	---	----	--
	1	3539	6453	1400	600	1.2	100	1500	93
	2	4625	8419	2800	1000	1.8	398	3198	87.5
1.5	3	4856	8840	2200	1800	2.0	648	2884	76.3
	4	3714	6761	1800	1400	1.6	422	2222	81
	5	3817	6948	1200	----	---	---	----	--
	1	2233	4065	3600	1200	2.1	160	3760	95.7
2	4	4674	8508	2800	1000	1.4	339	3139	89
	5	4862	8850	1600	----	---	---	----	--
	1	5152	9378	4800	800	1.4	430	5230	91.7
2.5	2	5528	10063	2200	----	---	---	----	----
	2	4845	8820	4200	1400	2.3	240	4400	94.6
3	3	5117	9315	2200	2000	2.6	1011	3212	68
	4	----	----	1800	2000	2.7	----	----	----
	5	9565	17411	2200	----	---	----	----	----

B. Pruebas con el tanque en su mayor estratificación

- 1) Se llena el tanque con agua de la línea, conectando la manguera de suministro, a la llave superior del tanque.
- 2) Se procede a llenar las tuberías, abriendo todas las llaves (para eliminar burbujas).
- 3) Se arranca la bomba teniendo cuidado de que el flotador (rotámetro) del medidor de flujo se mantenga al máximo.
- 4) Una vez conseguido ésto, se cierra poco a poco la llave (B) hasta que el medidor marque 1 lt/min (flujo el cual se favorece la estratificación).
- 5) Se enciende rápidamente el registrador y el medidor de insolación anotando a la vez en el papel registrador la fecha y hora en que se inicia la prueba.
- 6) Se deja encendida la bomba, hasta que se alcance la mayor estratificación, que se observará en las gráficas del registrador, cuando las líneas de temperatura de entrada y salida del tanque estén muy separadas y empiecen a juntarse.
- 7) Se apaga la bomba y el medidor de insolación teniendo cuidado de anotar en el papel registrador la hora y la insolación acumulada, y se deja encendido el registrador para observar el comportamien-

to de las temperaturas en el interior del tanque estratificado durante la noche (período de almacenamiento).

RESULTADOS

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DEL TANQUE EN SU MAYOR
ESTRATIFICACION (1 lt/min)

A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Café	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	Wtt-hr/m ²
19	19	19	19	19	0	0	0
23	21	20	20	19	10		
24	22	20.5	20	19	20		
24.5	23.5	23.5	20	19	30		
24	23.5	23.5	20	19.5	40		
24.5	24	24	20.5	20	50		
24.5	24	24	22	20	60	1	
25	24.5	24	23	20	70		
25.5	25	25	23.5	20.5	80		
25	25	25	24	22	90		
26	25	24.5	24.5	22.5	100		
27	26.5	25	24.5	23.5	110		
28	27	26	24.5	24	120	2	
29	28	26.5	24.5	24	130		
29	28.5	27.5	24.5	24.5	140		
28	28	28	25.5	24.5	150		1 153

RESULTADOS DESPUES DE APAGAR LA BOMBA

28	28	28	25.5	24.5		0	
28	28	28	26	24		1	
28	28	28	26	24		2	
28	28	28	26	24		3	
27.5	28	28	26	24		4	
27	28	27.5	26	24		5	
26	28	27.5	26	24		6	
26	28	27.5	26	24		7	
25.5	28	27.5	25.5	24		8	
25.5	27.5	27	25.5	24		10	

A	B	C	D	E	TIEMPO		INSOLACION
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café	Min.	Hrs.	Wtt-hr/m ²
25	27	26.5	25.5	24		11	
24.5	26.5	26.5	25	24		12	
24.5	26.5	26.5	25	24		13	
24.5	26	26	25	24		14	
24	26	26	25	23.5		15	
24	26	26	25	23.5		16	
24	26	26	24.5	23.5		17	
24	26	26	25	23		18	
25	25.5	25.5	25	23		19	
26	26	26	25	23		20	

