

Rubén Carrión  
013103

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

"IMPORTANCIA DEL TIPO DE COBERTURAS Y SU SEPARACION EN LAS  
PERDIDAS DE CALOR HACIA ARRIBA DE UN COLECTOR SOLAR PLANO".



\*D-6734\*

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE :

INGENIERO MECANICO

PRESENTADA POR:

JAIME ARTURO CHAVEZ GARCIA

GUAYAQUIL - ECUADOR

1982

A G R A D E C I M I E N T O

AL ING. FRANCISCO SANTELLI P.  
Director de Tesis, por su pa  
ciencia, ayuda y colaboración,  
para la realización de este -  
trabajo.

D E D I C A T O R I A

A MIS PADRES

A MIS 6 HERMANOS

A MIS ABUELITAS

*Francisco Santelli P.*

---

ING. FRANCISCO SANTELLI P.  
DIRECTOR DE TESIS

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Jaime Arturo Chavez Garcia", written over a horizontal dashed line.

JAIME ARTURO CHAVEZ GARCIA

## RESUMEN

El presente trabajo experimental, enfoca el problema de como mejorar la eficiencia de un colector solar de placa plana con tres cubiertas mediante el empleo de una separación óptima entre las cubiertas transparentes y la mejor combinación posible de materiales para las mismas. Se presentan detalles en la determinación del rendimiento del captador, prescindiéndose de explicaciones teóricas detalladas dando un mayor énfasis, a la parte experimental.

Se estudia lo que sería un colector doméstico de calentamiento de aire, se dan detalles de su construcción, intentando resolverse cuestiones prácticas que puedan ayudar en la optimización del mismo.

Se diseña, construye y prueba un colector solar de placa plana con tres cubiertas, a través del cual circula aire por un ducto rectangular en regimen turbulento. Analizando las pérdidas hacia arriba y su efecto en la eficiencia del colector, las cuales en un colector aislado son las más importantes. Estas pérdidas son evaluadas para diferentes temperaturas de la placa absorbadora.

En el desarrollo de la experiencia se prueban diferentes arreglos, variando los espaciamientos entre las cubiertas y los materiales de los mismos, hasta obtener mediante un análisis comparativo el mejor arreglo. Se discuten los posibles materiales que se pueden emplear en las cubiertas, señalando sus características elementales.

Los resultados de las pruebas son presentados gráficamente para su correcta evaluación.

## INDICE GENERAL

	<u>PAG</u>
RESUMEN -----	VI
INDICE GENERAL-----	VIII
INDICE DE FIGURAS-----	XI
INDICE DE TABLAS -----	XIII
INTRODUCCION -----	14
CAPITULO I	
★ 1. LA ENERGIA SOLAR-----	17
1.1. GENERALIDADES -----	17
1.2. CAPTADORES DE LA ENERGIA -----	20
1.3. MEDICION-----	23
1.3.1. Cálculos teóricos -----	24
1.3.2. Aparatos medidores -----	26
1.4. UTILIZACION DE LA ENERGIA -----	31
1.5. EL COLECTOR SOLAR PLANO -----	35
CAPITULO II	
2. SINTESIS DEL PROYECTO-----	43
2.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO -----	43
2.2. DESCRIPCION DEL COLECTOR A ENSAYAR -----	44

	<u>PAG</u>
2.2.1. Características principales -----	45
2.2.2. Dimensionamiento -----	51
2.3. REGULACIONES EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO -----	57
2.4. DATOS METEOROLOGICOS -----	72
 CAPITULO III	
3. TEORIA -----	76
3.1. PRINCIPIOS TERMODINAMICOS Y DE TRANSFERENCIA DE CA- LOR EN ENERGIA SOLAR -----	76
3.2. ESTUDIO DE LA EFICACIA DEL COLECTOR -----	86
3.2.1. Factores que influyen en el diseño -----	86
3.2.2. Pérdidas de calor -----	100
3.3. COBERTURAS DEL COLECTOR -----	115
3.3.1. Selección y propiedades de los materiales --	115
3.3.2. Determinación del arreglo más adecuado -----	135
3.4. ESTUDIO DEL SISTEMA EN GENERAL -----	140
 CAPITULO IV	
4. EXPERIMENTACION -----	147
4.1. MONTAJE DEL COLECTOR -----	147
4.1.1. Colocación -----	147
4.1.2. Instalación y ajuste de aparatos -----	155

	<u>PAG</u>
4.1.3. Equipo utilizado -----	161
4.2. ENSAYOS EN EL COLECTOR -----	167
4.2.1. Explicación del funcionamiento -----	167
4.2.2. Variación de la <u>distancia</u> entre coberturas pa ra la determinación de la separación óptima--	176
4.3. CONSTRUCCION DE CURVAS CARACTERISTICAS -----	177
 CAPITULO V	
5. RESULTADOS -----	189
5.1. ANALISIS DE RESULTADOS -----	189
5.2. COMPARACION DE EFICIENCIAS -----	193
5.3. COSTO DEL COLECTOR -----	199
5.3.1. Valor Actual -----	199
5.3.2. Perspectivas -----	206
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	211
APENDICES -----	220
BIBLIOGRAFIA -----	244

## INDICE DE FIGURAS

<u>FIGS.</u>		<u>PAGS</u>
1	TIPOS DE RADIACION-----	25
2	DIMENSIONES DEL DUCTO -----	54
3	DIMENSIONES CORTE TRANSVERSAL -----	58
4	DIMENSIONES CORTE LONGITUDINAL -----	59
5	DIMENSIONES DE LA CAJA DE MADERA -----	60
6	BASE DE COLECTOR -----	61
7	SALIDA DEL DUCTO -----	62
8	CIRCUITO PRIMARIO -----	64
9	CIRCUITO SECUNDARIO -----	65
10	INSTALACION DE TERMOCUPLAS-----	67
11	INSTALACION DE TERMOCUPLAS -----	68
12	ESPACIAMIENTO Y AISLAMIENTO LATERAL -----	69
13	COLECTOR LISTO PARA ENSAYARLO -----	73
14	PERDIDAS EN EL COLECTOR -----	102
15	INTERCAMBIO DE CALOR EN LAS CUBIERTAS -----	106
16	RED DEL SISTEMA -----	109
17	PERDIDAS POR LOS LATERALES -----	114
18	PROPIEDADES DEL TEFLON -----	133
19	PROPIEDADES DEL TEFLON -----	134
20	PROCESO TERMICO GENERAL -----	142

FIG.

PAGS.

21	UBICACION DE COLECTORES -----	150
22	EQUIPOS DE MEDICION -----	157
23	ESQUEMA DEL SISTEMA DE PRUEBA -----	159
24	EQUIPOS DE LABORATORIO -----	160
25	UBICACION DE TERMOCUPLAS -----	162
26	UBICACION DE TERMOCUPLAS -----	163
27	UBICACION DE TERMOCUPLAS -----	164
28	EQUIPO MEDIDOR DE RADIACION -----	166
29	TUBOS DE PITOT ESTATICOS -----	169
30	EQUIPOS -----	170
31	FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA -----	172
32	ESPACIAMIENTOS -----	179
33	PASOS EN LA OPTIMIZACION DEL ESPACIAMIENTO Y ARREGLO DE LAS CUBIERTAS -----	194
34	UTILIDAD DE LA INVERSION -----	205

## INDICE DE TABLAS

<u>Nº</u>		<u>PAGS</u>
1	PROPIEDADES DE LOS METALES -----	47
2	PROPIEDADES RADIATIVAS DEL TEFLON (0,001" ESPESOR) RE CEPTANDO RADIACION TERMICA DESDE UNA SUPERFICIE GRIS O NEGRA A DIFERENTES TEMPERATURAS -----	48
3	PROPIEDADES DEL AIRE -----	53
4	NUMERO DE CUBIERTAS, APLICACIONES-----	95
5	PROPIEDADES DE DOS TIPOS DE VIDRIO -----	121
6	PROPIEDADES DEL SUNADEX, SOLATEX Y CLEARLITE-----	123
7	PROPIEDADES DE LOS PLASTICOS DUROS -----	124
8	PROPIEDADES DE PELICULAS O FILMES-----	126
9	PROPIEDADES DEL TEFLON -----	128
10	PROPIEDADES DE POLIESTER REFORZADOS-----	128
11	VALORES DE TRANSMISION SOLAR TOTAL OBTENIDA EN PANALES EXPERIMENTALES DE 1 A 3 CAPAS -----	137
12	POSICIONES IDEALES DE UN COLECTOR EN GUAYAQUIL -----	152
13	ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS-----	168
14	ESPACIAMIENTOS ENSAYADOS-----	178
15	RESULTADOS DE VARIACION DE ESPACIAMIENTOS -----	187
16	RESULTADOS DE VARIACION DE ESPACIAMIENTOS -----	196
17	RESULTADOS DE VARIACION DE MATERIALES -----	197
18	RESULTADOS PARA MEDICION DE LA EMISIVIDAD-----	221

## INTRODUCCION

El problema de la energía que está relacionado con el aumento de la población origina un desabastecimiento de las fuentes tradicionales de energía y da lugar a la exploración de fuentes no tradicionales como la eólica, la solar, biomasa, etc. Esto debe abarcar nuevas actitudes, economías y valores, que deben por sí implicar la mínima utilización de los recursos no renovables.

Hoy por hoy, la tarea de fomentar otras fuentes de energía para economizar el petróleo se hace importante. De todas las fuentes alternativas, no convencionales, la energía solar ha emergido como una de las más prometedoras. Su uso es justificable por ser natural y la más abundante.

Se espera un programa experimental más completo y una investigación del problema más a fondo que sirva para satisfacer las diferentes necesidades a nivel industrial y particular. El obstáculo para su empleo inmediato en la actualidad, es estrictamente económico.

Las consideraciones físicas están gobernadas por una serie de parámetros, los cuales pueden clasificarse en tres grupos, estos son:

- Parámetros del colector
- Parámetros de trabajo
- Parámetros meteorológicos

Le daremos atención a los parámetros del colector.

Existen varios sistemas por los cuales se puede calentar aire - utilizando energía solar, este aire transporta el calor a su lugar de uso ó almacenamiento, puede estar en contacto directo - con tubos, placas planas o corrugadas, aletas, serpentinadas, etc.

La optimización del funcionamiento del captador solar para el abastecimiento de aire caliente cuya aplicación es muy variada, nos representa beneficios. El aspecto más importante en una investigación sobre calentamiento solar, es la eficiencia térmica del colector.

Existen algunas diferencias en la manufactura de los materiales

usados en la construcción del colector, cada una afecta la eficacia del mismo, costo, durabilidad y peso. El colector es el principal componente de un sistema de calentamiento solar, su eficacia es una propiedad significativa del diseño y aplicación.

La energía disponible sobre el colector debe ser recolectada tan eficiente como económicamente sea posible. Al maximizar su funcionamiento, estamos a la vez elevando la producción del sistema. El factor de coeficiente de pérdidas  $U_f$  es útil, para predecir el rendimiento instantáneo del colector.

Con el fin de que el nivel de aplicación de los colectores solares sea mayor, es deseable analizar el valor de  $U_f$  para poder disminuir las pérdidas de energía que se producen a través de las cubiertas transparentes del colector.

Un control del coeficiente de pérdidas hacia arriba, puede producirse determinando la separación óptima de las diferentes cubiertas sobre la placa absorbadora del colector solar, también seleccionando el material adecuado a emplearse en las mismas. Teniendo en cuenta estos dos factores puede obtenerse un mayor rendimiento del captador solar.

## CAPITULO I

### 1. LA ENERGIA SOLAR

#### 1.1. GENERALIDADES

Por energía entendemos todo aquello capaz de producir trabajo, ésta se puede presentar en formas distintas.

Algunas son las clasificaciones que se le dan a la energía; así al considerar la fuente energética tenemos que pueden ser: nuclear, hidráulica, calórica, solar, geotérmica, etc.

En su forma básica útiles al hombre tenemos que son 6 a saber: química, calorífica, mecánica, radiante (solar), nuclear y eléctrica.

La energía solar es aquella que la tierra recibe del sol. Arquimides usó conscientemente por primera vez la energía solar, concentrando los rayos solares para quemar naves romanas enemigas, luego después con el tiempo muchos científicos e inves

tigadores han tenido que ver con el desarrollo de la energía solar.

El ambiente térmico externo de un lugar es el resultado de las influencias combinadas de la radiación solar y los efectos meteorológicos. Existen además otras influencias físicas secundarias, de menor importancia como lo son: las mareas, etc.

Entre los diferentes factores que afectan la disponibilidad de la energía solar tenemos:

- Localización geográfica
- Lugar de situación del colector
- Orientación del colector
- Hora del día
- Tiempo o estación del año
- Condiciones atmosféricas
- Diseño del colector.

La radiación solar es emitida desde el sol, cuya temperatura en la capa exterior se la ha calculado en  $10.000^{\circ}\text{F}$ . La capa del sol denominada fotosfera es de donde se emite la mayor

cantidad de radiación térmica.

Esta radiación se propaga por medio de ondas electromagnéticas de diferente longitud de onda. La fuente principal de energía radiante desde el sol, es debida a la fusión de núcleos de hidrógeno que producen la formación del helio en presencia del carbono y del nitrógeno, librando entonces aproximadamente unos 4 millones de toneladas por segundo de su masa.

Siendo uniforme la energía proveniente del sol, ésta puede ser calculada en la atmósfera exterior, a esta cantidad cuyo valor medio es de 429 BTU/hr - pie<sup>2</sup> se la ha llamado constante solar y su variación es de más o menos un 3,3 % durante el año terrestre.

El valor de la constante solar se ha obtenido a través de mediciones efectuadas por satélites. La radiación solar la componen ondas ultravioletas, visibles e infrarrojas.

La atmósfera terrestre actúa como una especie de barrera para con la radiación solar, dando lugar a que ésta llegue a la superficie terrestre en forma directa y difusa.

En el cálculo de la radiación directa se supone un problema -

geométrico en el que se consideran los ángulos solares. La difusa plantea un problema distinto ya que su distribución no suele ser uniforme.

Las ecuaciones de los ángulos solares, que determinan la posición del sol en un momento dado, útiles en el desarrollo de nuestro estudio, en su forma más sencilla, son:

$$H = 15 t \text{ (grados)} \quad (1)$$

$$D = 23,45 \text{ Sen } \left\{ \frac{360}{365} (N + 284) \right\} \text{ (Formula de Cooper)} \quad (2)$$

$$A = \text{Sen}^{-1} (\text{Cos } D \text{ Cos } H \text{ Cos } L + \text{Sen } L \text{ Sen } D) \quad (3)$$

$$B_{\text{opt}} = L - |D| \quad (4)$$

## 1.2. CAPTADORES DE LA ENERGIA

Ahora hablaremos de como captar la radiación solar que llega a la superficie terrestre.

Los diferentes sistemas de calentamiento solar pueden ser clasificados en activos y pasivos. La diferencia entre los dos radica en que el pasivo controla el clima de forma natural y se debe a los elementos de construcción y diseño del edificio o sistema. Mientras tanto los activos utilizan medios mecáni-

cos para coleccionar, almacenar y distribuir el calor solar al sistema.

Un calentamiento solar pasivo envuelve la coleccion, almacenaje y transferencia de calor a traves de una estructura, solo debido a la radiacion y conveccion natural.

Un sistema de calentamiento solar activo tipicamente esta con formado por seis componentes, estos son:

- El colector solar
- Medio de transferencia de calor
- Unidad de almacenamiento del calor
- Sistema de distribucion del calor
- Calentador auxiliar
- Reguladores de la coleccion, almacenaje y distribucion.

El colector solar es el componente del sistema que es expuesto a la radiacion solar, la capta y da comienzo al proceso de la energia en el sistema. Es disenado para interceptar toda la radiacion solar posible disponible y transformarla a una forma mas usable. Esta energia debe ser recolectada tan eficiente como economicamente sea posible.

En general, los captadores pueden ser clasificados en dos categorías: Los concentradores y los no concentradores. La diferencia básica de los dos tipos de captadores es de como ellos interactúan con la radiación. Los concentradores tienen forma - más o menos parabólica que les permite concentrar la energía; los no concentradores son generalmente planos. Los no concentradores son más simples, de menor costo y relativamente poseen una alta eficiencia de colección, no requieren de algún mecanismo seguidor del sol, como los concentradores, y su superficie es tan grande como el área total del colector que recibe los rayos del sol.

Los concentradores se basan en el principio óptico de hacer - incidir sobre un punto toda la energía incidente sobre ellos, la cual es aprovechada en ese punto. Solo la radiación directa puede ser concentrada, por lo tanto la intensidad de concentración dependerá de cuanta luz solar directa alcanza al captador. Algunas de las ventajas de los concentradores son:

- Las superficies reflectoras requieren menos material y son estructuralmente más simples que las de los no concentradores.
- En estos se puede obtener temperaturas mucho más altas.

- En climas fríos no es necesario anticongelantes.
- Para producir la misma energía de colección éstos emplean una menor área.

Entre estos dos grupos de los concentradores y los no concentradores tenemos los colectores fotovoltaicos, éstos convierten directamente la luz solar en electricidad. Debido a la acción del sol sobre una junta semiconductor, que produce un voltaje, son llamados también celdas solares. Estos pueden ser incorporados en estructuras de placas planas o usadas, como elementos de conversión en colectores concentradores, para simultáneamente producir energía térmica y eléctrica, que puede ser almacenada en tanques almacenadores de calor o baterías.

### 1.3. MEDICION (ENERGIA SOLAR)

El conocimiento de la cantidad de energía solar disponible, es útil para la evaluación de la energía incidente en el colector. Este valor lo podemos obtener ya sea por métodos teóricos o por su medición instrumental, siendo requerido para el diseño de los colectores solares. Lógico, es decir, que los valores más precisos de radiación solar serán los obtenidos con mediciones directas.

### 1.3.1. Cálculos Teóricos

Varios procedimientos han sido desarrollados por diferentes investigadores para el cálculo de la radiación incidente en un colector solar de placa plana. Gráficamente en la figura N° 1 vemos algunos valores de la radiación - que se considerarán en el estudio. Al respecto Leung<sup>(17)</sup> analizó los estudios realizados y resumió que:

Liu-Jordan desarrollaron un método para estimar el promedio mensual de radiación diaria en una superficie inclinada, Heywood (1966) y Duffie-Beckman (1974) desarrollaron una aproximación computando la insolación sobre superficies inclinadas, para obtener datos cada hora. Iqbal (1978) compara los dos métodos anteriores para computar la insolación sobre una superficie inclinada. Entonces Leung<sup>(17)</sup> (1980) también los compara y concluye que las discrepancias en los resultados provienen en algunas ocasiones principalmente a la asimetría de los datos de radiación para cada hora alrededor del tiempo solar en el mediodía.