GRAFICA DEL TANQUE PARA ALCANZAR LA MAYOR ESTRATIFICACION

A UN FLUJO DE 1 Lt/min

$t^{\circ}C$

30

25

20

A

B

C

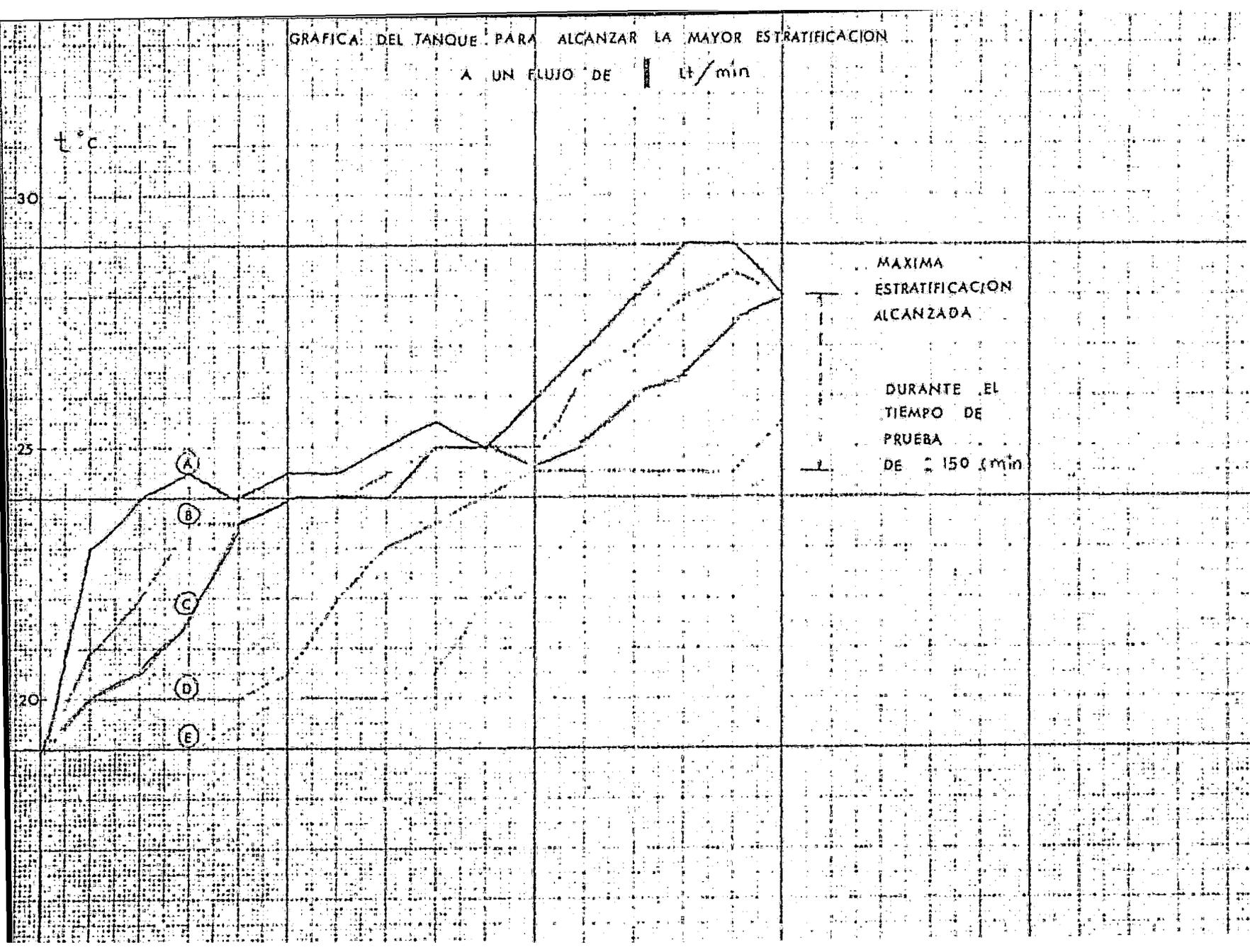
D

E

MAXIMA
ESTRATIFICACION
ALCANZADA

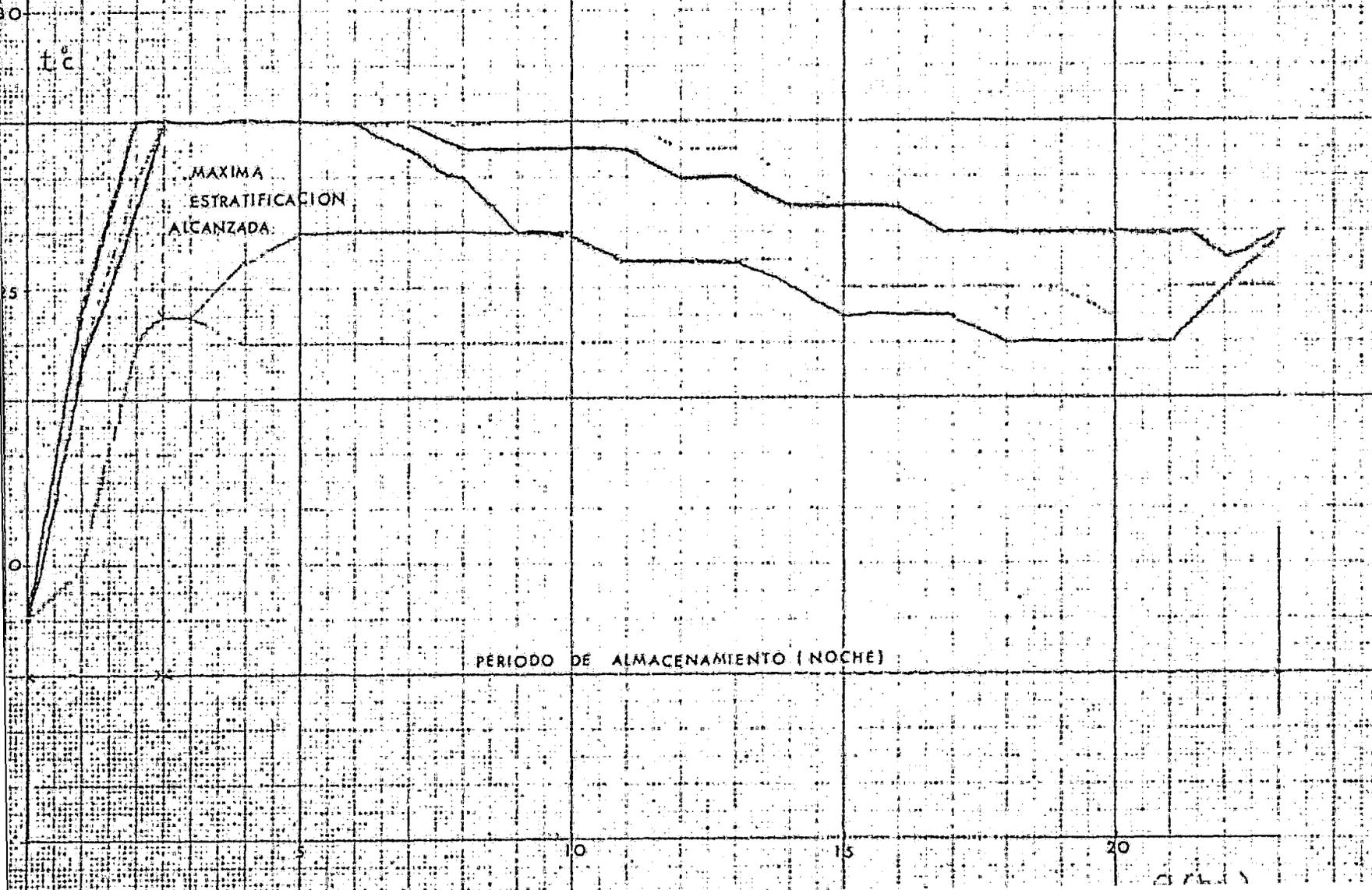
DURANTE EL
TIEMPO DE
PRUEBA

DE 150 (min)



GRAFICA DEL TANQUE DESPUES DE ALCANZAR LA ESTRATIFICACION.

(PERDIDAS NOCTURNAS DEL ALMACENAMIENTO)



RESULTADOS

Como observamos en las dos gráficas obtenidas, la estratificación ayuda en el tanque a guardar el calor almacenado, porque el calor de la parte superior pasa poco a poco hacia la parte inferior (más fría).

Aunque esto no quiera decir, que no se presenten pérdidas hacia el exterior del tanque, sino que si las hay, como se observa en la segunda gráfica, en la cual la parte del fondo del tanque (parte fría), se debe de calentar o al menos permanecer a la misma temperatura, al ganar el calor difundido de la parte superior caliente del tanque; cosa que no ocurre sino que también se enfría un grado, lo que significa que el tanque pierde calor al exterior.

Con los resultados de temperaturas obtenidos podremos calcular el calor recibido, de la manera siguiente:

$$\begin{aligned} Q_{\text{res}} &= I A \\ &= (1153 \text{ wtt-hr/m}^2) (1.82 \times 0.88) \text{ m}^2 \\ &= 1844.8 \text{ Wtt-hr.} \\ Q_{\text{res}} &= \end{aligned}$$

Como se estratificó el tanque, se presentan zonas a diferentes temperaturas, por lo que podremos calcular el calor acumulado en cada una de esas secciones de 15 cm c/u (aproximadamente).

Dicho calor se puede calcular, analizando las fronteras de temperaturas inicial y final de cada sección, y utilizando solamente la ecuación:

$$Q_{alm} = m \bar{C}_p (t_2 - t_1)$$

El volumen de cada sección de 15 cm c/u, es de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V = \pi r^2 h$$

$$V = \pi (28.75 \text{ cm})^2 (15 \text{ cm})$$

$$V = 38.95 \text{ lt.}$$

La masa de este volumen será;

$$M = V \cdot \rho$$

$$M = (38.95 \text{ l}) (1 \text{ Kg/l})$$

$$M = 38.95 \text{ l.}$$

Con esto y las temperaturas finales e iniciales, resumimos la tabla siguiente:

t_1	t_2	Sección	$Q_{\text{almacenado}}$
°C	°C		Kcal
19	28	A	350.5
19	28	B	350.5
19	28	C	350.5
19	25.5	D	253.2
19	24.5	E	<u>214.2</u>
Total almacenado			1 418.9

El calor perdido por cada sección también se calcula así:

t_1	t_2	Sección	$Q_{\text{almacenado}}$
°C	°C		Kcal
28	24	A	155.8
28	26	B	77.9
28	26	C	77.0
25.5	25	D	19.5
24.5	23	E	<u>58.4</u>
			389.5 Kcal

Estas 389.5 Kcal perdidas, ocurren en un tiempo de 18 hrs., que comparadas con las pérdidas comunes, en el tanque cuando no está estratificado, es relativamente baja.

Porque las pérdidas que ocurren en el tanque no estratificado, las más bajas son de 600 Kcal en un tiempo 13 a 16 hrs, y en el tanque estratificado a un mayor tiempo de almacenamiento de 18 horas, sólo se pierde 389.5 Kcal.

Por otro lado, de acuerdo a la ecuación de eficiencia para colectores:

m = Flujo masico.

$$\eta = \frac{m C_p (T_s - T_e)}{I A}$$

C_p = Capacidad calorífica del agua.

T_e = Temp. del fluido a la salida del colector.

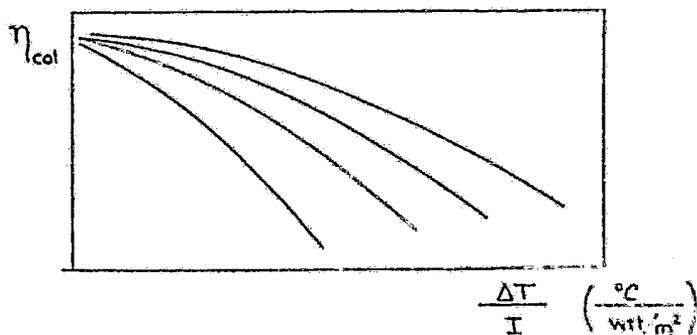
T_s = Temp. del fluido a la entrada del colector.

I = Insolación.

A = Area del colector.

Se observa que a medida que aumenta la temperatura del agua a la entrada del colector (siendo los demás términos cts.) la eficiencia del mismo disminuye.