Formulaciones y resultados de estos estudios se pueden encontrar ampliamente desarrollados en los libros de

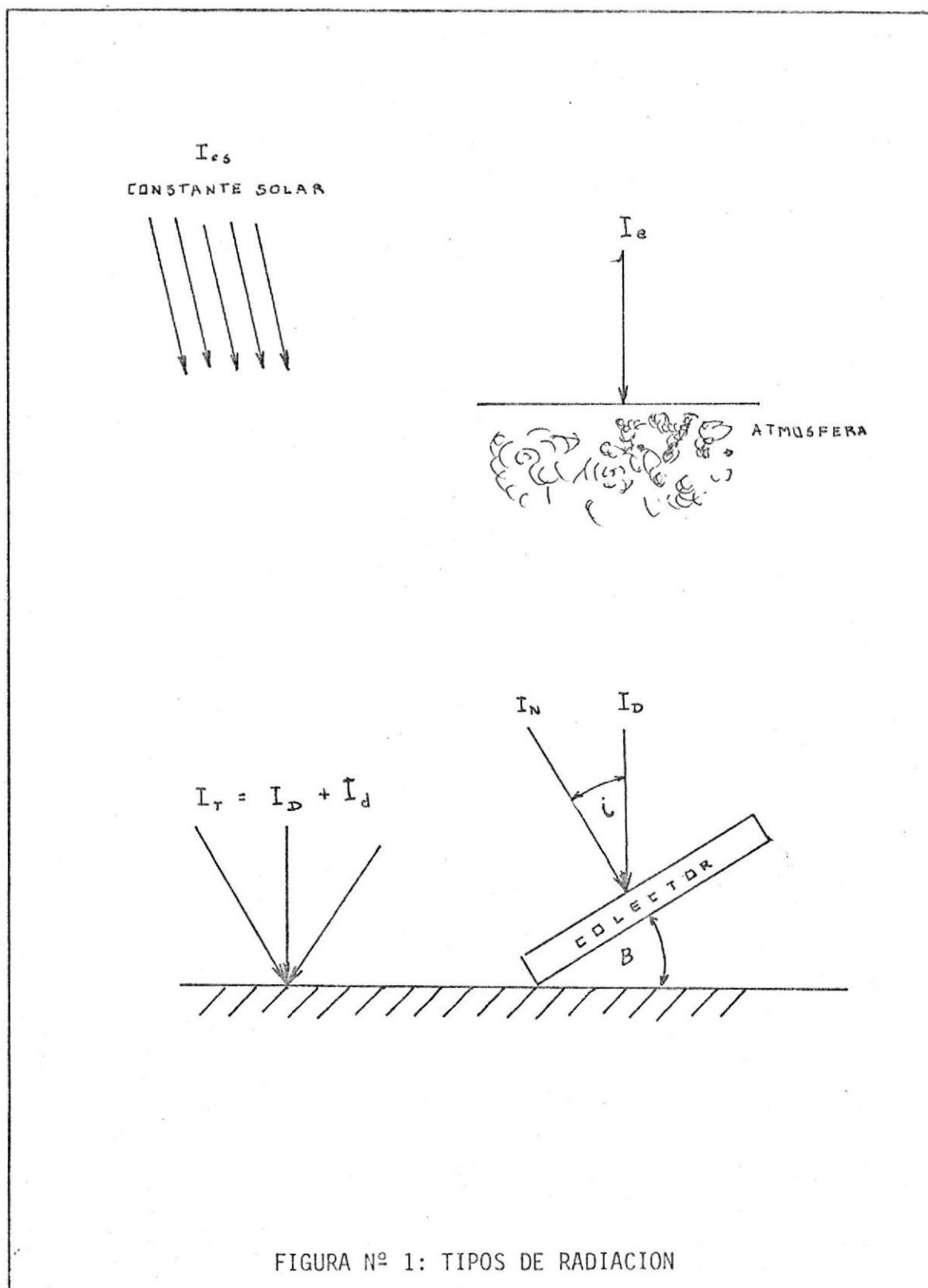


FIGURA N° 1: TIPOS DE RADIACION

Kreith,<sup>(14)</sup> Duffie,<sup>(7)</sup> Lunde<sup>(19)</sup>, Meinel<sup>(23)</sup> y Rapp<sup>(28)</sup>.

Estos relacionan la intensidad de radiación solar, la cual es medida por instrumentos, con la intensidad de radiación directa, la que se puede calcular teóricamente en función de la posición del colector, lugar donde está situado y día del año, para obtener una solución final de la intensidad de radiación difusa incidente en el colector.

### 1.3.2. Aparatos Medidores

A continuación realizaremos un estudio de los diferentes instrumentos que son empleados en la medición de la energía solar incidente.

Existen docenas de diferentes tipos de aparatos que son usados ya sea para medir la intensidad de radiación solar, o la energía solar integrada sobre un intervalo de tiempo dado. Muchos de estos dispositivos empleados en la práctica, se designan con los nombres de los personajes que los inventaron o perfeccionaron.

Los datos instrumentales necesarios para establecer un balance energético solar de un lugar determinado, son los siguientes:

- Duración de la insolación
- Medidas de la radiación total, directa o difusa, so  
bre una superficie horizontal.
- Radiación total sobre una superficie inclinada.

Estos datos obtenidos deben de incluir la siguiente información:

- Período de tiempo de la medición, ésta puede ser instantánea, diaria, mensual, etc.
- Especificación de la componente de la radiación to  
mada.
- Orientación de la superficie receptora.
- Si es un valor promedio, qué período de tiempo pro  
medio es.

La más común medición de la radiación solar es en ba  
se al flujo total de insolación sobre una superficie  
absorbedora horizontal, esta cantidad se la denomina  
insolación global, cuya unidad es el Langley.

$$1 \text{ Langley / hora} = 3,687 \text{ BTU/pie}^2 - \text{hr}$$

Otra medición de la intensidad solar es en base a la razón en la cual la energía es colectada por una su per ficie ne gra, normal a los rayos del sol; este va lor es llamado intensidad directa de incidencia so lar. Instrumentos que aplican este método tenemos los piroheliómetros. Los piroheliómetros tienen que estar dotados de un dispositivo seguidor del sol, pa ra poder realizar sus mediciones exactas.

Se adoptó la palabra piranómetro para designar un - instrumento que mide el calor radiante procedente - tanto del cielo difusamente, como del sol directamente, es decir, mide la radiación de onda corta que llega a la tierra en su forma total, por unidad de tiempo y de área sobre una superficie horizontal. A es tos instrumentos generalmente se asocia un registrado ro continuo, tienen el inconveniente de no ser se lect ivos en función de la longitud de onda a la que incide la radiación. Algunas de las condiciones pr im ord ia les que deben satisfacer los piranómetros pa ra un mejor funcionamiento son:

- Ser muy sensibles; las pequeñas energías que se

esperan medir, confieren a esta condición un carácter de imperativo.

- Intercambiar poco calor con el medio ambiente y absorber tan completamente como sea posible la radiación a medir, para que a una energía incidente dada corresponda el máximo aumento de temperatura.
- Poder calibrarse.

Los piranómetros pueden medir sólo la radiación difusa, si se les bloquea la radiación directa por medio de una banda o círculo.

Además de los medidores de la radiación, existen instrumentos altamente difundidos usados para registrar la duración de la brillantez del sol. A este tipo de aparatos, se les llama heliógrafos, los cuales miden la duración de la insolación, captan los períodos del día en que la intensidad de radiación directa ha estado presente. La suma de estos períodos representa la insolación diaria.

El intervalo de tiempo comprendido entre la salida del sol y la puesta, define la máxima insolación diaria po

sible en un lugar dado. La fracción de insolación es la relación entre la insolación diaria y la duración teórica máxima posible de insolación. Diversos tipos de heliógrafos suministran esta insolación diaria. Así tenemos unos que están formados - por un captador que concentra la radiación directa. Esta lente focalizadora es generalmente una esfera de vidrio macizo que permite seguir el movimiento aparente del sol durante el día.

Actualmente existen registradores electrónicos modernos con integradores que pueden dar claramente - la radiación total, muy desarrollados; pero así mismo, son de gran costo. Cuando se usa un registrador la radiación diaria u horaria puede obtenerse por planimetría de la gráfica resultante. Pero este - análisis lleva tiempo y la exactitud depende de la habilidad del operador.

Diferentes estaciones solares establecidas en diferentes partes de la tierra llevan records de estas - mediciones, las cuales son archivadas, tabuladas, graficadas y distribuídas para su conocimiento, como base para cálculos en futuros diseños.

#### 1.4. UTILIZACION DE LA ENERGIA

La energía solar se la viene aplicando desde tiempos muy remotos, trataremos de describir las diferentes formas de aprovechar la energía solar, de manera muy general.

El uso directo de la energía solar permite al hombre de hoy, proveerse de una fuente de energía inagotable, que no contamina el aire ambiental cuando se la emplea, siendo esto una gran ventaja porque el equilibrio térmico de la tierra no es alterado como ocurre con otras fuentes de energía. En si, el uso de la energía solar tiende hacia dos caminos:

- Unas aplicaciones típicas de altas temperaturas, entre las que tenemos:

Cocinas solares de alta temperatura

Hornos solares

Producción de vapor en el proceso

Producción de gas a alta temperatura

En gran escala la conversión termodinámica del calor radiante a energía mecánica o eléctrica.

- Las otras, aplicaciones de baja temperatura, entre las que tenemos:

Calentamiento de agua para uso doméstico

Calentamiento de piscinas

Secado

Cocinas solares de baja temperatura

Calentamiento de espacios

Destilación del agua

Refrigeración y aire acondicionado

En pequeña escala la conversión termodinámica del calor radiante en energía mecánica o eléctrica.

En el presente las aplicaciones más económicas y eficientes de la energía solar son el calentamiento de piscinas y agua para consumo doméstico.

El empleo de esta energía para la destilación solar es de tecnología sencilla, en el que la instalación capta la energía solar y la utiliza para evaporar el agua. Con esta des

tilación del agua, se consigue agua potable, que cuando se la obtiene a partir de agua salobre o del mar se la denomina desalinadores y cuando se obtiene agua pura a partir de agua sucia, con arena o partículas extrañas, se los llama alambiques solares.

Otra aplicación de la energía solar es el secado de alimentos y materiales diversos. Este secado puede ser a nivel agrícola o industrial. Las dos fases principales del proceso empleado en los secadores agrícolas solares son: el calentamiento solar del fluido utilizado para el secado, que generalmente es aire, y el secado mismo, en el que el fluido ya calentado extrae la humedad del material que se ha de secar. Ejemplo, de éstos tenemos la estufa solar, así llamada que es empleada para secar la madera.

Las cocinas solares, en su mayoría utilizan el principio de concentración de los rayos solares. Existen también las cocinas solares de vapor, en las que la unidad de colección solar está separada de la cámara de cocción.

Los motores solares; éstos transforman la energía radiante solar en mecánica, para que su utilización sea realmente -

efectiva se los instala en zonas con insolaciones máximas y regular durante todo el año.

En el acondicionamiento de viviendas se aplican los dos sistemas, el activo y el pasivo, ya sea para calentamiento o enfriamiento de la vivienda. Esta aplicación está relacionada con la arquitectura y construcción del edificio. Algo similar ocurre con la climatización de espacios diversos. Los invernaderos son aplicaciones en climas fríos, en la actualidad han sido muy estudiados y desarrollados, se los encuentra desde los más sencillos - en el cultivo de pequeños huertos a los verdaderamente complicados usados en grandes plantaciones agrícolas.

La refrigeración solar es otra importante aplicación solar, en ésta, la mezcla de amoníaco y aire se calienta directamente o indirectamente por el sol, dando inicio al ciclo.

Las celdas solares dieron un giro completo a la utilización de la energía solar, por medio de éstas, la luz solar se la convierte en energía eléctrica. En la actualidad, el empleo de las fotoceldas, se encuentra muy extendi-

do, así por ejemplo existen radios, ventiladores, teléfonos, automóviles, pequeños aviones, etc., que son accionados por motores solares, en los que su tamaño va relacionado con su capacidad.

#### 1.5. EL COLECTOR SOLAR PLANO

Este tipo de colector es ubicado como una clase especial - de intercambiador de calor, su estructura difiere a la del más convencional de los intercambiadores. En este, se da lugar la conversión directa térmica, acumulando la energía radiante sin concentración óptica, tiene un área de transferencia semejante al área total del colector, aprovecha - tanto la radiación directa como la difusa, siendo ésta su principal ventaja. No precisan de complejos mecanismos para su funcionamiento, es la más económica y práctica de todas las aplicaciones de la energía solar.

Un colector solar de placa plana es colocado generalmente en una posición fija, captará la máxima cantidad de radiación cuando esté situado perpendicularmente a los rayos solares; así mismo, cuando esté más oblicuo a éstos, las pérdidas serán mayores ya que la radiación recibida será reflejada en una mayor proporción.

Al colector solar plano puede considerársele como un sistema en el que se diferencian tres niveles que son: el de captación, circulación y almacenamiento, puede diferenciarse según:

- El tipo de fluido de trabajo que emplean
- La composición y materiales de que están hechos
- La temperatura de trabajo; y,
- El número de cubiertas.

A fin de beneficiarse y provocar el fenómeno térmico en el mismo; el colector de placa plana está compuesto por los siguientes elementos:

- a. Un absorbente: que es el elemento que tiene una gran conductividad térmica y una buena relación absorción/emisión, respecto a la radiación solar y térmica, respectivamente.

La función de la placa absorbente es captar la mayor cantidad posible de radiación solar que incide sobre ella, convirtiéndola en calor, que por conducción la transfiere al fluido de trabajo, que se encuentra en contacto di

recto con la placa. A mayor capacidad de absorción o absorptividad, la transformación será más efectiva; de este modo, la superficie aumentará su temperatura en función de la cantidad de calor atrapado. Algunos de los factores de los que depende la selección del material de la placa son:

- Conductividad térmica del material
- Durabilidad
- Facilidad de manipulación
- Costo
- Disponibilidad en el mercado
- Energía requerida para producir este.

Es posible emplear placas no metálicas, pero éstos, implicarían un contacto más directo o estrecho entre la placa absorbidora y el fluido, áreas mayores e infimos espesores de estas placas. Como la placa tiende a perder calor, los demás componentes del colector son diseñados para reducir estas pérdidas, tanto como sea posible. A fin de conseguir mejores resultados en el

absorbedor, es recubierto de una pintura oscura negra, la cual acentuará la absorción.

- b. Por abajo, por arriba o por ambos lados en contacto - con el absorbedor circulará el fluído destinado a tomar el calor para transferirlo al almacenamiento. La naturaleza de este fluído influye mucho en la concepción y complejidad del colector. Como fluídos se utilizan; el agua, aire, fluídos térmicos en fase gaseosa o líquida, aceites, etc. La manipulación del aire es más simple que la del agua o cualquier otro fluído, y produce menos molestias.
  
- c. A fin de optimizar el fenómeno térmico y de garantizar un buen rendimiento del colector, éste se encuentra provisto de una o varias láminas traslúcidas, situadas a cierta distancia sobre el absorbedor. La luz solar de onda corta fácilmente atravieza las cubiertas transparentes; luego el absorbente capta esta luz y la convierte en calor, ocurriendo el cambio de energía de onda - corta a onda larga (calor), la cual no puede fácilmente atravezar la cubierta quedando atrapada.
  
- d. Otro elemento, el cual encierra los demás componentes es,

la carcaza o caja, la cual tiene la forma de un cajón poco profundo, abierto por arriba y aislado por los costados y en el fondo, dentro de ella se encuentran las cubiertas y placa absorbente. Sirve de protección contra el clima y temporal, debe permitir la expansión y contracción de las cubiertas con el aumento y caída de la temperatura de las mismas, puede estar sostenida por una base o por parte integral de otro elemento por así decir, de un techo, pared, etc.

- e. El aislamiento sirve para evitar pérdidas por convección y conducción principalmente. Los materiales aislantes son dimensionales y químicamente estables en altas temperaturas, resistentes a la intemperie y humedad; sería mejor si el aislante contribuyere con la rigidez de la estructura del colector, pero los más rígidos aislantes a menudo son los menos estables.

Los desarrollos de los colectores de placa plana se producen en dos direcciones:

1. Producir colectores baratos que trabajen a tempera

turas relativamente bajas (122 a 140°F).

2. Colectores de gran rendimiento para lograr eficiencias aceptables a temperaturas de más o menos 212°F, aproximadamente.

Los colectores baratos se los consigue usando materiales que no sean de propiedades superiores, por ejemplo el cobre con respecto al acero y el aluminio posee mejores - cualidades para realizar mejor la función para lo cual - se lo emplea. También empleando materiales en cuya técnica de fabricación impliquen menos mano de obra. Los de gran rendimiento se obtienen:

- a. Maximizando la transmisión de las coberturas, mediante el uso de antireflectantes y utilizando materiales de superior calidad.
- b. Minimizando en todo aspecto las pérdidas de calor en el colector.

En regiones donde hay menos horas-luz y en las que ésta - no es tan intensa el uso de más de una cubierta es conveniente. Si comparamos los colectores que calientan aire

con los que calientan agua, que son ambos los de mayor importancia y aplicación en la práctica, los de aire tienen las siguientes ventajas:

- Más simples
- Menos costosos
- Fáciles de construir
- Casi no necesitan mantenimiento
- No presentan problemas de corrosión, congelamiento.
- Cualquier fuga o escape no implica mucho riesgo o daño.

Entre las desventajas tenemos:

- Área de Captación mayor
- Conductos más voluminosos
- Menor precisión en los controles
- Menos flexibilidad en el diseño
- El aire posee una menor capacidad calorífica
- Posible acumulación de polvo y humedad en el interior del colector.

Es posible, interconectar varios colectores para conseguir así una mayor cantidad de fluido calentado diariamente.

## CAPITULO II

### 2. SINTESIS DEL PROYECTO

#### 2.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El presente trabajo tiene como objetivo principal el estudio teórico y práctico de los materiales y disposiciones óptimas de las coberturas en un colector solar placa plana. Se determinará un rango de espaciamiento, en el cual el rendimiento del colector es mayor y por consecuencia las pérdidas hacia arriba serán menores, este rango es la distancia óptima. Se analizan también los requerimientos de los materiales para cubiertas de un colector solar, en lo que respecta a la selección de los materiales.

En un bien diseñado colector, las pérdidas de energía que se producen en el sistema debidas a la diferencia de temperatura existente entre la placa absorbadora y el medio exterior - que lo rodea, deben ser mínimas. Es importante evitar que la transmisión de la energía a través de las cubiertas se atenúe, sin que esto demande un costo demasiado elevado.

Experimentalmente se determinan los coeficientes de transferencia de calor, así como también las pérdidas totales producidas, ganancias de calor y eficiencia del sistema.

Siendo éste un sistema de calentamiento de aire que no emplea alguna forma de energía tradicional y cuyas aplicaciones son muy variadas, el presente estudio muestra las características de lo que sería una instalación optimizada como ésta, dando a conocer la técnica empleada para provecho de posibles futuras instalaciones similares.

Se realiza un estudio del dimensionamiento y selección de los materiales a emplearse en los demás componentes que forman parte del conjunto colector, se eligen las constantes que van a ser aplicadas en la resolución del problema para luego, analizar los datos resultantes de las pruebas a realizarse,

## 2.2. DESCRIPCION DEL COLECTOR A ENSAYAR

En el presente tópico definiremos el colector en el cual realizaremos las diferentes experiencias prácticas.

### 2.2.1. Características principales

El colector solar es del tipo placa plana, cuyo fluido de trabajo es el aire tomado del ambiente, éste circulará bajo la placa absorbadora plana en un conducto formado por el aislamiento inferior y la placa absorbadora.

Siendo los materiales a emplearse en el colector escasos en el mercado, y debiendo usarse el diseño del colector, aquellos que permitan operar satisfactoriamente, bajo las más duras condiciones que podrían esperarse en la instalación particular para el lugar, se utilizarán materiales cuyo costo justifique su rendimiento y sean capaces de resistir altas temperaturas.

Se seleccionó el aluminio como material de la placa absorbadora, ya que, el costo del cobre en el mercado nacional de 150 sucres la libra, no se justificaba, el aluminio es mucho más barato y se lo encuentra con más facilidad (comparativamente vale menos de la mitad). Algunas de las características que presenta el aluminio y que origina su selección son:

- No hay peligro de daño, a altas temperaturas y en presencia de la radiación ultravioleta.
- Buena conductividad (cuarto en la escala de conductividad térmica) (Ver Tabla # 1).
- Excelente transmisor del calor si su espesor es mínimo.
- Durable.

Sobre la placa absorbente se depositará una pintura negra selectiva de la radiación solar, cuya emisividad - encontrada experimentalmente tiene un valor de 0,925 - (referencias en el apéndice N° 1).

Se emplearán tres cubiertas de diferentes materiales, los cuales se variarán para hallar el arreglo más adecuado, con el fin de desarrollar un análisis completo de la situación, esto es en el estudio de las pérdidas hacia arriba. No se usarán sustancias antirreflectantes en las cubiertas ya que análisis de información - de pruebas realizadas en el extranjero, demuestran que su empleo no se justifica con el costo que supone el

TABLA N° 1(\*)

## PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

MATERIAL	k (BTU/hr-pie-°F )			C <sub>p</sub> (BTU/Lbm- °F) 32°F	p (Lbm/pie <sup>3</sup> ) 32°F	a (pie <sup>2</sup> /hr ) 32°F
	32°F	212°F	572°F			
PLATA	242	238	----	0,056	655	0,60
COBRE PURO	224	218	212	0,091	558	4,42
ORO	169	170	----	0,030	1.208	4.68
ALUMINIO	117	119	133	0,208	169	3,33
MERCURIO	91	92	----	0,232	109	3,60
ZINC	65	64	59	0,091	446	1,60
ESTAÑO	36	34	----	0,054	456	1,46
HIERRO PURO	35,8	36,6	----	0,104	491	0,70
NIQUEL	34,5	34	32	0,103	555	0,60
PLOMO	20,1	19	18	0,030	705	0,95

(\*)Obtenida de referencia N° 16.-

TABLA N° 2 (\*)

PROPIEDADES RADIOACTIVAS DEL TEFLON (0,001" ESPESOR) RECEPTANDO RADIACION TERMICA DESDE UNA SUPERFICIE GRIS O NEGRA A DIFERENTES TEMPERATURAS.

TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE RADIANTE (°R)	EMITANCIA ( $\epsilon$ )	TRANSMITANCIA ( $\tau$ )	REFLECTANCIA ( $\rho$ )
550	.358	.515	.127
555	.357	.516	.127
560	.356	.517	.127
565	.355	.518	.127
570	.354	.519	.127
575	.353	.520	.127
580	.352	.521	.127
585	.351	.522	.127
590	.350	.523	.127
595	.349	.524	.127
600	.348	.525	.127
605	.347	.526	.127
610	.346	.527	.127
615	.345	.528	.127
620	.344	.529	.127
625	.343	.530	.127
630	.342	.531	.127
635	.341	.532	.127
640	.340	.534	.126
645	.339	.535	.126
650	.338	.536	.126
655	.337	.537	.126
660	.336	.538	.126

sigue

665	.335	.539	.126
670	.334	.540	.126
675	.333	.542	.125
680	.332	.543	.125
685	.331	.544	.125

---

(\*) Obtenida de referencia N° 29.-

proceso de elaboración de las mismas. Se utilizará como aislante planchas de styrofoam, de dos pulgadas de espesor. Algunas propiedades de este material son<sup>(11)</sup>:

$$\rho = 2,1 \text{ Lb/pie}^3; k = 0,032 \frac{\text{BTU}}{\text{hr -pie -}^\circ\text{F}}$$

La unidad colectora estará soportada por una base de madera dura, la caja que forma el colector y tiras que determinan el espaciamiento de las cubiertas son de - un tipo de madera más blanda, cuyas propiedades son<sup>(11)</sup>:

$$\rho \approx 34 \text{ Lb/pie}^3; k \approx 0,034 \frac{\text{BTU}}{\text{hr -pie -}^\circ\text{F}}$$

La geometría única considerada del conducto o pasaje por el cual circula el aire, es rectangular, de ancho  $w$ , longitud  $L$  y espesor  $b$ . Con el fin de optimizar la transferencia de calor desde la placa absorbedora al fluído de trabajo, el aire, se trabajará con un régimen de flujo turbulento. En sí el colector será diseñado para tratar en parte de cumplir con las características ideales de un calentador solar de aire, las cuales son: una alta eficiencia térmica y una buena transmisión de la luz solar a través de las coberturas.

### 2.2:2. Dimensionamiento

Al comenzar a diseñar la placa absorbadora, esto es el área efectiva de transferencia de calor del colector, nos encontramos que estamos limitados por el ancho de la placa, ya que en el mercado encontramos una plancha de aluminio cuyo ancho efectivo útil es:

$$w = 26,375 \text{ pulg.} = 2,1979 \text{ pies}$$

Para que la transferencia de calor en el colector sea lo más efectiva posible, en un ducto asimétricamente calentado de forma rectangular, el aire debe circular de manera turbulenta.

Determinándonos los valores para la velocidad del aire en el ducto igual a (ver apéndice N° 2):

$$v = 10 \text{ pies/seg.}$$

y una temperatura media del aire en el ducto de:  $T_m = 100^\circ\text{F.}$

Las propiedades del aire a esta temperatura son (ver ta  
bla N° 3):

$$\rho = 0,071 \text{ lb/pie}^3$$

$$\mu = 1,285 \times 10^{-5} \text{ lb/pie} \cdot \text{seg}$$

$$C_p = 0,24 \text{ BTU/lb} \cdot \text{°F}$$

Para el caso de flujo turbulento se cumple que

$$R_e = \frac{V D_H \rho}{\mu} \geq 10.000 \quad (5)$$

Reemplazando los valores en la ecuación anterior obtenemos que:

$$D_H \geq 0,181 \text{ pies}$$

En ductos rectangulares se aplican los mismos conceptos que en ductos circulares, empleando en ellos el valor - del diámetro hidráulico ( $D_H$ ).

Nuestro caso está presentado en la figura N° 2, para és  
te se cumple que:

TABLA N°3  
PROPIEDADES DEL AIRE

T (°F)	$\rho$ (Lbm/pie <sup>3</sup> )	$C_p$ (BTU/lbm-°F)	$\mu \times 10^{-5}$ (Lbm/pie-seg)	$\nu \times 10^{-5}$ (pie <sup>2</sup> /seg)	k (BTU/hr- pie °F)	$p_r$	$\frac{g\beta\rho^2}{2\mu}$ (1/°F - pie <sup>3</sup> )
0	0,086	0,239	1,110	0,130	0,0133	0,73	$4,2 \times 10^6$
32	0,081	0,240	1,165	0,145	0,0140	0,72	3,16
100	0,071	0,240	1,285	0,180	0,0154	0,72	1,76
200	0,060	0,241	1,440	0,239	0,0174	0,72	0,85
300	0,052	0,243	1,610	0,306	0,0193	0,71	0,44
400	0,046	0,245	1,750	0,378	0,0212	0,69	0,26
500	0,041	0,247	1,890	0,455	0,0231	0,68	0,16

(\*) Obtenida de referencia N° 16

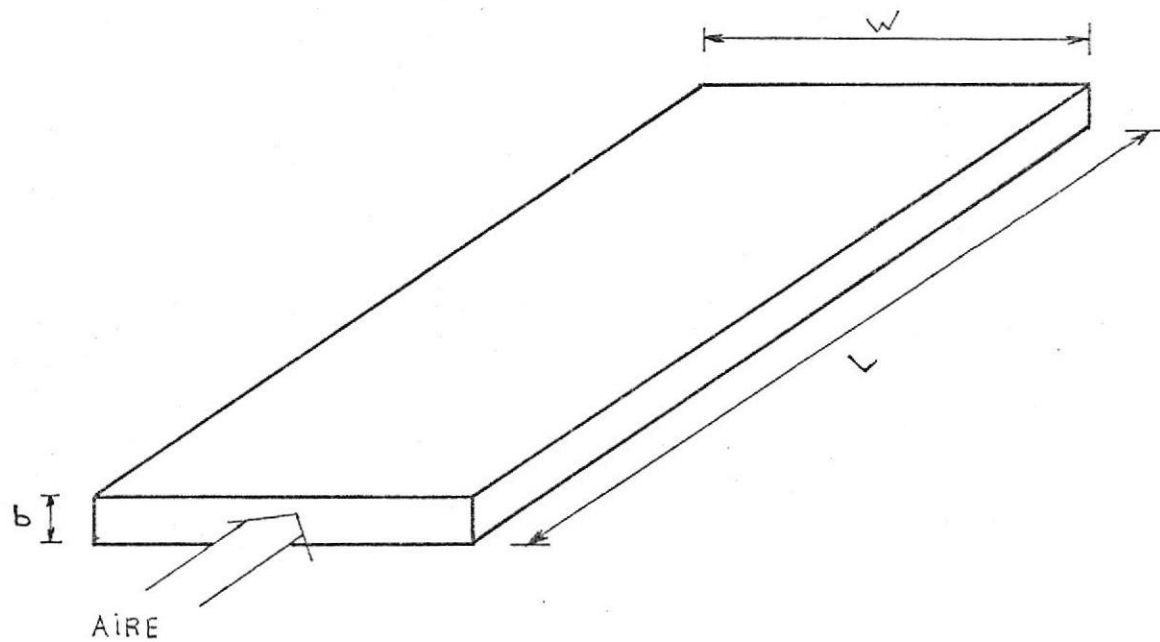


FIGURA N° 2: DIMENSIONES DEL DUCTO

$$D_H = \frac{2 w b}{w + b} \quad (6)$$

Lo que nos da:

$$b = 1,132 \text{ pulg} = 0,0094 \text{ pies}$$

Para facilitar la realización de los diferentes cálculos en el ducto, es importante que los perfiles de velocidad y temperatura en régimen turbulento del flujo de aire es tén completamente desarrollados. Para el caso del aire el perfil de temperatura se desarrolla primero que el de ve locidad, luego es necesario saber sólo, a que distancia crítica está desarrollado el perfil de velocidad.

Según Kays<sup>(13)</sup>, el perfil de velocidad final para flujo tur bulento, está completamente establecido para el caso del aire, en una distancia mayor o a partir de los 10 diámetros del ducto, esto considerando un calentamiento uniforme de toda la longitud del ducto. Lo que nos indica - que para obtener flujo turbulento completamente desarrollado la longitud de nuestro ducto tiene que ser superior a:

$$X \geq 1,81 \text{ pies}$$

Ahora procederemos a calcular el valor de la caída de presión que se produce en el colector.

Para el caso de flujo turbulento recomiendan usar las siguientes expresiones:

$$f = \frac{0,184}{(R_e)^{0,2}} \quad (\text{coeficiente de arrastre por rozamiento}) \quad (7)$$

Para el caso de:

$$10.000 \leq R_e \leq 50.000$$

$$\Delta P = \frac{f L v^2}{2 g U_H} \quad (8)$$

Si reemplazamos los valores en las ecuaciones anteriores, los resultados aproximados serán:

$$f \leq 0,03$$

$$\Delta P \leq 0,103 \frac{\text{Lb}}{\text{pie}^2} = 0,02 \text{ pulgs . de H}_2\text{O}$$

En las figuras que vienen a continuación está bosquejado el colector a ensayar (N<sup>os</sup>. 3, 4, 5, 6, y 7).

### 2.3. REGULACIONES EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO

Algunas son las condiciones que deben tomarse en cuenta para que el desarrollo del presente trabajo sea realizado con efectividad. El sistema del captador solar, debe cumplir con las siguientes funciones:

- a. Poder captar calor para su distribución posterior en alguna aplicación práctica.
- b. Poder regular la cantidad de calor extraído, ya que, las necesidades no siempre coinciden con las aportaciones solares.
- c. Estar instalado en condiciones óptimas de funcionamiento, permitiendo una buena circulación del fluido portador del calor.

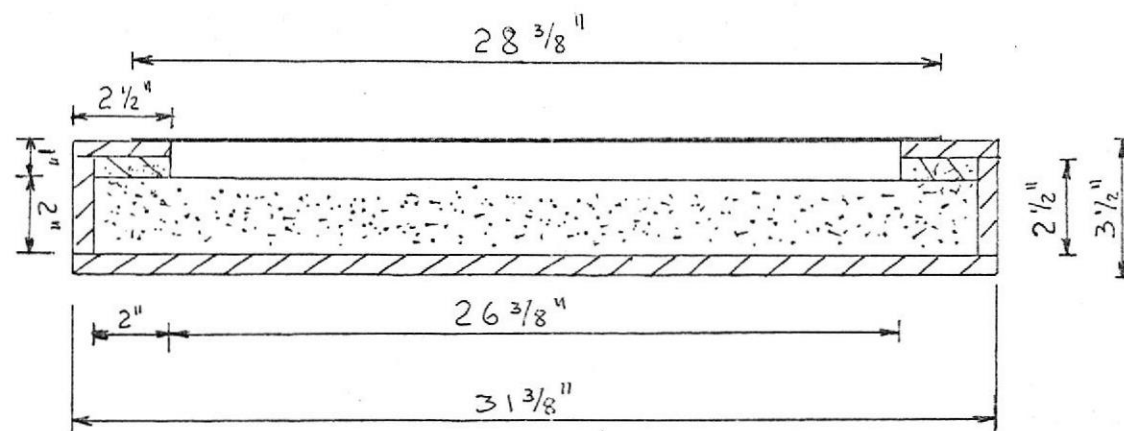


FIGURA N°3: DIMENSIONES CORTE TRANSVERSAL

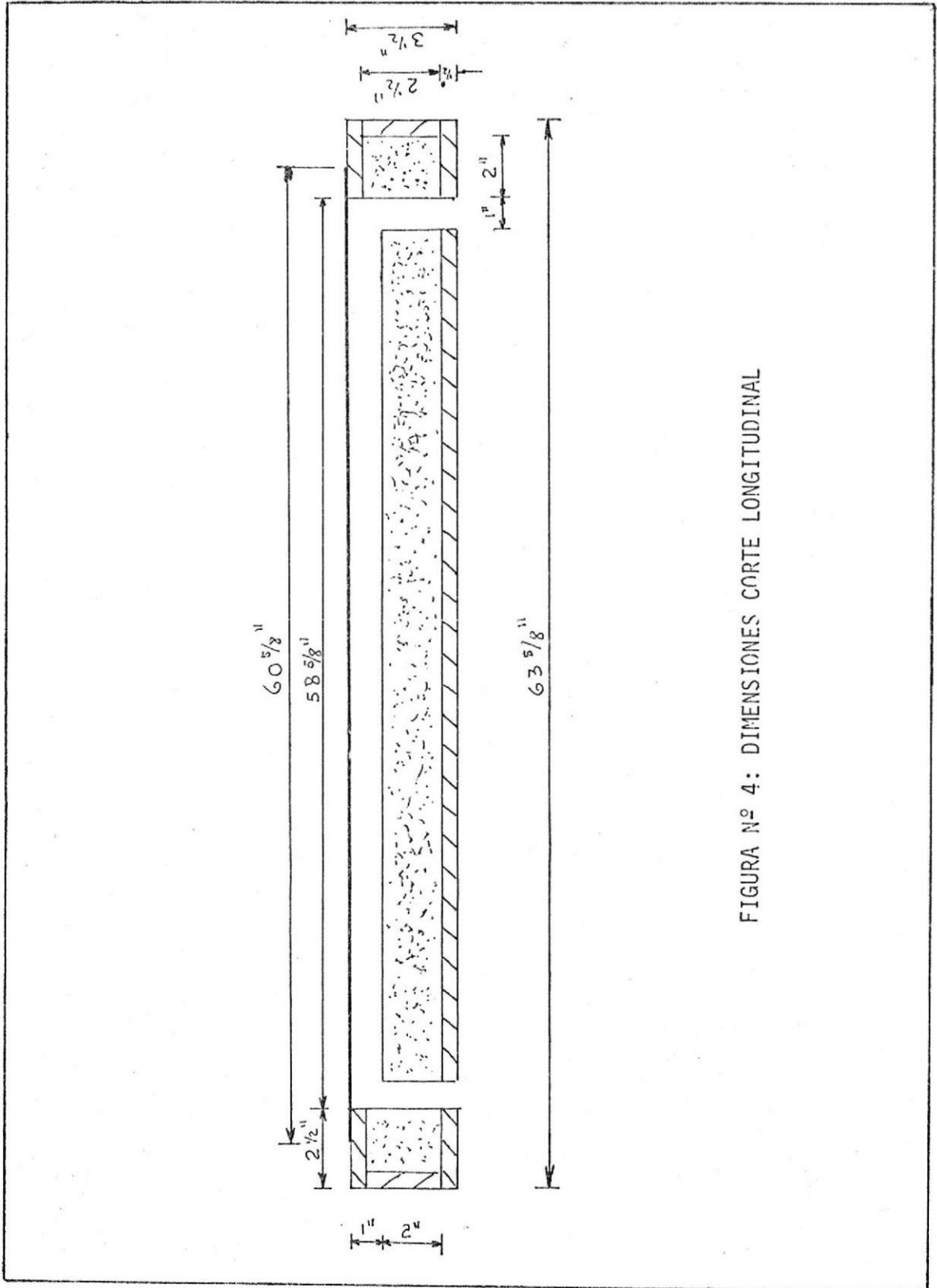


FIGURA N° 4: DIMENSIONES CORTE LONGITUDINAL

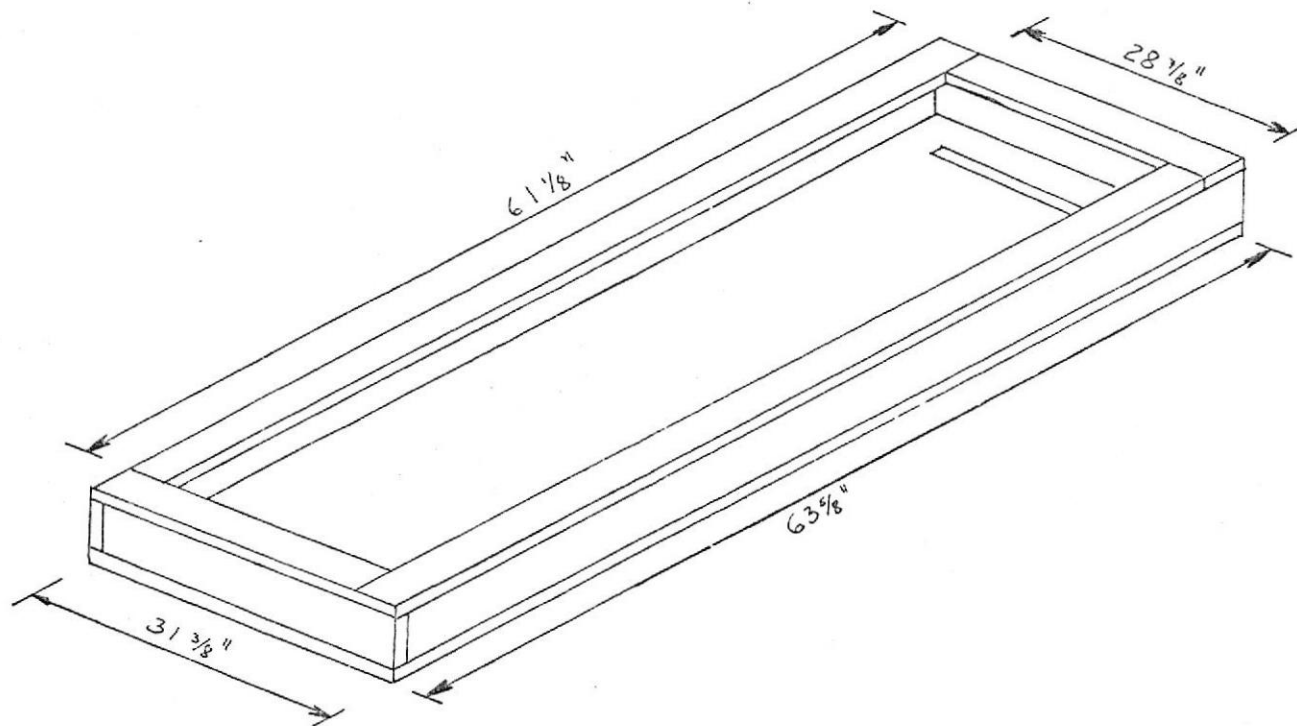


FIGURA N° 5: DIMENSIONES DE LA CAJA DE MADERA

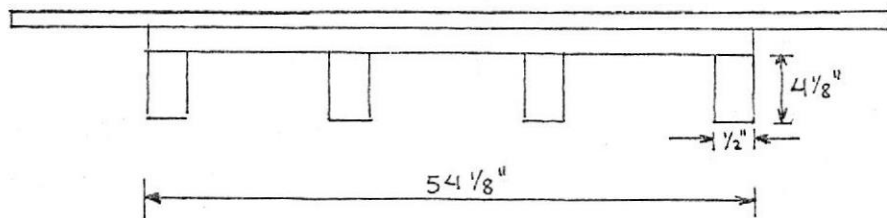
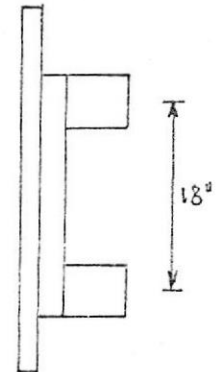
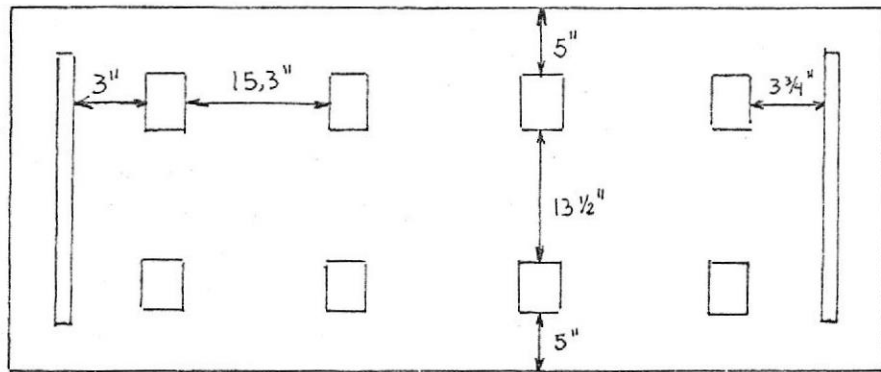


FIGURA N° 6: BASE DEL COLECTOR

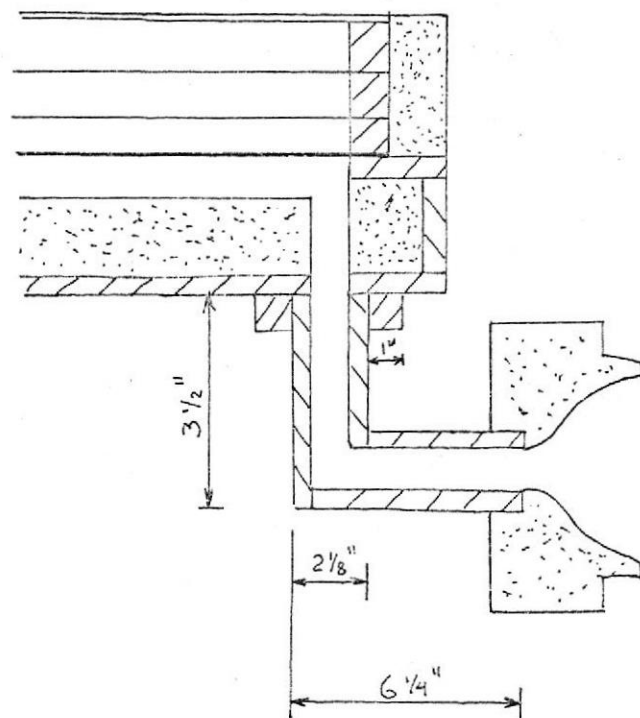


FIGURA N° 7 : SALIDA DEL DUCTO

En el colector se considerarán dos circuitos: el primario, el cual consiste en la forma de atrapar el calor y transmitirlo al fluido que circula dentro del colector, y el secundario que son los ductos de circulación del fluido ya calentado que sale del colector (ver figuras N° 8 y 9).