Esto también se observa, al graficar: $(\eta \text{ vs } \frac{\Delta T}{I})$

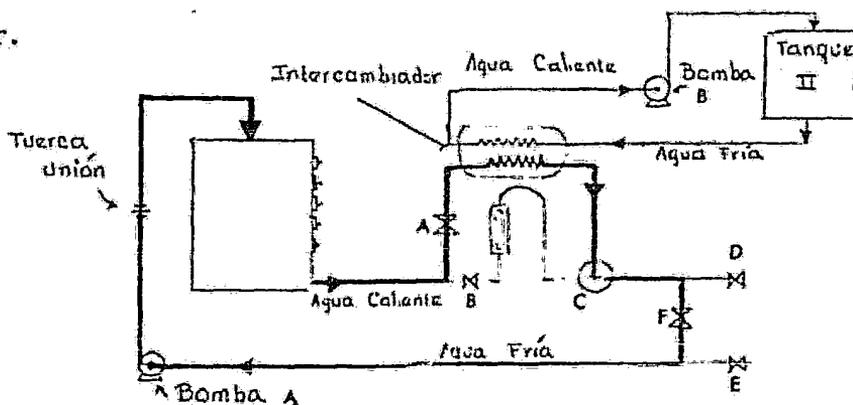


Esto ocurre cuando al recircular el agua del tanque, por el recolector y al calentarse ésta con el tiempo, si dejamos que se homogeneíse, entonces en vez de sacar agua fría y recircularla por el colector, sacaríamos agua caliente ocasionando una disminución en la eficiencia del mismo.

Esto no ocurre cuando el tanque se estratifica, ya que mantendremos -- siempre dos zonas de temperatura, una caliente en la parte del domo -- del tanque y una fría (fondo del mismo), de la cual alimentaríamos hacia el colector manteniendo una eficiencia de trabajo constante.

C. Calor entregado por el tanque después del almacenamiento

- 1) Después de las pruebas de estratificación hechas al tanque, la semana anterior y para aprovechar el calor contenido dentro de él, se conectó la bomba para suministrar más calor hasta homogeneizarlo, logrando elevar la temperatura hasta 40°C en su totalidad (esto durante todo el día y a causa de que éste y todos los días anteriores habían sido muy nublados).
- 2) Después se desconectó la bomba y se cerró la válvula (B), D y E, abriendo la válvula (A), y girando la válvula (C), (de tres vías) de tal manera que deje pasar el flujo que vendrá del intercambiador.



Se esperaron unos minutos para el llenado de las tuberías o por donde circulará el fluido. Se homogeneizó el tanque porque: si se tuviera estratificado (como realmente debe ser), la zona caliente estaría en la parte de arriba y como se quiere sacar agua caliente, hacia el intercambiador para ceder su carga de energía, se tendría que poner otra salida de agua a esa altura, como no la tenemos, necesitamos homogeneizar todo el tanque para tener así -

gua caliente en todo su interior, hasta en la parte inferior que es donde tenemos la salida del agua.

- 3) Se arrancó la bomba (A) y para asegurar que no hubiera burbujas y fluyera el agua (ya que no se podía detectar el flujo a simple vista por no intervenir ningún medidor en la línea), se quitó la tuerca unión, entre la tubería de la bomba (A) y el tanque, observándo se que sí había flujo (en caso contrario, habría que esperarse --- otros minutos con las válvulas abiertas, para asegurar un llenado completo en las tuberías), a la vez se aprovechó para medir el flujo con una probeta graduada de 500 ml. tomando el tiempo en que -- tardaba en llenarse.
- 4) Una vez hecho esto se volvió a unir la tubería y se llenó el tan--que II con agua de la línea, a la vez se conectó a éste un termopar para detectar sus cambios de temperatura en la prueba.
- 5) Se conectó la bomba (B), abriendo todas las válvulas de la línea - por donde pasará el agua fría, es decir: del tanque II pasará por los intercambiadores y regresará a éste.

Se midió el flujo de la bomba (B) por medio de la probeta ya que - tampoco interviene algún medidor en esta tubería.

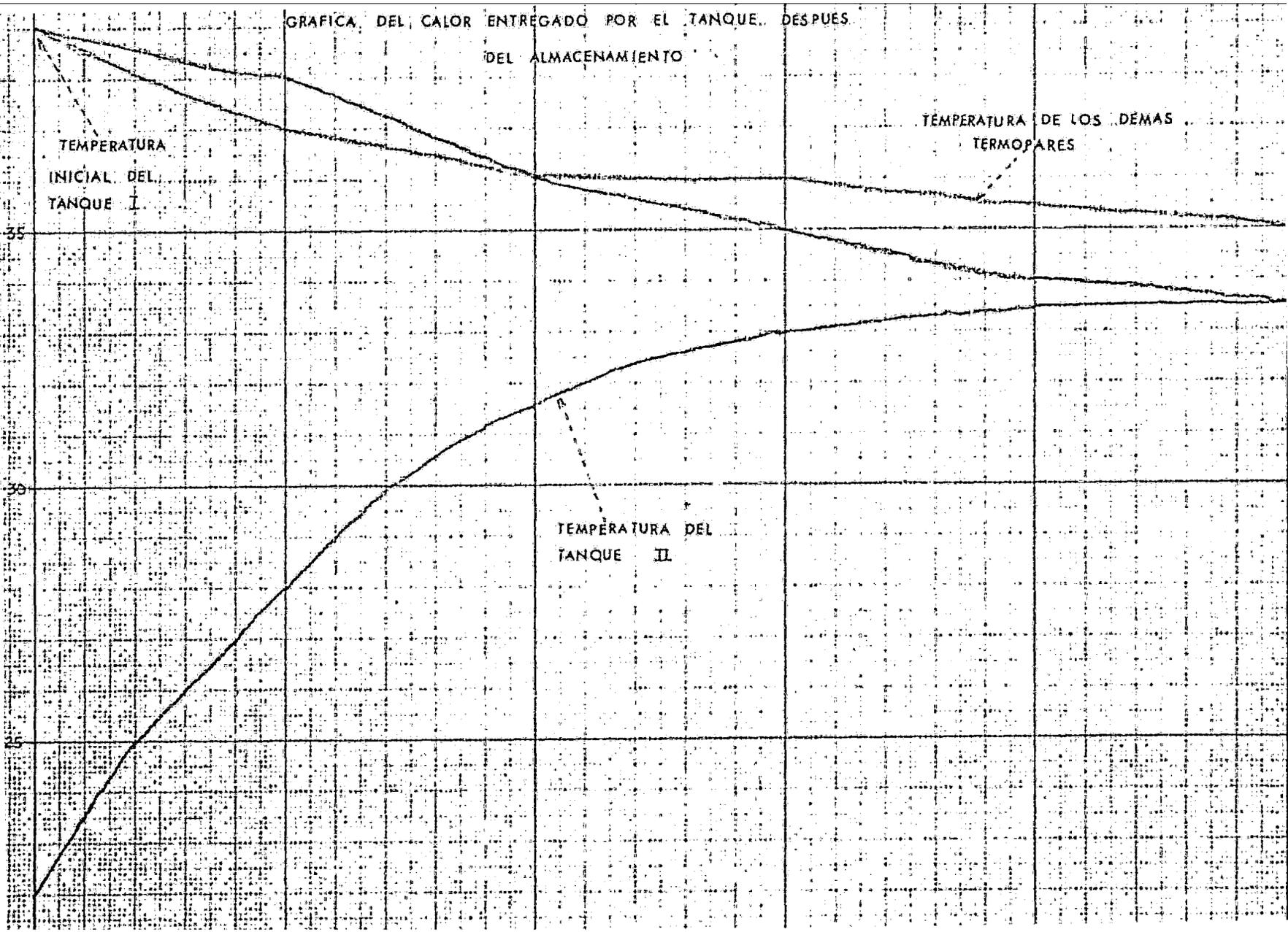
- 6) Hecho todo lo anterior, se comienza aprobar arrancando la bomba (A) y (B), al mismo tiempo que el registrador, observando en el papel

registrador los cambios de temperatura en el tanque de almacenamiento y en el tanque II de agua fría.

RESULTADOS DE TEMPERATURAS DE LOS DOS TANQUES

Tanque de Almacenamiento					Tanque II	
A	B	C	D	E	T	TIEMPO
Azúl	Verde	Morado	Guinda	Café	Rojo	Min.
39	39	39	39	39	22	0
38	37	37	37	37	28	10
36	36	36	36	36	31.5	20
35	36	36	36	36	33	40
34	35.5	35.5	35.5	35.5	33.5	40
33.5	35	35	35	35	33.5	50

GRAFICA DEL CALOR ENTREGADO POR EL TANQUE, DESPUES
DEL ALMACENAMIENTO



TEMPERATURA
INICIAL DEL
TANQUE I

TEMPERATURA DE LOS DEMAS
TERMOPARES

TEMPERATURA DEL
TANQUE II

CONCLUSIONES

La estratificación viene a ser un método con el cual se mantiene almacenada durante más tiempo una cierta cantidad de energía en un tanque de almacenamiento térmico.

Esto es ventajoso para el caso del calentamiento de agua en el hogar, porque así durante el día se calienta agua y por medio de este procedimiento se mantiene el agua caliente por la noche.

El sistema de almacenamiento es un sistema que hace continuo el aprovechamiento de energía solar, es decir, durante el día cuando hay sol se obtiene agua caliente por medio de los colectores o concentradores, y por la noche cuando no hay sol, seguir teniendo agua caliente por medio de este tanque de almacenamiento.