En la simplificación del problema algunas asunciones pueden ser tomadas en cuenta, estas son:

- el flujo de calor es unidimensional a través de todas las cubiertas.
- La caída de temperatura a través de las cubiertas interiores son despreciables.
- Flujo de calor en una sola dirección a través de los aislamientos laterales y por el fondo.
- Los efectos de las esquinas no son tomados en cuenta
- El cielo puede ser considerado como un cuerpo negro el cual se encuentra a una temperatura determinada, que estará relacionada con la del ambiente.
- Las propiedades de los materiales a emplearse son independientes de la temperatura.

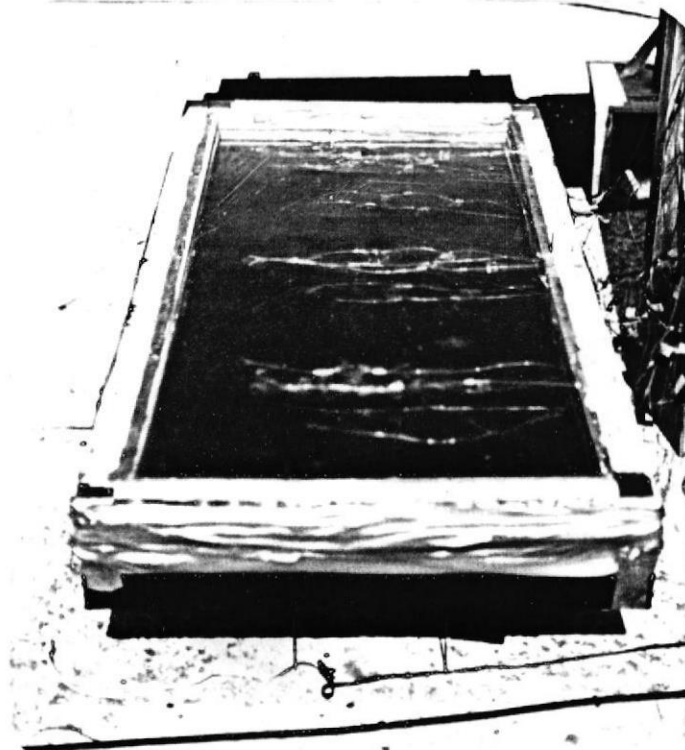
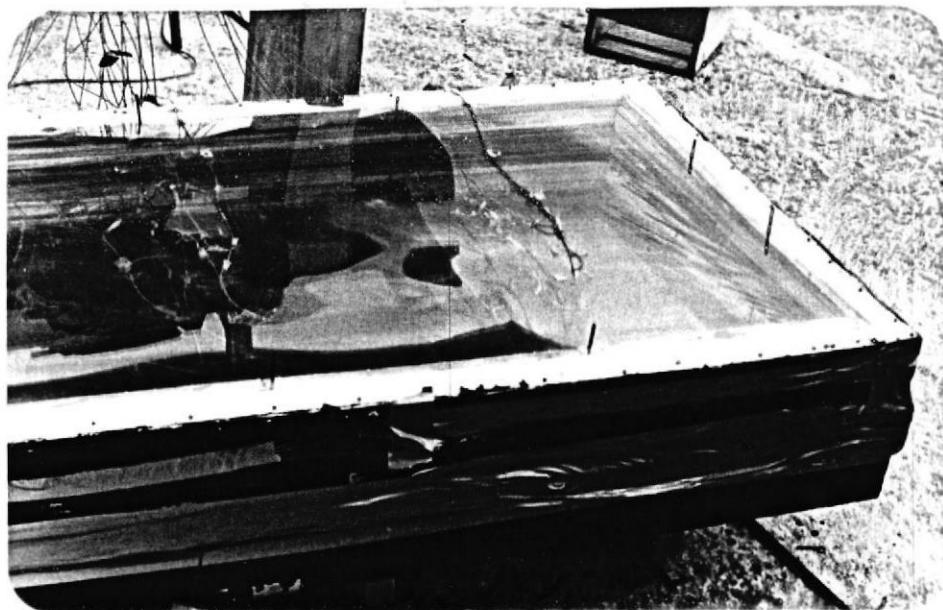


FIGURA Nº 3: CIRCUITO PRIMARIO

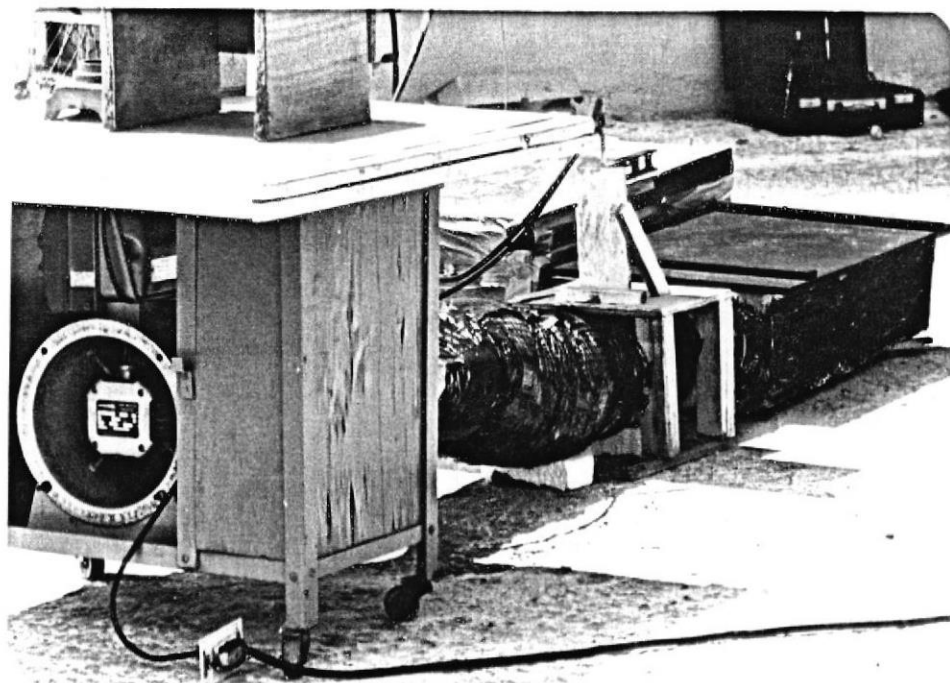


FIGURA N° 9: CIRCUITO SECUNDARIO

- Pérdidas hacia los lados, por el fondo y por arriba, son las únicas a considerarse.
- Flujo uniforme dentro del ducto
- Polvo y suciedad en el colector son factores mínimos o despreciables.

La revisión de datos de constructores de colectores solares con flujo de aire, resultados y conclusiones de los mismos, son tomados a consideración para obtener la mejor performance posible en esta investigación.

En el desarrollo de los diferentes ensayos, serán controladas - las temperaturas siguientes: la de la placa absorbadora, de las cubiertas, aislamientos, la de la entrada y salida del fluido y la del ambiente (ver figura N° 10 y 11). Para un análisis posterior, se variará la distancia entre coberturas y se estudiarán diferentes arreglos de los materiales de las cubiertas transparentes (ver figura N° 12).

Con el fin de facilitar la colocación de las cubiertas en el colector, se adaptaron 10 varillas metálicas que actuaban como guías y permitían una mayor rigidez de las cubiertas. (ver figura N° 12).

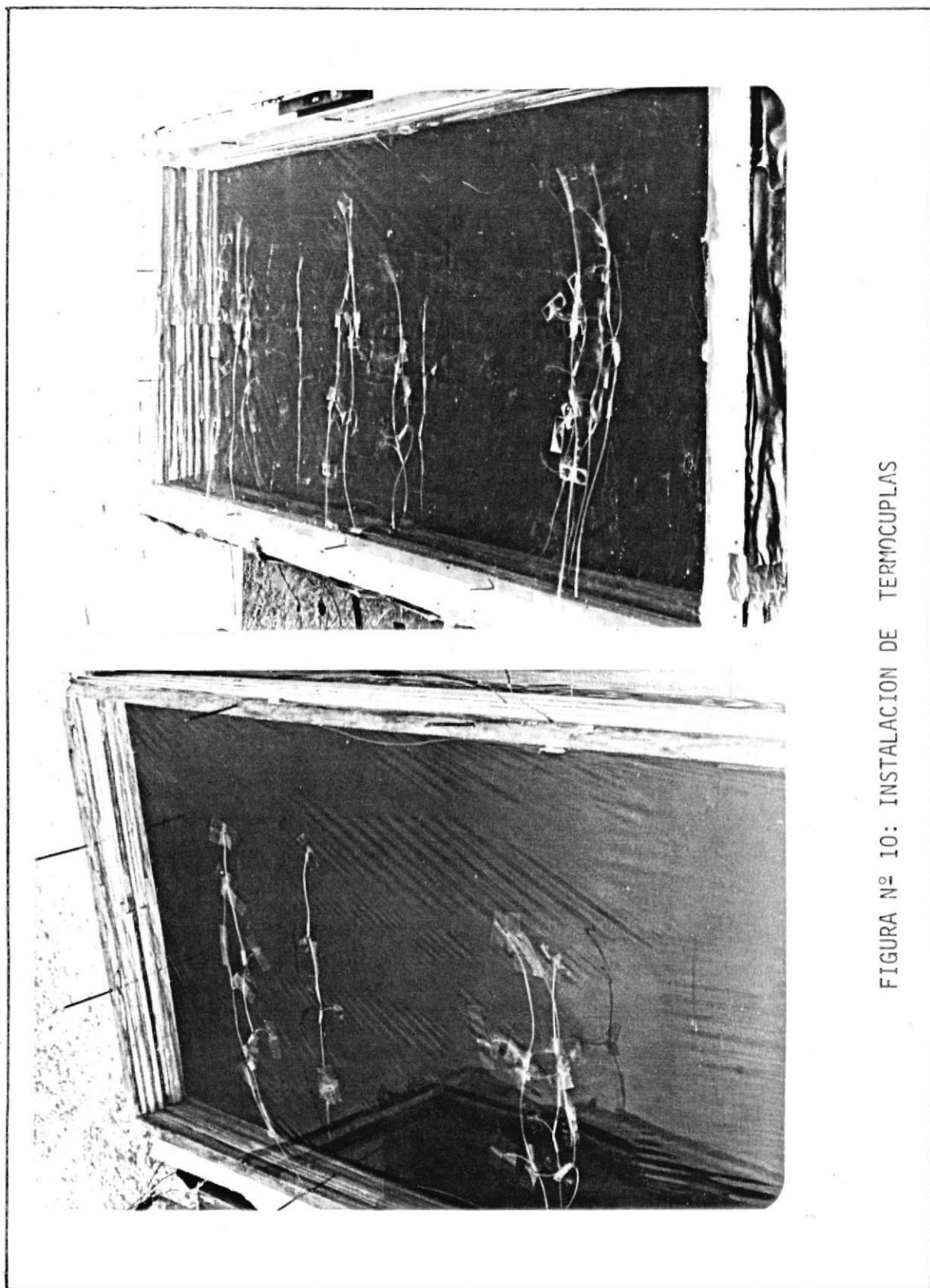


FIGURA Nº 10: INSTALACION DE TERMOCUPLAS

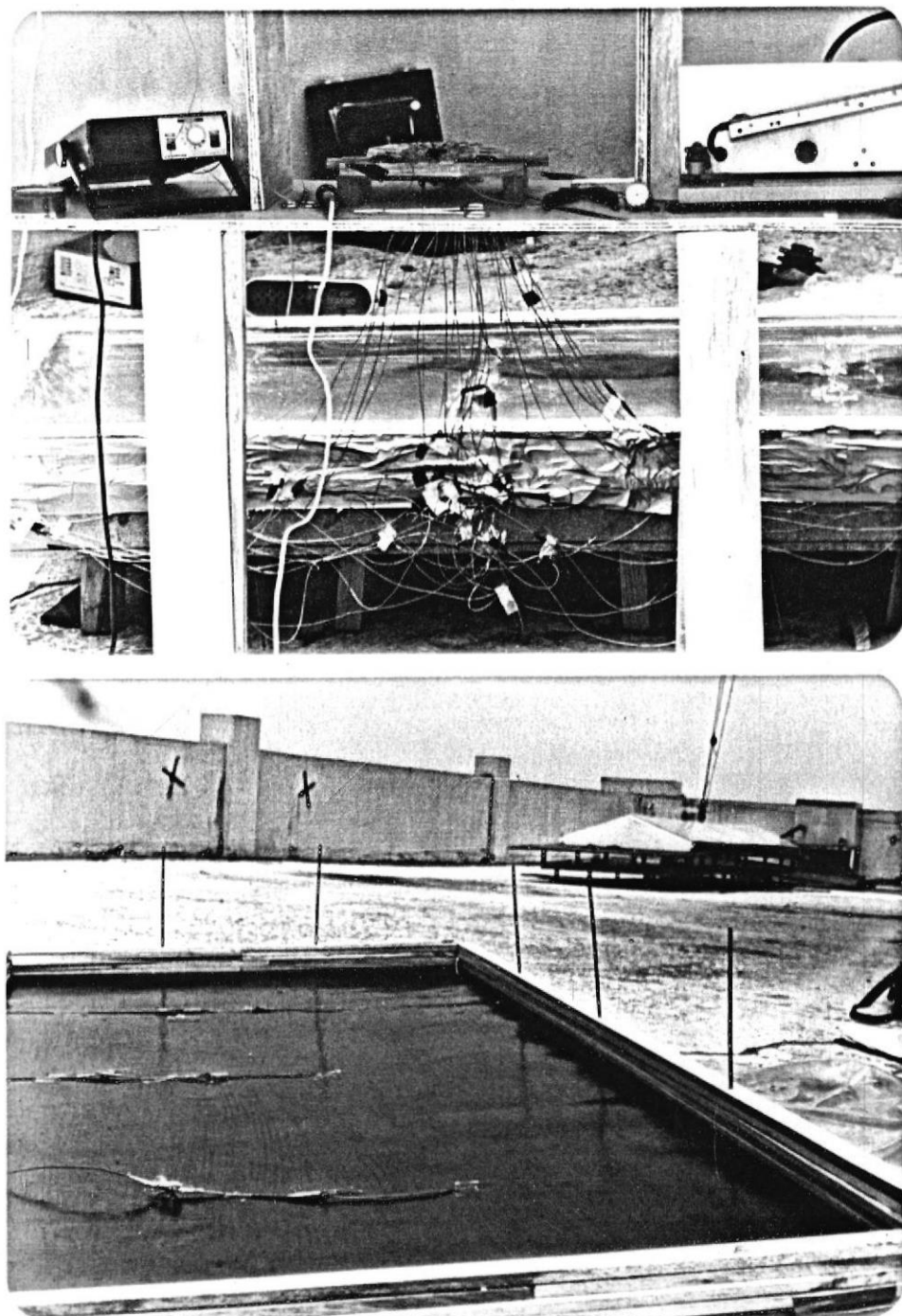


FIGURA Nº 11: INSTALACION DE TERMOCUPLAS

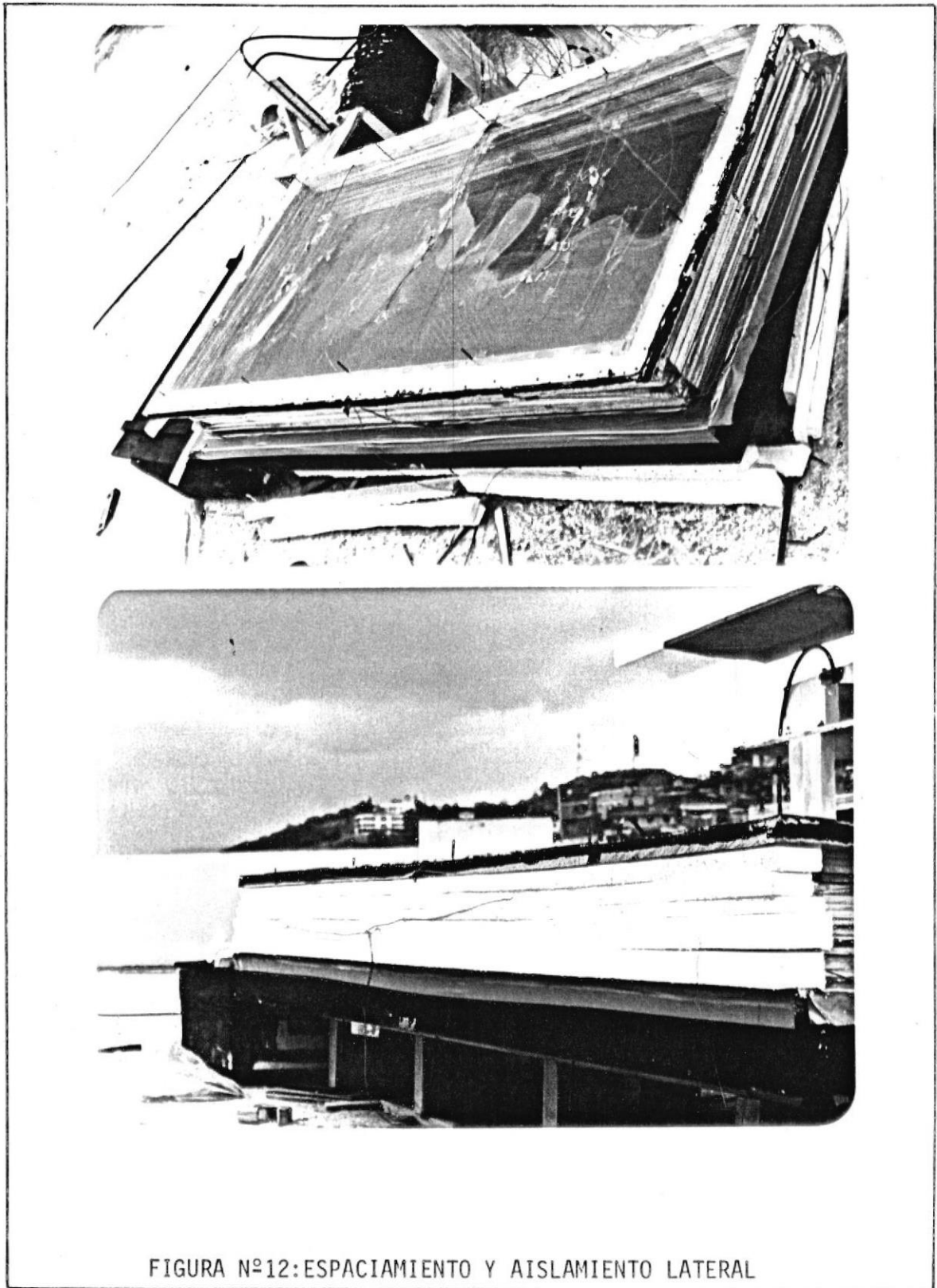


FIGURA Nº12:ESPACIAMIENTO Y AISLAMIENTO LATERAL

Sin considerar los efectos que produce el desplazamiento del sol, que son importantes y originan ciertos cambios, las demás características del sistema, en lo posible serán tomadas como constantes, así por ejemplo; el flujo de aire, longitud de ductos, etc.

Algunas otras variables que pueden en algún momento afectar en la performance del colector, como lo son: la velocidad del viento variaciones climatológicas repentinas, etc., serán consideradas efectos sin trascendencia en el análisis.

El colector será fijado para que permanezca en una sola posición permanente. El modo de circulación del aire es forzado por bombeo, esto es, el aire será sacado del colector por medio de un extractor, forma en que generalmente funcionan los sistemas de calentamiento de aire, ya que se considera que es más fácil extraerlo. La velocidad de circulación del aire será medida mediante la aplicación del tubo de Pitot, del tipo estático. La cantidad de caudal será también controlada por medio de una especie de aleta móvil instalada a la salida del extractor.

Las mediciones de temperaturas serán efectuadas por medio de termocuplas hechas de alambre cobre-constantan, es decir, del tipo "T". Las temperaturas de las cubiertas en un colector placa pla

na varían considerablemente, dependiendo del tiempo y condiciones de operación; sin embargo, se tomarán para el análisis los valores obtenidos a la máxima temperatura, que resultaren expuestos los materiales, durante el día de ensayo. Estas serán consideradas temperaturas de estancamientos.

La serie de ensayos a ser practicados consiste en determinar promedios de eficiencias para períodos de 15 minutos, tomando entre 16 y 20 mediciones 8 ó 10 antes del mediodía solar y 8 ó 10 después del mediodía solar. Las mediciones podrán ser efectuadas en un lapso de tiempo no superior a 5 minutos. Las condiciones del tiempo en los días de ensayos serán tomadas en cuenta, bajo ningún aspecto se realizarán pruebas en días lluviosos, los datos con cielo claro son los aceptables, esto por recomendación de la N.B.S.

Para latitudes menores de  $30^\circ$ , donde la insolación es mayor que para otras latitudes, la energía en estos casos se la puede aprovechar desde más temprano que en otros lugares; recomiendan como buenos momentos para toma de datos desde cuando el sol está a una altitud de  $45^\circ$ , esto es en Guayaquil a las 9h30, instantes en que la temperatura es igual o superior a los  $86^\circ\text{F}$ , bajo condiciones de cielo claro. Antes de efectuar las tomas de datos definitivas, deben realizarse unas dos tomas de datos de

prueba, con el fin de ajustar el equipo y preveer cualquier problema que pudiera aparecer después..

Varios modos de transferencia de calor serán considerados en el análisis, esto se verá con más detalle más adelante. La energía saliente del colector es determinada con los apropiados cálculos, luego serán comparados con la energía incidente sobre el colector, y la aprovechable, para determinar la eficiencia del sistema. El colector debe construirse en lo posible lo más hermético que se pueda, para evitar fugas de aire. El sellado completo del colector se presenta como un problema en el desarrollo de la experiencia. En la figura N° 13, podemos apreciar el sistema del colector listo para realizar las pruebas.

#### 2.4. DATOS METEOROLOGICOS

El clima es un estado original de la atmósfera dado por la latitud del lugar considerado. Un estado atmosférico es caracterizado por los siguientes datos:

- Temperatura del aire
  
- Velocidad y dirección del viento.

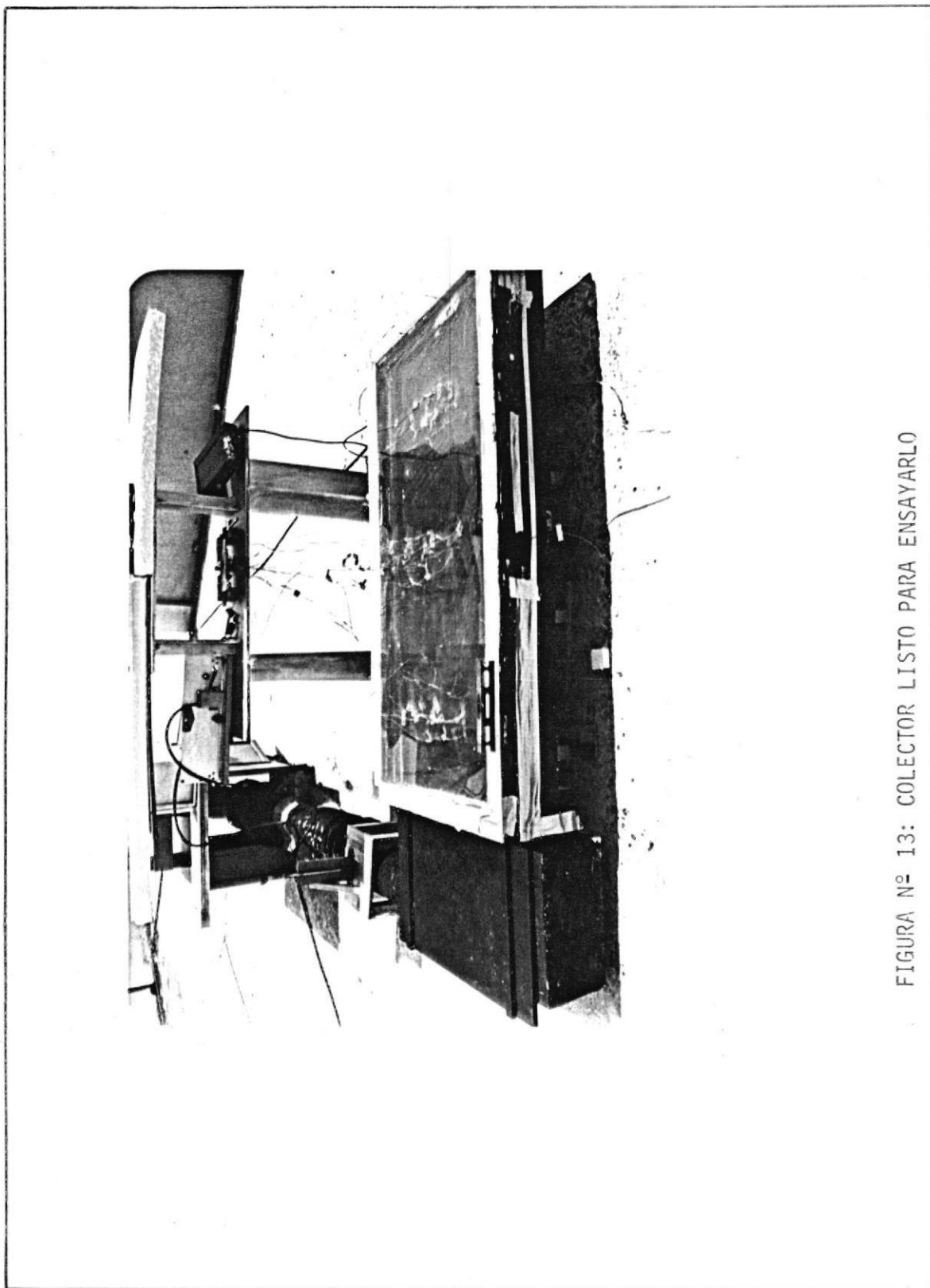


FIGURA N° 13: COLECTOR LISTO PARA ENSAYARLO

- humedad relativa del aire
- insolación
- precipitación de lluvia

En el estudio de la energía solar es indispensable el conocimiento de las horas diarias de sol (heliofanía), y la intensidad de la radiación solar, del mismo modo son útiles la temperatura ambiental y la velocidad del viento. Las condiciones del tiempo influyen fuertemente en las ecuaciones que se emplean para hallar la performance del sistema, y una general información sobre estos también es necesaria para su cálculo.

Para propósitos de diseño de sistemas de calentamiento solar, datos de varios años son convenientes analizarlos y aplicarlos, éstos datos deben ser los mejores producidos para cada estación en los diferentes años. Para estudios dinámicos datos de un día o semana son adecuados, si ellos incluyen rango de condiciones de interés.

Debido al continuo cambio del grado de nubosidad en el ambiente, la intensidad de la radiación en un momento dado no puede ser prevista con anterioridad. La disponibilidad de la radiación solar, sólo puede preverse en términos estadísticos aplicados

a largos períodos. Las variaciones climatológicas son muy diferentes para cada sector, por esta razón cada sistema de calentamiento solar debe ser estudiado individualmente. Existen mapas que nos muestran la disponibilidad aproximada según el lugar de la radiación solar.

Guayaquil, se encuentra a 2,2° de latitud sur a una altitud de 6 metros, de clima trópical, húmedo y caliente, con una humedad atmosférica de un 70 a 80 %, produciéndose el medio día solar alrededor de las 12h30, temperaturas ambientales que varían entre los 82°F y 95°F. Las temperaturas medias mensuales, exhiben una variación anual que dividen al año en dos estaciones diferentes, invierno (caliente) y verano (frío).

## CAPITULO III

## 3. TEORIA

## 3.1. PRINCIPIOS TERMODINAMICOS Y DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN ENERGIA SOLAR

En esta sección damos una revisión concisa de aspectos de termodinámica y de transferencia de calor que serán usados cuando discutamos tópicos específicos. Estos fundamentos nos servirán para poder diseñar y analizar sistemas térmicos solares.

Al existir una diferencia de temperatura, se transmite energía que es llamada "calor". Las leyes termodinámicas nos permiten predecir la cantidad de energía requerida para cambiar un sistema desde un estado de equilibrio, a otro, pero no pueden predecir que tan rápido ocurre este. Por medio de la Ingeniería de Transferencia de Calor podemos analizar razones de energía transferida y distribución de temperatura.

La primera ley de la eficiencia ( $\eta$ ), es definida como la razón de energía útil de salida de un dispositivo a la energía de en

trada del mismo. Usando el concepto de disponibilidad, se define la segunda ley de eficiencia de un proceso, como la razón de la mínima energía disponible la cual debe ser consumida para hacer un trabajo sobre la cantidad de energía consumida disponible.

Si exponemos un cuerpo a la radiación solar, éste sufrirá un aumento de temperatura hasta alcanzar un equilibrio entre la energía recibida y la que pierde. Esto ocurre en un colector solar plano, las pérdidas que se pueden producir son de tres tipos, las cuales analizaremos a continuación.

#### 1. Conducción:

Se dice que el calor que pasa de un cuerpo a otro que está en contacto con él o de una parte a otra de uno de ellos, sin desplazamiento de partículas del cuerpo, es transmitido por conducción.

La relación básica para la conducción, está representada por la ecuación de Fourier; esta es:

$$Q = \frac{k A \Delta T}{L} \quad (9)$$

El valor de  $k$  varía ampliamente para diferentes materiales siendo su valor alto para los metales, bajo para los no metales y muy bajo para los gases (ver tabla 1). El valor de la conductividad de los materiales varía muy poco con la temperatura.

## 2. Radiación:

Todo cuerpo calentado emite radiación térmica electromagnética en la cual la longitud de onda y la intensidad de esta radiación, son dependientes de la temperatura del cuerpo y de su característica óptica.

Las características ópticas significantes de los materiales son: la emitancia ( $\epsilon$ ), la absortancia ( $\alpha$ ) y la reflectancia ( $\rho$ ).

La emisividad es definida como la razón del flujo de radiación térmica emitida por un cuerpo a la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. De igual forma se define la absortancia, siendo ésta la fracción absorbida. El término reflectividad indica la fracción de radiación incidente reflejada; y si ésta sale con el mismo ángulo de incidencia se dice es especular o directa y difusa si es reflejada en

todas direcciones.

La ley de Stefan-Boltzman para la emisión de un cuerpo negro perfecto es:

$$Q = \sigma A T^4 \quad (10)$$

donde:

$$\sigma = 0,1713 \times 10^{-8} \text{ BTU/hr} \cdot \text{pie}^2 \cdot T^4$$

y el intercambio neto de calor debido a la radiación entre dos superficies paralelas está dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{Q}{A} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} + \frac{1}{F_{1-2}} - 2} \quad (11)$$

Donde  $F_{1-2}$  es el factor de forma que para la radiación es definido como la fracción de energía total emitida desde una superficie que es interceptada por la otra superficie.

### 3. Convección:

Es consecuencia directa de la inducción, cuando un cuerpo calentado está en contacto con un fluido que tiene baja temperatura o lo contrario, calor es transmitido de la superficie al fluido o viceversa. Este cambio de calor origina una variación en la densidad del fluido. Por sustentación el fluido junto a la superficie calentada - causa que éste se mueva. Esta transferencia de calor a la masa del fluido adyacente es llamada convección.

Existen dos tipos de convección, la de estado estable o libre que es la que ocurre cuando no hay una fuerza externa como el viento o alguna bomba que originaría lo que se conoce como convección forzada.

En el colector de placa plana, la convección es debida a la diferencia de temperatura del aire (fluido de trabajo) y la placa del colector propiamente dicho. Tenemos entonces que, por la ecuación de Newton:

$$Q_{ij} = h_{cij} (T_i - T_j) A \quad (12)$$

Estableceremos la influencia del viento en las pérdidas - por convección producidas entre la cubierta exterior y el ambiente; basándonos en la suposición del paralelismo en tre la dirección del viento y el cuerpo. En la descripción matemática de la convección lo usual es emplear el análisis dimensional.

Este análisis dimensional nos sirve para analizar las pér didas convectivas. Los usuales grupos adimensionales empleados para el estudio son:

$$N_u = h L/k \quad (13)$$

$$R_e = \rho V L/\mu \quad (14)$$

$$P_r = \mu c_p/k \quad (15)$$

$$G_r = g \beta \Delta T L^3 \rho^2/\mu^2 \quad (16)$$

Procederemos a usar una derivación basada en Rayleigh, la

que nos será útil más adelante.

$$R_a = (\rho^2 g \beta \Delta T L^3 / \mu k) c_p \quad (17)$$

esto es:

$$R_a = G_r P_r$$

Estos números adimensionales tienen sus significados físicos así:

$N_u$  = coeficiente adimensional de transferencia de calor

$R_e$  = es la razón de las fuerzas de inercia a viscosas

$P_r$  = razón de la difusividad molecular del momento con respecto al calor.

$G_r$  = razón de la fuerza de sustentación a la viscosa

$R_a$  = razón de la sustentación térmica a la inercia viscosa.

Los números adimensionales son útiles en la descripción y solución de problemas, esto permite relacionar o hacer similitudes entre sistemas de diferente naturaleza física.

Un análisis de estabilidad llevado a cabo por Rayleigh, concluyó que en encerramientos entre placas planas paralelas, si el

valor de  $R_a \leq 1708$  se produce un estado estacionario del fluido encerrado, y el único modo de transferencia de calor en el centro del encerramiento es puramente por conducción, entonces se cumple que:

$$N_u = 1$$

Para valores de  $R_a > 1708$ , se produce un estado no estacionario, entonces:

$$N_u > 1$$

(5)  
Buchberg, recomienda el uso de tres regiones diferentes de correlación, para este caso de un estado no estacionario ( $R_a > 1708$ ), estas son:

a.  $1708 < R_a < 5900$ ; aquí se cumple que:

$$N_u = 1 + 1,446 (1 - 1708/R_a) \quad (18)$$

b.  $5900 < R_a < 9,23 \times 10^4$ ; implica que:

$$N_u = 0,229 (R_a)^{0,252} \quad (19)$$

c.  $9,23 \times 10^4 < R_a < 10^6$ ; para este caso:

$$N_u = 0,157 (R_a)^{0,285} \quad (20)$$

Otras relaciones fueron formuladas para este mismo caso - por O'toole y Silveston<sup>(26)</sup>, estas son:

a.  $1700 < R_a < 3500$ :

$$N_u = 0,00238 (R_a)^{0,816} \quad (21)$$

b.  $3500 < R_a < 10^5$ :

$$N_u = 0,229 (R_a)^{0,252} \quad (22)$$

c.  $10^5 < R_a < 10^9$ :

$$N_u = 0,104 (R_a)^{0,305} (P_r)^{0,084} \quad (23)$$

Hollands<sup>(7)</sup> concluyó que para el caso de convección natural en encerramiento entre placas inclinadas paralelas, se cumple:

$$\frac{w}{b} > 20 \quad y \quad \theta \leq 70^\circ$$

$$N_u = 1 + 1,44 \left\{ 1 - \frac{1708}{R_a \cos \theta} \right\}^* \left\{ 1 - \frac{1708 (\text{sen } 1,8)^{1,6}}{R_a \cos \theta} \right\} + \left( \frac{R_a \cos \theta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \quad (24)$$

Donde el asterisco colocado significa que el valor del paréntesis solo puede ser positivo, en caso de que sea negativo - se lo hace igual a cero.

Es importante considerar en transferencia de calor, el régimen del flujo del fluido de trabajo, el cual puede ser definido laminar o turbulento. Así tenemos que para pequeños colectores de placa plana el flujo es considerado usualmente - laminar. Pero es de interés en el diseño de colectores que éste sea turbulento y completamente desarrollado para obtener una mejor transferencia de calor. Según Kreider-Kreith (14) para el aire se considera flujo laminar cuando:

$$10^4 \leq G_r \leq 10^9 \quad R_e \leq 8.000$$

y turbulento completamente desarrollado cuando:

$$G_r \geq 10^9 \quad \text{ó} \quad R_e \geq 10.000$$

En un ducto rectangular de longitud  $L$ , el caudal de masa de un fluido que circula en este es:

$$m = \rho v A \quad (25)$$

y la capacidad calorífica de la masa es:

$$Q = mc_p (T_e - T_s) \quad (26)$$

### 3.2. ESTUDIO DE LA EFICACIA DEL COLECTOR

#### 3.2.1. Factores que influyen en el diseño

El término eficacia está en relación con el rendimiento real al máximo posible del colector solar.

La eficacia del colector depende de un número de factores y será mayor si:

- a. El coeficiente de transmisión de luz solar de las cubiertas se maximiza.
- b. El coeficiente de absorción de la placa absorbadora se maximiza.

- c. Si la transmitancia para el flujo de calor de salida se minimiza.
- d. El coeficiente de emisión para ondas largas *calor* se minimiza.
- e. Si la temperatura de la placa se mantiene a un nivel mínimo útil, ya que esto minimiza las pérdidas de calor.

Si hablamos de eficiencia de captación, nos referimos a la relación entre el calor real captado y la cantidad de radiación que cae sobre el colector.

Dependiendo del período considerado, podemos hablar de eficiencia de captación "diaria", "anual" o instantánea. Su magnitud depende del régimen de radiación y de las temperaturas exteriores, así como del diseño del colector en sí, del régimen del flujo de aire y de la temperatura de captación.

Los sistemas de captación se autoregulan en cierta medida; cuando la temperatura del aire alcanza un punto de equilibrio, en ese instante no se produce más captación,

ya que, la pérdida de calor por parte del colector será igual a la ganancia de energía solar.

La cantidad de energía recogida útil dependerá de los siguientes parámetros:

1. Cantidad de radiación incidente: La radiación solar es considerablemente alterada en su paso por la atmósfera terrestre. Los dos principales mecanismos causantes de esta alteración son la absorción y la dispersión.

Existen algunos constituyentes de la atmósfera, los cuales absorben parte de la radiación solar entrante. El primero de ellos es el ozono, este absorbe casi toda la radiación solar ultravioleta, sólo una poca radiación con longitud de onda de  $3 \mu$  alcanza la superficie terrestre.

Otro absorbedor primario de la radiación es el vapor de agua, este absorbe toda clase de onda en la región infrarroja de la radiación, ésta es la causa de los bajos y picos de la radiación recibida en la superficie terrestre en dicha región.

La cantidad de vapor de agua depende de la altitud, clima y estación. Las variaciones atmosféricas del contenido de vapor de agua frecuentemente produce un 5 a 20 % de variación en la intensidad directa de la radiación solar en la superficie de la tierra.