Por otro lado el flujo recomendado para que circule el agua por el concentrador, deberá ser entre 0.5, y un litro por minuto o bien, por termosifón (desgraciadamente, no se pudo efectuar esta última prueba), -- en el cual el agua circula sola, debido a la diferencia de las densidades que se presentan al calentarse el agua pasa por el colector, es decir, el agua fría sale del fondo del tanque y entra en la parte inferior del colector, al irse calentando el agua, será más ligera y tenderá a subir y salir por arriba del colector, entrando en el domo del tanque hace calentarse toda el agua del interior del tanque.

Esto, ahorraría el costo de la bomba, pero bajaría la eficiencia del calor, porque a la vez dentro del mismo, el agua caliente estaría más tiempo y parte de ese calor ganado lo pierde por radiación.

En el aspecto comercial, un calentador solar viene a ser a la larga == un sistema más económico que un calentador ordinario, desgraciadamente aún no están tan popularizados como ellos.

CONCLUSIONES FINALES

La energía solar viene a ser una gran alternativa, para los problemas de energéticos que se presentan o se presentarán en el mundo, no tan sólo porque es gratuita, sino porque principalmente no es contaminante y porque el sol lo tendremos por muchos miles de años.

Una de las formas de aprovecharla es la que se trata en esta tesis, - pero hay otras más como: la Biomasa, Eólica, el Lasser, Fotoeléctrica, etc., todas ellas con muy bajo desarrollo por la poca atención que se les da y lógicamente a baja escala antieconómica, pero en un futuro no muy lejano, cuando las reservas de energía estén por agotarse o se hayan agotado, es cuando en verdad se dará una mayor importancia en - el buscar otras fuentes de energía y entre ellas estará principalmente la energía solar.

RECOMENDACIONES

Al hacer un tanque de almacenamiento térmico es recomendable sacar el agua a calentar por el fondo del mismo, y la caliente suministrarla - por arriba para obtener una mayor estratificación.

Para aprovechar una vez almacenada el agua caliente es recomendable - sacarla por la parte del domo o a un lado de la parte de arriba, porque como el agua caliente es menos densa y tiende a subir, se encuentra en el domo y la fría se encontrará en el fondo, con lo que si sacamos agua del fondo obtendremos sólo agua fría.

Si el sistema a instalar es un sistema forzado (se utiliza una bomba) es recomendable colocarla después de la salida del tanque y mandarla al colector, porque si se coloca después del colector, hay que esperar a que se llene la tubería, presentando problemas de tiempo y cavitación.

BIBLIOGRAFIA

1. Electricidad Solar (estudio económico de la energía solar) Wolfgang Palz, Físico. Editorial Blume, 2a. edición.
2. Solar Energy Thermal Processes. John A. Duffie, William A. Beckman.
3. Principles of Solar Engineering. Frank Kreith/Jan F. Kreider, - - Mc Graw Hill Book Company.
4. Curso teórico práctico sobre energía solar y sus colaterales. Eolica y Biomasa. S.A.H.O.P. DIGAASES, Tomo I, 1980.
5. Solar Thermal Power Systems. Prepared for U.S. Department of -- Energy. Assistant Secretary for Energy Technology office of solar Geothermal, Electric and storage systems Washington, D.C. 20545, - December, 1978.
6. Interagency Coordination Meeting of Energy Storage. Sponsored by U.S. Department of Energy. Assistant Secretary for Energy Technology division of Energy Storage Systems, September, 1977.
7. Termodinamica. José A. Manrique, Ph.D, Rafael S. Cárdenas, M.C. - Edit. Harla
8. Solar Thermal Power Stations. International Symposium. Abril 11, 13, 1978. Cologne.
9. Solar Energy Handbook. Jan F. Kreider, Frank Kreith, Mc Graw Hill book Comp.
10. Thermodynamic Cycles and Processes. Hoyle and Clarke Longman, 1973.

11. Energía. Colección Científica de Time Life. Mitchell Wilson, 1977.
12. Sunworld (International Solar Energy Society), Volúmen V, No. 3, 1981, Published by Pergamon Press.
13. Curso Nacional sobre Energía Solar y Colaterales. S.A.H.O.P. DIGAASES Secretaría de Bienes Inmuebles y Obras Urbanas.
14. Thermodynamics. Lee-Sears, 2a. edición, Addison Wesley.