Además de estos dos primarios absorbentes, existen otros constituyentes atmosféricos los cuales, absorben menores cantidades de radiación solar, entre estos tenemos: el dióxido de carbono, otros gases, oxígeno y partículas en suspensión.

Los constituyentes responsables de la dispersión de la radiación solar son las partículas en suspensión y gotas de agua. Esta dispersión es bastante uniforme con respecto a la dirección, sin embargo es frecuentemente dependiente de la longitud de onda y afecta más a la radiación de onda corta.

Teniendo en cuenta que casi toda la captación útil del calor solar se produce cuando el sol es visible y no oculto por las nubes, y que además toda esa captación se realiza durante las horas del mediodía, puede decirse que la

diación difusa supone una pequeña fracción que oscila entre el 8 % y el 10%, en días claros. En áreas húmedas o industriales este porcentaje puede llegar a valores dobles de los citados.

2. Propiedades ópticas de las cubiertas transparentes: Entre las más importantes tenemos:

1. El índice de refracción, que determina la pérdida por reflexión desde la cubierta.
2. El coeficiente de extinción, que determina las pérdidas por absorción en las cubiertas. Este coeficiente es una propiedad física del material que en sí es función de la temperatura, presión, composición del material y de la longitud de onda.
3. Transmitancia térmica de las cubiertas. La variación de ésta se ve influenciada por la radiación entrante y su ángulo de incidencia y por el número y propiedades del material de las cubiertas.

3. Temperatura de captación. Esta a su vez depende de:

- Tipo de fluido
- regimen de flujo del fluido
- temperatura del fluido a la entrada del colector.

La eficiencia para un alto flujo de masa excede a la eficiencia para un bajo flujo de masa por la mayor turbulencia que origina.

4. Condiciones ambientales. La perfomancia de los calentadores de aire solares está gobernada por las condiciones metereológicas, las cuales varían con el tiempo; entre las más importantes tenemos:

- temperatura del aire en los alrededores
- temperatura efectiva del cielo
- velocidad del viento

Debido al constante cambio de las condiciones metereo

lógicas, a la capacitancia térmica de los componentes de los calentadores de aire y a la natural variable - conducta de almacenamiento y carga que afectan la temperatura del aire en la entrada del colector, la conducta de los calentadores es inherentemente transiente, es decir que varía con el tiempo.

Los efectos pueden ser considerados en distintas horas. Unos debidos al calentamiento del colector en - su temprana baja temperatura de operación al atardecer. Y otros debidos a la intermitente conducta durante el día de la radiación solar y el viento, éstos cambian rápidamente y son conocidos sus valores sola mente promediados en intervalos de hora.

5. Las pérdidas debidas a la suciedad sobre la cubierta transparente. El efecto del polvo o suciedad en los colectores solares ha sido estudiado por diferentes - científicos de diferentes lugares, ellos han llegado a conclusiones similares, entre las que tenemos:

En Duffie<sup>(7)</sup> vemos que para ángulos de inclinación del colector de 0 a 50°, la influencia del polvo tiene un

valor máximo de un 5 %. Luego de largos estudios realizados en Boston, se encontró que la performance del colector disminuía en un 1 % debido a la cubierta con polvo. En un experimento de 30 días sin lluvia en la India, se obtuvo que la suciedad reduce la transmitancia en un promedio del 8 % para colectores inclinados 45°.

Para propósitos de diseño, se sugiere que la radiación absorbida por la placa puede reducirse en un factor del 2 % siendo  $d$ ; el factor de suciedad.

$$d = 0,02 \text{ para polvo } \rightarrow (1-d) = 0,98 \quad (27)$$

Valores actuales del factor de suciedad dependen de la localización inclinación y frecuencia de lavado de la superficie del colector si es que la hay.

6. Angulo de incidencia de la radiación. Durante el día, el ángulo de incidencia de los rayos del sol sobre el colector cambia constantemente, variando el flujo de la radiación en proporción al coseno del ángulo con que incide.

El análisis de las ecuaciones que gobiernan estos cambios se lo puede encontrar en la Bibliografía.

7. Las sombras producidas sobre la superficie absorbadora por las paredes laterales del receptor y los posibles soportes de la cubierta transparente. El efecto de sombra puede ser significativo cuando el ángulo de incidencia de la radiación no es normal, la estructura del mismo colector intercepta la radiación incidente. Algo de esta radiación puede ser reflejada a la placa absorbadora si las paredes son de un material reflectivo .

Los valores del factor de sombra dependen del detalle constructivo del colector y tiempo del año. Ciertos autores no consideran este factor de sombra y también el de suciedad por ser difícil y no segura su obtención, limitándose a correcciones pequeñas al final del análisis del sistema.

8. Número de cubiertas. El número que se desee utilizar en un colector depende de varios factores, pero el más importante, es la temperatura a la cual se desea absorber el calor comparada con la temperatura ambiental. Se puede utilizar la tabla N° 4, como guía.

TABLA N° 4 (1)

TEMPERATURA DEL COLECTOR SOBRE EL AMBIENTE, °F.	APLICACION TIPICA	NUMERO DE CUBIERTAS	
		COLECTOR PINTADO DE NEGRO ( $\epsilon=0,9$ )	COLECTOR SE- LECTIVO ( $\epsilon=0,2$ )
de 22 a 43	-Fuente de calor - para bomba.  -aire para secado	ninguna	ninguna
de 43 a 95	-agua caliente  -aire para secado  -destilación solar  -calefacción de vi- viendas en climas templados.	1	1
de 95 a 140	-agua caliente(in- vierno).  -calefacción de vi- viendas en climas frios	2	1
de 140 a 194	-aire acondicionado  -producción de vapor  -refrigeración  -cocina por ebullición	3	2

(1) Obtenida de Referencia N° 7



11. Rendimiento de los componentes del colector, éste depende de:

- clase de material
- espesores de estos, etc.

Los materiales por sus cualidades físicas, son más o menos capaces de reflejar la radiación solar o de acumularla, de transmitir o no las variaciones térmicas, etc. Se pueden medir estas propiedades físicas y, en consecuencia, clasificar los materiales.

12. Tratamientos especiales de las superficies de las coberturas y placa absorbadora. Toda energía emitida por el sol que llega hacia el colector prácticamente se encuentra distribuida entre longitudes de ondas menores a  $3 \mu$ , mientras que un cuerpo que alcance una temperatura próxima a los  $212^{\circ}\text{F}$ , emite el 99% de su energía radiante con longitudes de onda mayores de  $3 \mu$ . Por lo tanto, cualquier superficie que tenga un elevado coeficiente de absorción por debajo de

$3\mu$  y un bajo coeficiente de emisión por encima de las  $3\mu$ , absorberá bien la energía solar y al mismo tiempo, emitirá poca radiación térmica.

A este tipo de superficie se le denomina selectivas, se ha comprobado que se comportan como absorbedores selectivos, las superficies metálicas pulidas sobre las que se depositan finas - capas de componentes negros, como óxidos de níquel, cromo o de cobre.

En los colectores planos, las pérdidas de energía por reflexión en las cubiertas transparentes pueden representar una importante pérdida de eficiencia.

Existen procedimientos para reducir la reflectividad de las superficies, como el vidrio, los cuales, están basados en el recubrimiento de las superficies con películas antirreflejantes interferenciales. Dichas películas deben tener un índice de refracción intermedio entre el del aire y el del vidrio y un espesor tal -

que se produzca una interferencia destructiva entre la luz reflejada en el vidrio y su superficie más exterior.

Modernamente se ha desarrollado una técnica de preparación de superficies transparentes an tirreflectantes basada en un ataque químico de la superficie del vidrio en un baño de ácido - fluorosilísico diluído y saturado en sílice. La temperatura del baño y duración del ataque son críticos y deben optimizarse para cada cla se de vidrio usado. Con vidrio de bajo contenido de hierro se consigue que la transparencia total sea del orden del 97 %.

13. Geometría del colector. Es decir, la disposición de los componentes del colector que puede optimizarse o variarse para obtener mejores resulta dos en la perfomancia del colector.
14. Producto transmitancia-absortancia. Este toma en cuenta las propiedades ópticas de la placa - absorbadora y cubiertas en conjunto.

La eficiencia del colector solar plano, será el resultado de todos estos parámetros combinados.

### 3.2.2. Pérdidas de calor

En los colectores de placa plana se producen pérdidas originadas por procesos corrientes de transmisión de calor, debido a la diferencia de temperatura existente entre la placa absorbente, la cual se encuentra a una temperatura superior, y el medio que la rodea.

Estas pérdidas tienen lugar hacia arriba, a través de las coberturas, hacia abajo, a través del aislamiento posterior, y hacia los lados, a través del aislamiento lateral.

La temperatura del ambiente que rodea al colector es mayor que la temperatura efectiva del cielo. Quedan relacionadas estas dos temperaturas en la siguiente expresión:

$$T_w = 0,04114 T_{am}^{1,5} \quad (28)$$

La diferencia de temperatura entre la del cielo y el - aire ambiental es generalmente menor que 53°F .

En la figura Nº 14, apreciamos algunos de los factores que contribuyen a las pérdidas en el colector.

Desde el receptor existen tres fuentes primarias de pérdidas de calor; estas son:

1. Pérdidas conductivas: en general se las aplica - en las partes del colector que no están expuestas a la radiación solar, como ocurre en la parte posterior y los laterales.
2. Pérdidas convectivas: ocurren a partir de la placa absorbadora a los alrededores, através del aire encerrado entre las cubiertas. En la cubierta exterior en presencia del viento se establece la convección forzada, en ausencia de este se transfiere calor por convección natural.
3. Pérdidas por radiación; se producen de las cubiertas y operan independientemente de la convección.

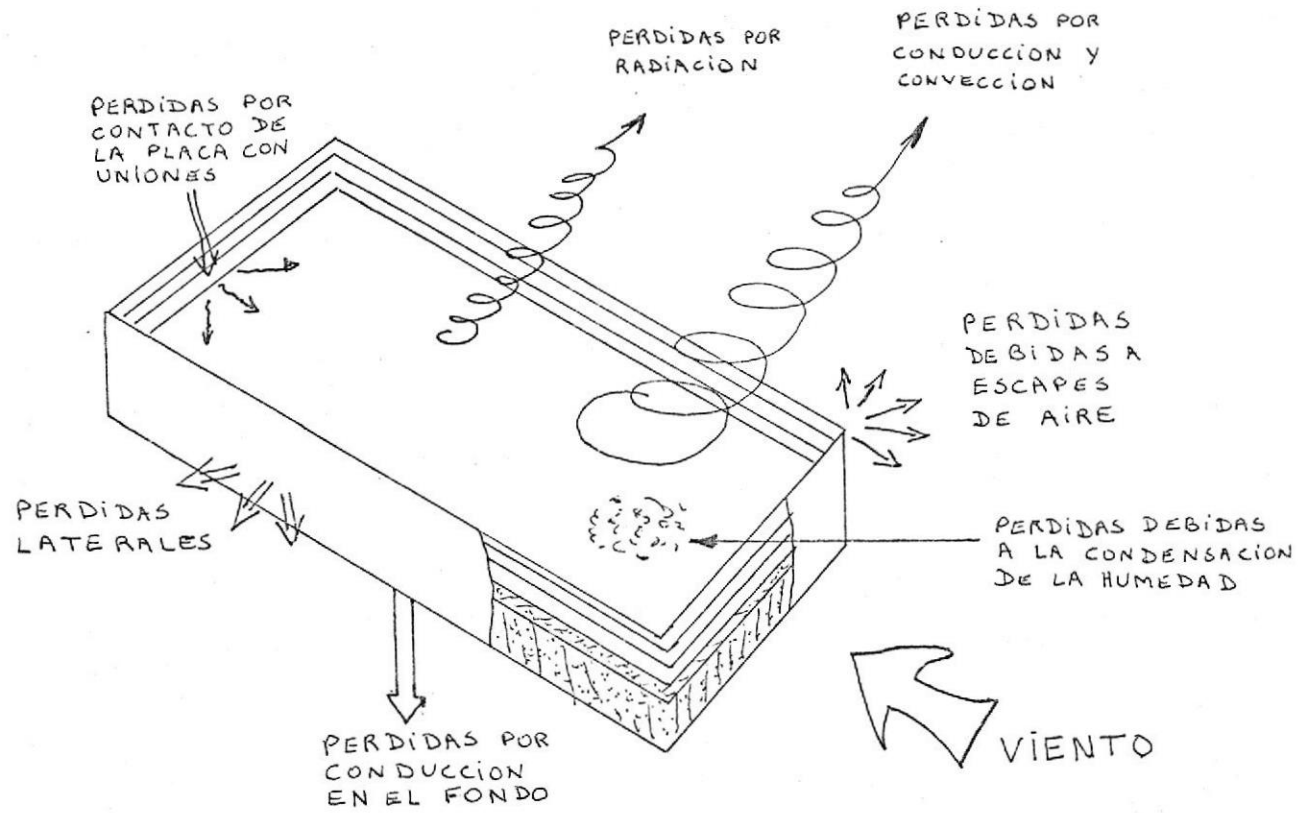


FIGURA Nº14: PERDIDAS EN EL COLECTOR

Una medición de la performance del colector de placa plana, es la eficiencia de este, la cual es definida como el valor de calor útil ganado de la energía solar incidente en un período de tiempo, esta depende fuertemente de las pérdidas hacia la superficie superior del colector debidas a procesos convectivos y radioactivos de transferencias de calor entre las cubiertas transparentes; que a su vez dependen de:

- Temperatura de las cubiertas
- Temperatura de la placa absorbente
- Temperatura del aire ambiental
- Velocidad del viento
- Material de las cubiertas
- Número de cubiertas
- Angulo de inclinación del colector respecto a la horizontal.
- Separación de las cubiertas.

La convección natural y formas de pérdidas de calor hacia arriba a través del sistema de cubiertas en un colector de placa plana, ha sido un área de estudio en la cual ha existido mucho desacuerdo.

Winter<sup>(33)</sup>, al respecto concluye lo siguiente: Por algunos años los resultados recomendados por Hottel y Woertz, fueron usados (1.942). Luego Tabor sugirió algunos valores, los cuales eran valores que - corregían los de Hottel y Woertz. (1.958). Duffie y Beckman (1.974) consideraron cálculos analíticos del problema pero despreciaron ciertos efectos como los producidos por el intercambio de radiación térmica entre la placa y las cubiertas.

Los valores obtenidos por Tabor, fueron luego discutidos por Buchberg en 1.974, el concluyó que las pérdidas conductivas - convectivas que se producían en los encerramientos formados en el sistema placa absorbedora y cubiertas, decrecen con un incremento en el espaciamiento de las placas, hasta alcanzar un mínimo aparente justo cuando la convección natural se inicia, entonces a mayor espaciamiento se incrementan las pérdidas hasta alcanzar un máximo valor para luego decrecer gradualmente hasta alcanzar valores de conducción mínimos.

Hollands (1.975) obtiene correlaciones en las que incluye efectos de propiedades del gas, diferencia de tempe

ratura, espaciamiento de las placas e inclinación del colector.

Analizando el colector a ensayar, estudiamos todos los tipos de pérdidas que se producen en este así:

- a. Pérdidas por arriba ( $Q_t$ ); en la figura N°15, se muestran todos los intercambios de radiación y convección libre, que se producen entre las cubiertas y la placa absorbadora.

Las ecuaciones parciales de los diferentes coeficientes de transferencia de calor son:

- Para la placa absorbadora y la cubierta interior N° 1; según Duffie <sup>(7)</sup>, para láminas paralelas - se emplea la siguiente ecuación linearizada:

$$Q_{i-j} = \frac{A \sigma (T_i^2 + T_j^2) (T_i + T_j) (T_i - T_j)}{\frac{1}{\epsilon_i} + \frac{1}{\epsilon_j} + \frac{1}{F_{i-j}} - 2} \quad (29)$$

La cual comparándola con la siguiente ecuación:

$$Q = hr_{i-j} (T_i - T_j) \quad (30)$$

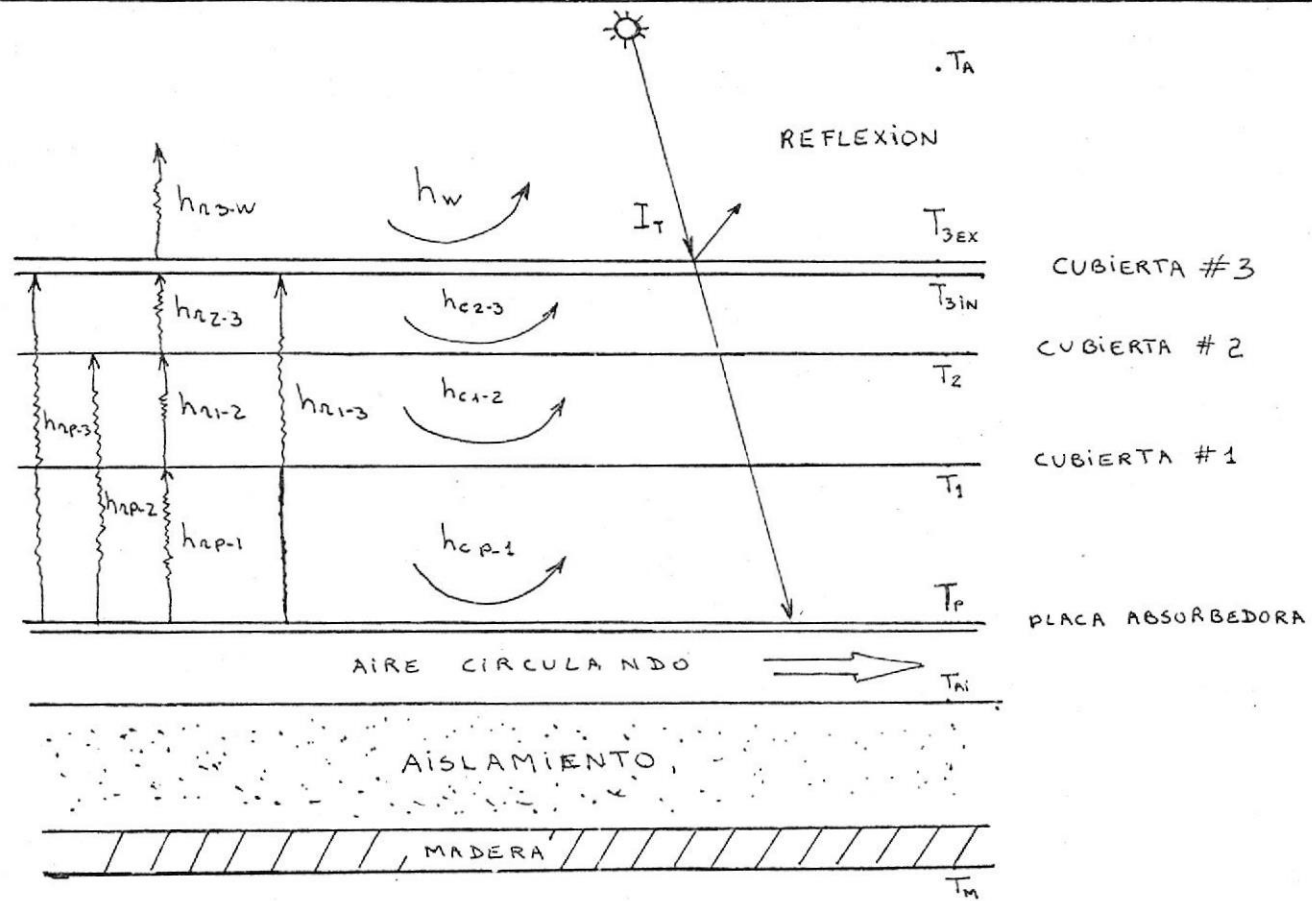


FIGURA N°15: INTERCAMBIO DE CALOR EN LAS CUBIERTAS

nos da que:

$$h_{r_{i-j}} = \frac{\sigma(T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j)}{\frac{1}{\epsilon_i} + \frac{1}{\epsilon_j} + \frac{1}{F_{i-j}} - 2} \quad (31)$$

Siegel<sup>(31)</sup> nos presenta gráficos y fórmulas que se aplican para hallar el valor del factor de forma ( $F_{i-j}$ ). Emplearemos la siguiente expresión para resolución de nuestro caso.

$$F_{i-j} = \sqrt{1 + H^2} - H \quad (32)$$

Donde:

$$H = \frac{X}{W}$$

Para hallar el valor de los coeficientes convectivos  $h_{c_{ij}}$ , aplicamos las ecuaciones (17) y (13). En el cálculo del coeficiente convectivo entre la cubierta exterior y el ambiente aplicamos<sup>(30)</sup>:

$$h_{c_{3-w}} = 1 + 0,3 (v); \quad (v) \text{ en millas/hora} \quad (33)$$

Para los sistemas de las cubiertas N° 1 y 2, las ecuaciones de los coeficientes radiactivos y convectivos, se los obtiene de manera similar.

Los valores de los coeficientes radiactivos para el caso de láminas separadas por otras parcialmente transparentes se los encuentra a partir de las ecuaciones siguientes<sup>(30)</sup>:

$$h_{rp-2} = F_{p-2} \tau_1 \varepsilon_2 \sigma \frac{(T_p^4 - T_2^4)}{(T_p - T_2)} \quad (34)$$

$$h_{rp-3} = F_{p-3} \tau_1 \tau_2 \sigma \frac{(T_p^4 - T_{3in}^4)}{(T_p - T_{3in})} \quad (35)$$

$$h_{r1-3} = F_{1-3} \tau_2 \varepsilon_1 \sigma \frac{(T_1^4 - T_{3in}^4)}{(T_p - T_{3in})} \quad (36)$$

EN ESTAS SE ASUME QUE  $\varepsilon_p = 1$   $P_1 = P_2 = 0$

Desarrollando por partes la red representativa del sistema que se encuentra graficada en la figura N° 16, obtendremos:

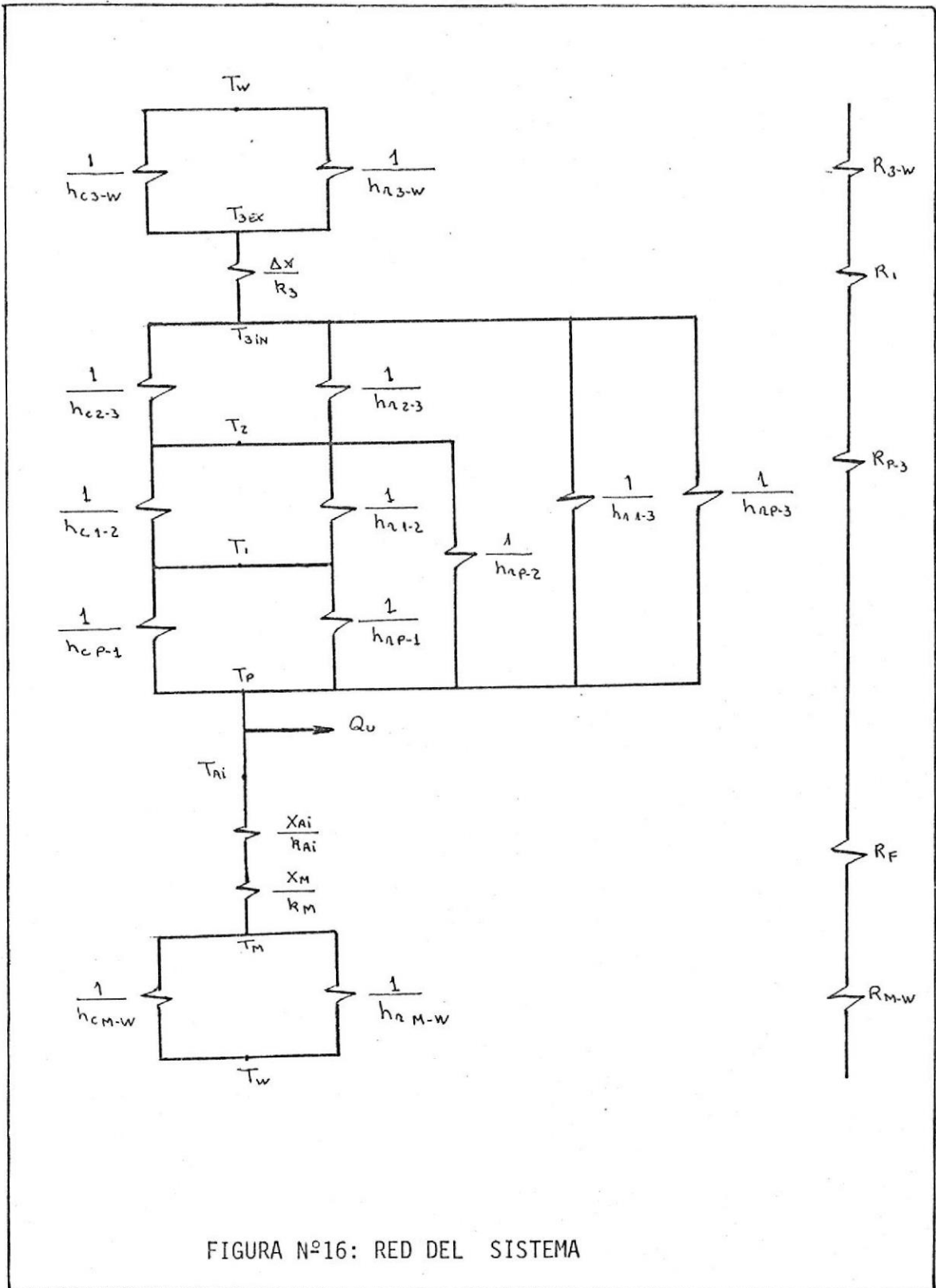


FIGURA N°16: RED DEL SISTEMA

$$R_{2-3} = \frac{1}{h_{c2-3} + h_{r2-3}}$$

$$R_{p-1} = \frac{1}{h_{cp-1} + h_{rp-1}}$$

$$R_{1-2} = \frac{1}{h_{c1-2} + h_{r1-2}}$$

$$R_{p-2} = \frac{1}{\frac{1}{R_{p-1} + R_{1-2}} + h_{rp-2}}$$

$$R_{1-3} = \frac{1}{\frac{1}{R_{p-2} + R_{2-3}} + h_{rp-3} + h_{r1-3}}$$

$$R_1 = \frac{\Delta X}{K_1}$$

$$R_{3-w} = \frac{1}{h_{r3-w} + h_{c3-w}}$$

$$R_T = R_{p-3} + R_1 + R_{3-w}$$

$$U_t = \frac{1}{R_t}$$

$$Q_t = A U_t (T_p - T_A) \quad (37)$$

b. Pérdidas en el fondo ( $Q_f$ )

Las pérdidas hacia abajo en el colector se consideran debidas solamente a la conducción. El único camino para combatir las pérdidas por conducción - desde la caja es asegurarse un perfecto aislamiento del colector.

En un colector bien aislado la resistencia externa convectiva es mucho menor que la resistencia del - aislamiento y las perdidas por el fondo debido a la conducción entonces son considerando también la caja de madera:

$$R_F = \frac{X_{Ai}}{R_{Ai}} + \frac{X_m}{R_m}$$

$$h_{cm-w} = h_{c3-w}$$

$$h_{rm-w} = \sigma \epsilon_m (T_m^2 + T_w^2) (T_m + T_w)$$

$$R_{m-w} = \frac{1}{h_{cm-w} + h_{rm-w}}$$

$$U_f = \frac{1}{R_{m-w} + R_f}$$

$$Q_f = A_f U_f (T_{ai} - T_A) \quad (38)$$

c. Pérdidas por los laterales ( $Q_l$ ):

Este tipo de pérdidas pueden tener importancia en pequeños colectores, en los que la proporción en

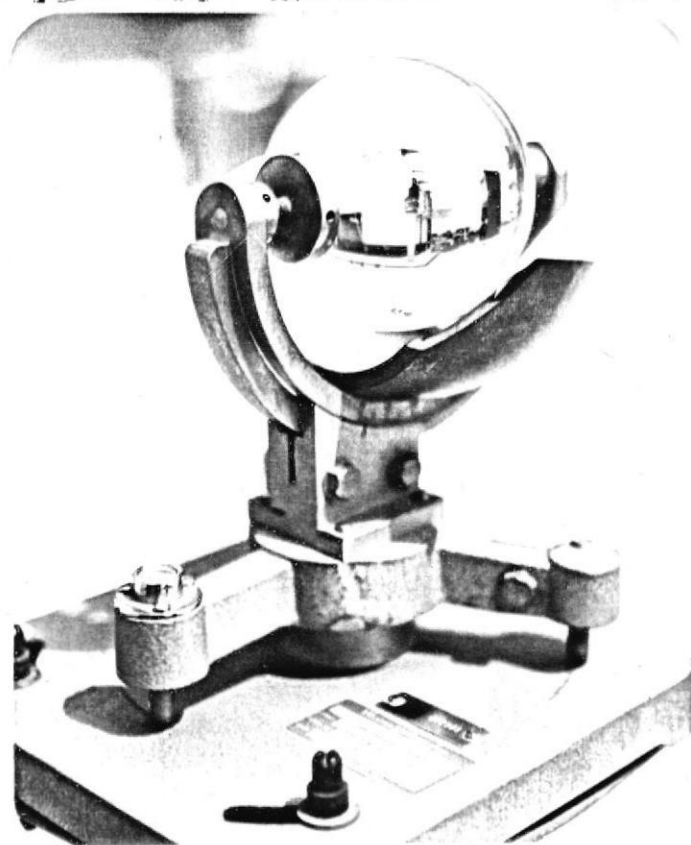
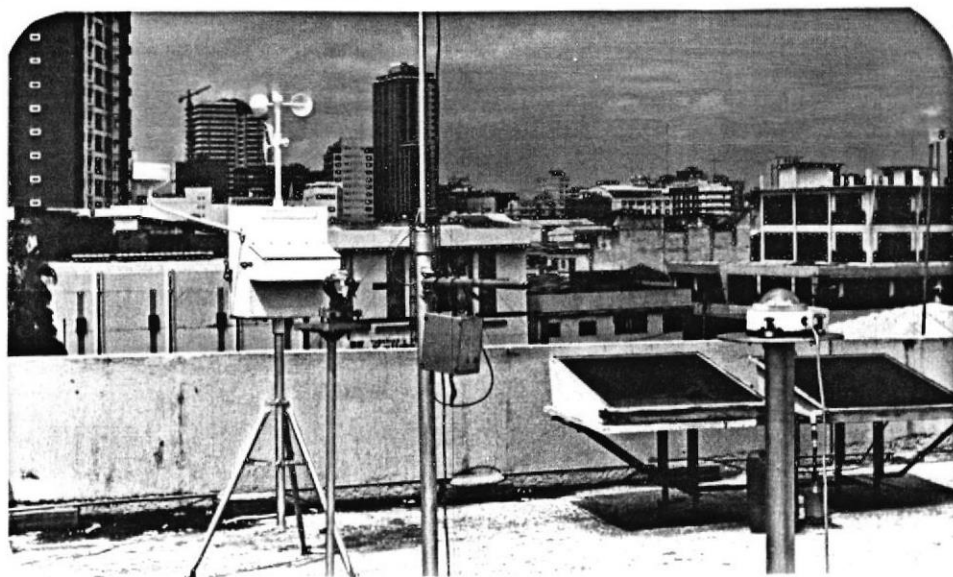


FIGURA N° 24 : EQUIPOS DE LABORATORIO

Con el fin de evitar que el colector experimental se deteriore por efectos de la lluvia en la noche, o para que no se ensucie, se lo protegió con plásticos.

La ubicación de las termocuplas en el colector están representadas en los dibujos de las figuras N° 25, 26 y 27.

#### 4.1.3. Equipo utilizado:

Como la performance del colector se la estudiará mediante el análisis de las diferentes formas de transferencia de calor que se den en el colector será necesario tomar lecturas de temperatura para lo que se emplearán termocuplas de cobre-constantan. El aparato receptor de las señales que producen las termocuplas, es un termómetro digital marca Omega, el cual está en la capacidad de captar variaciones de temperatura de hasta 0.2 °F.

Los materiales que se emplearon fueron: pintura, clavos, pegamentos, madera, cintas engomadas, lija,

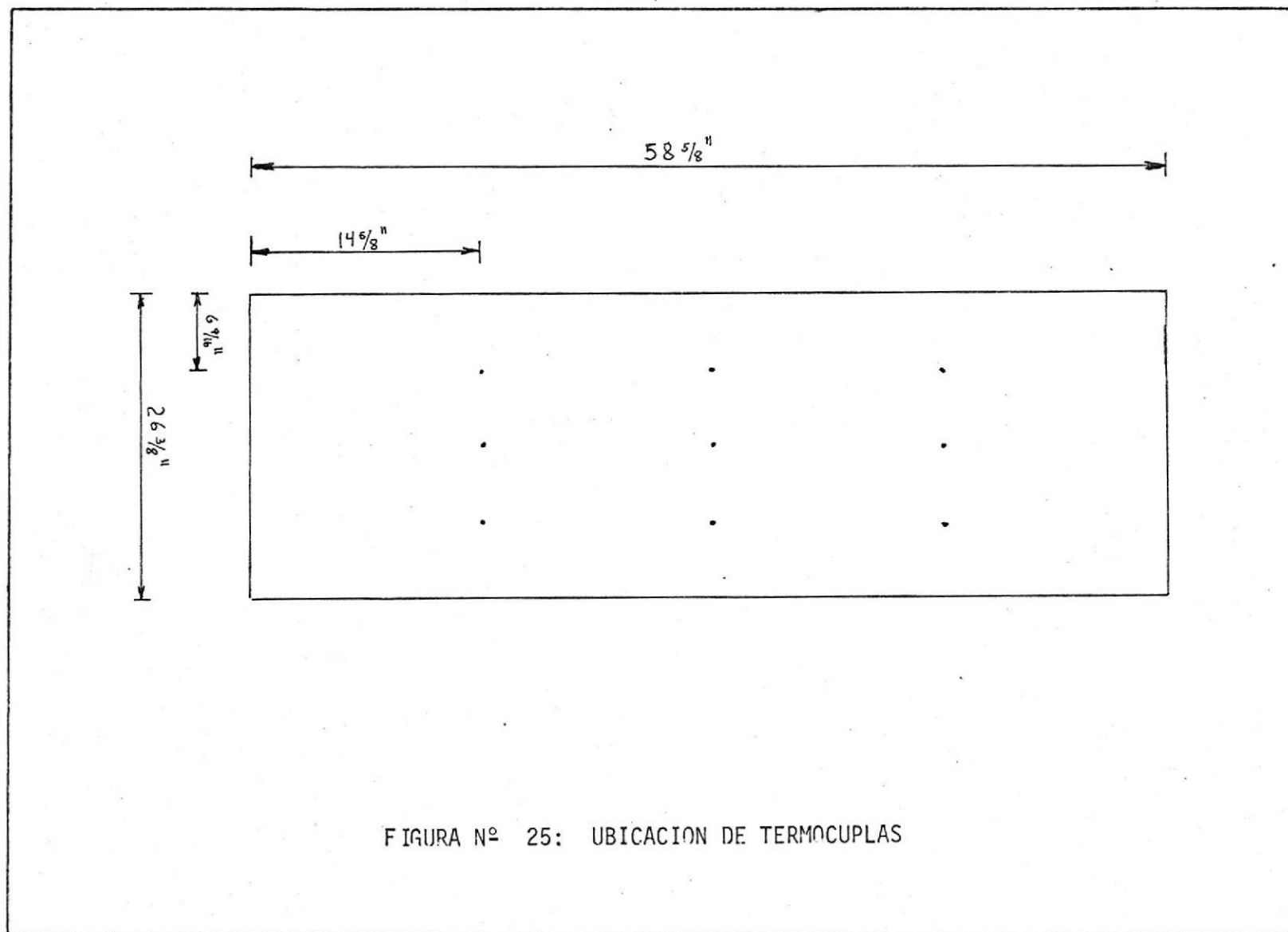


FIGURA N° 25: UBICACION DE TERMOCUPLAS

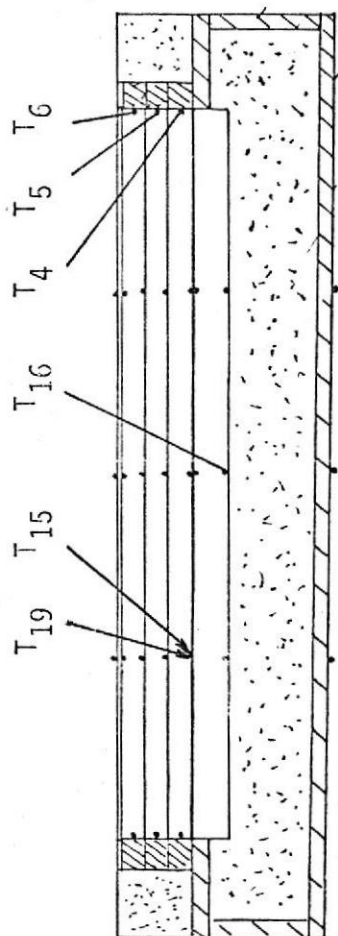


FIGURA N° 26: UBICACION DE TERMOCUPLAS

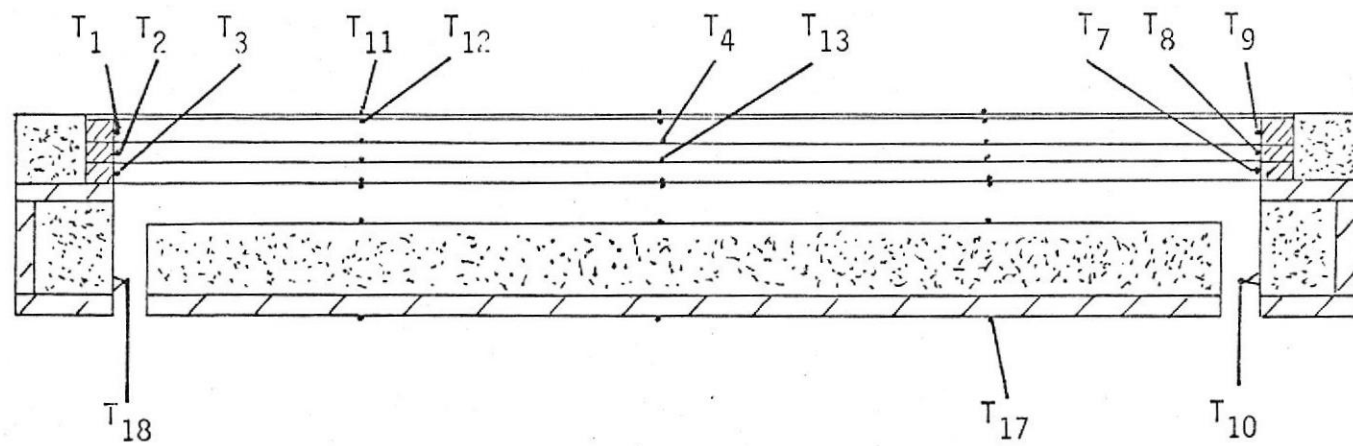


FIGURA N° 27: UBICACION DE TERMOCUPLAS

styrofoam, una plancha de aluminio, teflón, plexiglass, cartón, etc. En la figura N° 28, se muestra el esquema de un equipo de laboratorio que se empleó para medir la emisividad de la pintura. Los resultados se resumen en el apéndice I.

Cabe señalar que la velocidad del aire en el ducto del colector, se la trato de medir con dos tubos de Pitot estáticos diferentes, en el uno se podía leer directamente en su escala el valor de la velocidad del aire pero debido a que el rango de trabajo estaba entre los valores mínimos que se pueden leer en dicho instrumento, se usó el otro en cuya escala inclinada se pueden tener tres posiciones de sensibilidad del aparato, pudiendo realizar mediciones en las tres escalas, las cuales se las compara y se obtiene un valor promedio. Resultados de estas mediciones se encuentran en el Apéndice II.

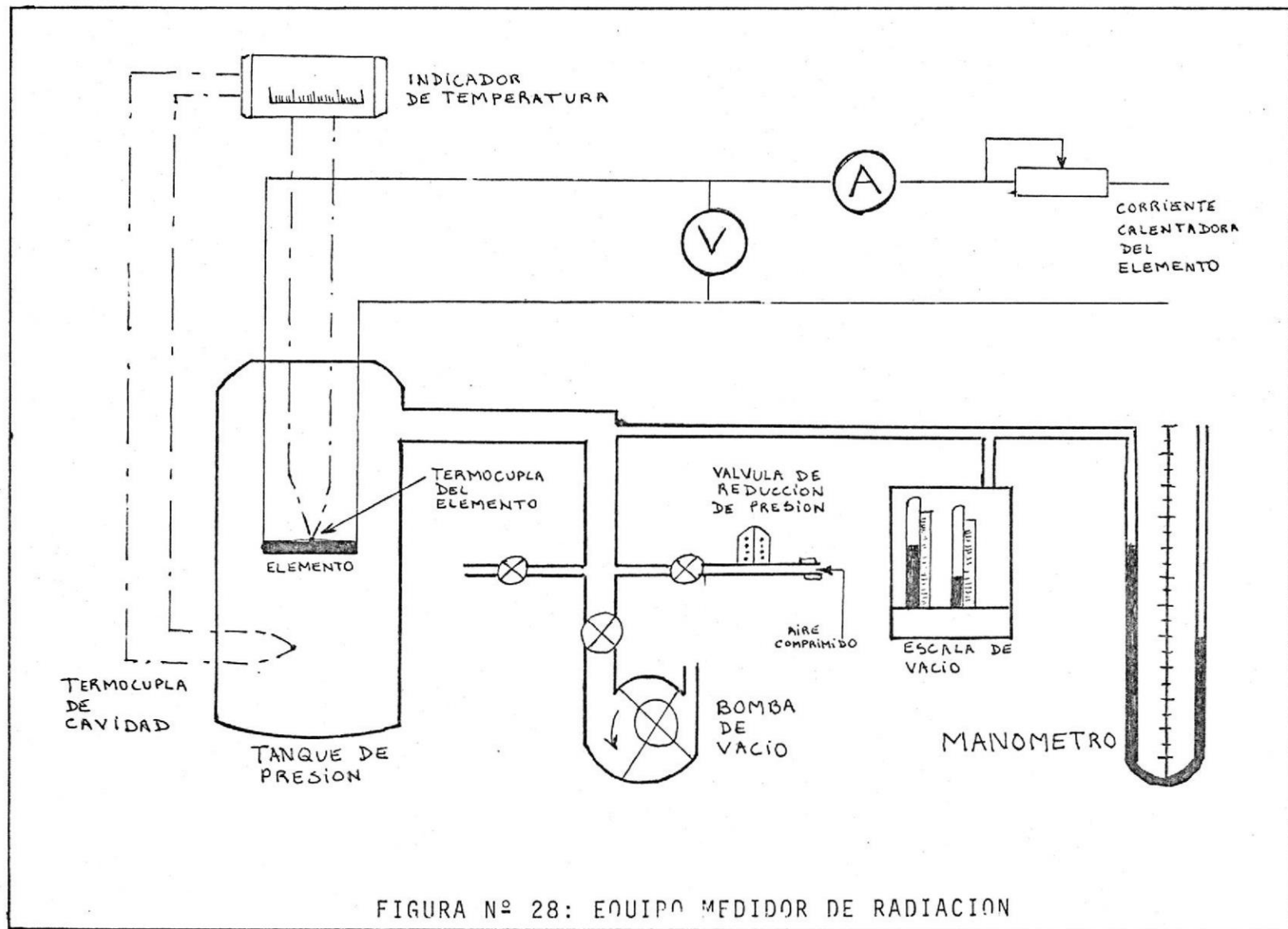


FIGURA N° 28: EQUIPO MEDIDOR DE RADIACION

En la Tabla N° 13, se encontrarán las características de los equipos sensores empleados en la toma de datos necesarios, en los diferentes cálculos a realizarse para la obtención de la eficiencia del colector. Así mismo se encontrará fotografías de los mismos. (ver figuras N°s. 29 y 30).

#### 4.2.1. Explicación del funcionamiento:

El sistema de calentamiento solar se basa en el principio de que, todo cuerpo expuesto al sol se calienta, por la transformación de la energía radiante recibida, en energía calorífica, la energía así creada es transferida al portador de calor. Es decir funciona como un intercambiador de calor entre una fuente radiante y un fluido de trabajo.

En nuestro caso, la superficie negra del colector <sup>absorbida</sup> capta el calor solar y lo transmite al aire <sup>que circula en el</sup> a través del ducto formado por la superficie absorbedora y el aislamiento del fondo saliendo del colector por ductos y conexiones. Las cubiertas evitan que el calor se escape, ha-

TABLA N° 13

EQUIPO SENSOR	MEDICION	ESPECIFICACIONES
TERMOMETRO DIGITAL	TEMPERATURAS	MARCA: OMEGA MODELO: 2176 A LECTURA: °F y °C TERMOCUPLAS: TIPO T RESPUESTA: MENOR QUE 2,5 SEG. RANGO DE LECTURA: -99,8 a 752°F ERROR MAXIMO: 0,2 °F. RAZON DE LECTURAS: 2,5/seg. FUENTE: 110 voltios.
VENTILADOR		MARCA: WOODS MODELO: TD 49 TIPO DE FLUJO: AXIAL DIAMETRO: 9,5" LONGITUD: 8,6" MOTOR: 110 VOLTS. 1 HP 50 HZ 1,5 amp. 2.700 RPM.
MEDIDOR DE FLUJO PITOT ESTATICO	VELOCIDAD DE AIRE	MARCA: DWYER MODELO: N° 400
PITOT ESTATICO	VELOCIDAD DE AIRE	MARCA: AD (ESCALA INCLINADA)
EQUIPO DE RADIACION	EMISIVIDAD	MODELO: TE 85/4289 MOTOR: 110 volt 1 HP

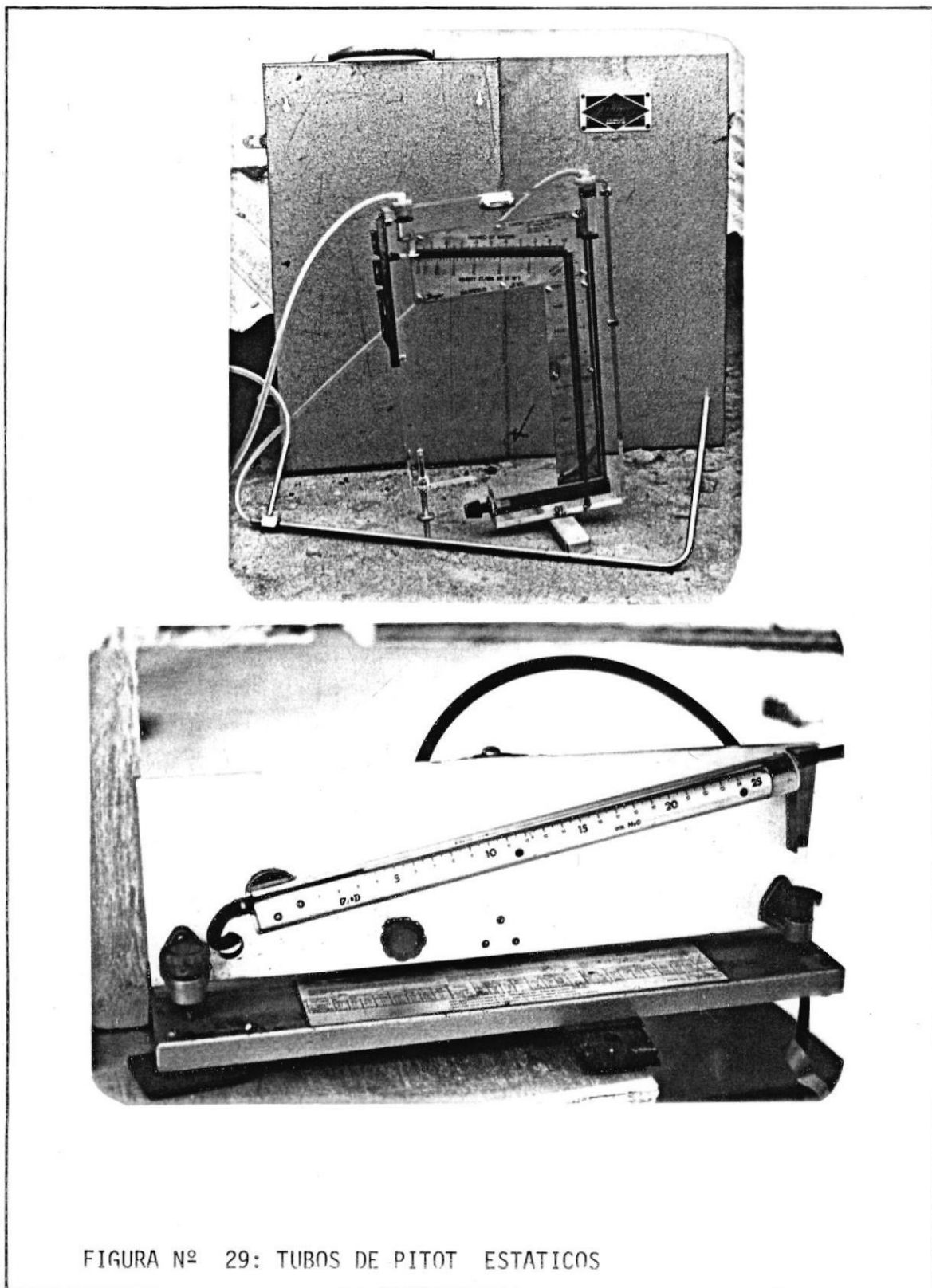


FIGURA Nº 29: TUBOS DE PITOT ESTATICOS

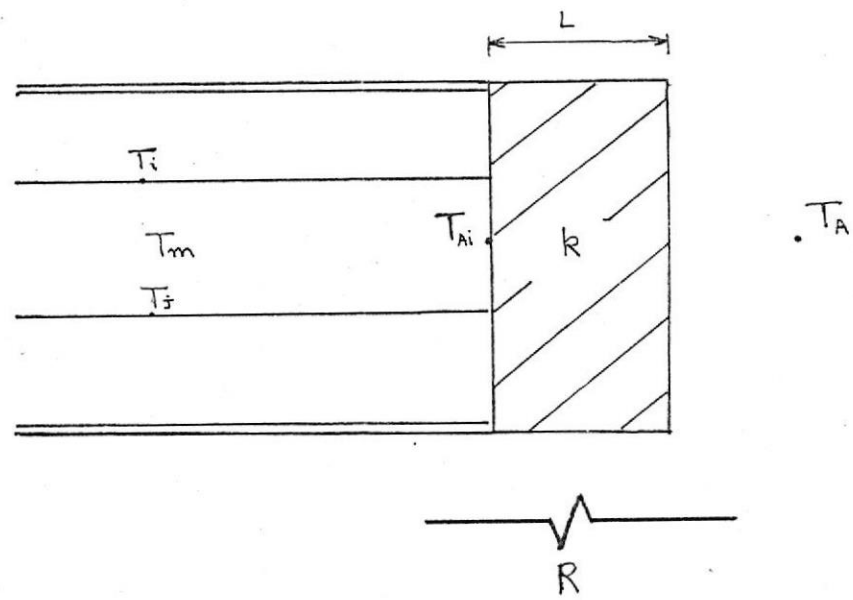


FIGURA N° 17: PERDIDAS POR LOS LATERALES

al fluído de trabajo lo podemos evaluar de la fórmula (26).

Es importante recalcar que para simplificación del problema se han despreciado los efectos de las esquinas en las diferentes ecuaciones.

### 3.3. COBERTURAS DEL COLECTOR

#### 3.3.1. Propiedades y selección de los materiales

Entre los materiales manufacturados especialmente para uso en aplicaciones solares, evaluaremos sus propiedades para un conocimiento mejor de estos.

Las propiedades de los materiales para coberturas, podrían ser divididas en primarias y secundarias.

- Las primarias son aquellas consideradas como críticas en la evaluación de la perfomancia del colector, así tenemos: la transmitancia, la estabilidad dimensional, propiedades de tensión y resistencia al impacto, etc.
- Las secundarias son todas aquellas relacionadas con la

eficiencia del material de una cubierta pero son menos críticas con la perfomancia general del colector, en tre estas tenemos: la transmitancia en la longitud de onda larga, resistencia a la abrasión, etc.

La capacidad del material de mantenerse estable o su durabilidad, está relacionada con su habilidad para re sistir la degradación de sus propiedades por su exposi ción ambiental.

Las propiedades de los materiales son alteradas por constituyentes menores como son el contenido de óxido de hierro, estabilización, etc., o también debido a la técnica de su proceso de manufactura. En general, la propiedad más importante de un material de cubierta es su transmisión de la radiación solar, la cual depende de:

- Longitud de onda de la radiación
- Composición química del material
- Espesor del mismo
- Angulo de incidencia de la radiación

Es importante que el material sea altamente transparente a las longitudes de onda de la luz solar incidente; y es más conveniente si este es ópaco a las longitudes de onda larga térmica, que son re-irradiadas por la placa absorbadora. Un material de cubierta ideal debería tener las siguientes características:

- Alta Transmitancia para la radiación solar incidente ( $\tau = 1$ )
- Baja transmitancia para la radiación térmica, ( $\tau_T \approx 0$ ).
- Baja absortividad ( $\alpha \approx 0$ ), para la radiación solar.
- Gran durabilidad (que no le afecte las condiciones ambientales).
- Bajo costo.

Además debe tener ciertas propiedades mecánicas, como son:

- Baja conductividad ( $k \approx 0$ )
- Alta resistencia al impacto
- Alta resistencia térmica

- Bajo peso
- Excelente resistencia a los agentes químicos
- Dificilmente combustionable
- Facil de cortar
- Manejable.

Diferentes tipos de materiales son usados en las cubiertas del colector, estos varían considerablemente en su forma de transmitir la luz solar y atrapar calor, para que el material sea realmente efectivo tiene que ser por lo menos un 88 a 92 % translucido. En la práctica hay solamente una corta lista de alternativas, proporcionada por la National Solar Heating and Cooling, que cumplen esta condición. En esta lista podemos ver que Compañías Norteamericanas como la Du-Pont, Cy/Ro, 3 M, AFG, etc., han desarrollado nuevos plásticos de los que se espera - un mayor rendimiento bajo continuas exposiciones a la luz solar.

Los materiales utilizados en las coberturas de un colector solar, los podemos clasificar en cuatro grupos:

## 1. El vidrio:

Es el más antiguo material transparente hecho por el hombre, el cual es usado ampliamente en aplicaciones solares. Este es una combinación de sílica y cal a la que se le agrega soda o potasa. Es estable a altas temperaturas de incidencia solar, bastante resistente a ser rayado y a las inclemencias del medio ambiente circundante su desventaja es que tiene que ser manipulado con mucho cuidado, es quebradizo y resulta relativamente más pesado.

Este puede ser química o térmicamente temperado, lo cual depende de su espesor, para incrementar su resistencia a la tensión. Este tratamiento le permite ser más estable y resistente a las rigurosidades del clima como viento, lluvia, granizo, etc.

El vidrio es resistente a muchos alcalinos y químicos, puede ser fabricado por tres básicos procesos, como son el laminado, moldeado y pulido. Algunos tipos de vidrio son más apropiados que otros, existen en diferentes espesores y resistencias.

Los de alta calidad tienen un bajo contenido de hierro, lo cual significa que refleja la menor cantidad de luz, normalmente pueden absorber un 3 a 4 % de la radiación que pasa a través de estos, mientras que los de baja calidad podrían absorber un 6 % o más.

Para juzgar la calidad del vidrio hay que mirarlo - por su borde, el mejor vidrio aparece claro como el agua o de un matiz ligeramente azulado, mientras que el de inferior calidad tienen un tinte verdoso, siendo los últimos más baratos pero menos convenientes.

Algunos métodos son usados para alcanzar el incremento de la eficiencia del vidrio, uno es reducir la energía reflejada desde éste, otro es el uso de vidrio de bajo contenido de hierro, o menor espesor, o también con una combinación de estos, o sea por ejemplo usar un vidrio de espesor mínimo con una capa antireflectiva.

La tabla N° 5 resume las propiedades de dos tipos de vidrios.

TABLA N° 5

PROPIEDAD	VIDRIO ORDINARIO (COMUN DE VENTANA)	VIDRIO CLARO BLANCO - AGUA
PORCENTAJE DE OXIDO DE HIERRO ( $Fe_2O_3$ )	0,12 (alto)	0,01 (bajo)
INDICE DE REFRACCION (n)	1,52	1,51
COEFICIENTE DE EXTINCION (K)	0,194 pulg <sup>-1</sup>	0,174 pulg. <sup>-1</sup>
TRANSMITANCIA ( $\tau$ )	79 a 88 %	91,2 a 91,6 %
ESPESOR (PULG)	0,25 a 0,125	0,2 a 0,125
PERDIDAS POR REFLEXION	8,2 a 8 %	8 %
PERDIDAS POR ABSORCION	13 a 8 %	bajo 1 %
k(BTU-pulg/pie <sup>2</sup> -hr- °F)	65 a 100	65 a 100
TEMPERATURA MAXIMA (°F)	400	400
AÑOS DE VIDA APROXIMADA	500	500

Vidrios especiales, que se los pueden emplear como cubiertas exteriores o interiores en aplicaciones pasivas o activas de la energía solar, son de bajo porcentaje de hierro y completamente temperados lo que implica un bajo coeficiente de expansión. Los fabrican de tres tipos diferenciándose por su contenido de hierro, estos son los que se muestran en la tabla N° 6.

## 2. Plásticos Duros:

Estos son en buena parte más claros que el vidrio y son más fáciles de cortar y manipular. Entre los más conocidos de este tipo, tenemos el Plexiglass, el cual es un acrílico, así también los vinyles.

Son relativamente baratos pero pueden ser usados solo en coberturas exteriores y cuando hay una capa de material diferente debajo de ellas. Esto porque si se calientan podrían doblarse o pandear. Esto no ocurre en frío, ya que se mantiene rígidos. Dentro de este grupo encontramos los policarbonatos como el Lexan, acrílicos como el Lucite, etc. (ver Tabla N° 7).

TABLA Nº 6

PRODUCTO	ESPEJOR NOMINAL	MEDIDA	PESO (LB / PIE <sup>2</sup> )	TEMPERATURA MAXIMA (°F)	$\tau$ (%)
SUNADEx	1/8"	34" x 76"	1,6	400	91,6
0,01%	5/32"	34" x 76"			
		34" x 96"	2	400	91,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		34" x 76"			
	3/16"	34" x 96"			
		46" x 76"	2,4	400	91,3
		46" x 96"			
SOLATEX	1/8"		1,6	400	90,1
0,04%	5/32"		2	400	89,5
	3/16"		2,4	400	89,1
CLEARLITE	1/18"		1,6	400	84
0,12 %	8/18"		2,4	400	82

TABLA N° 7

PROPIEDADES DE LOS PLASTICOS DUROS

PROPIEDAD	ACRILITE	EXOLITE	LUCITE	PLEXIGLASS	LEXAN	TUFFAK-A
	POLIMETAL METACRILADO (ACRILICO)			POLICARBONATOS		
$\tau$ (%)	89	83	89-82	89-87	87-84	77
n (índice de Ref).				1,49-1,56	1,6	
Espesor(pulg)	0,625	0,625	0,492	0,125-0,25	0,125 - 0,25	0,125
Temperatura (°F) máx.		160		180	190	194
años de vida		20		15	15	5
k(BTU/hr-pie-°F)				0,10833		

Muchos plásticos de estos no son mejores que el vidrio, ya que se destruyen en un tiempo relativamente corto, debido a la incidencia de los rayos ultravioletas sobre ellos, pero existen plásticos con características especiales superiores que los hace ser más convenientes en su empleo, comparados con el vidrio.

### 3. Películas o filmes:

La disponibilidad de delgadas láminas resistentes de plásticos, con propiedades particulares es importante en el desarrollo del uso de la energía solar. Dentro de esta categoría encontramos los siguientes materiales, cuyas más importantes propiedades se detallan en la tabla N° 8.

Las películas se las usa generalmente en cubiertas interiores. El teflón que es un fluoropolimero está incluido en este grupo, se encuentra en una única y muy pequeña clase de polimeros orgánicos que no tienen hidrógeno, el flúoride reemplaza este elemento, sus propiedades se indican en la tabla N° 9.

TABLA N° 8

PROPIEDAD	POLIVINIL FLUORIDE TEDLAL	POLIESTER POLIETILE NO MYLAR.	POLIETILENO MONSANTO	SILICON TRATADO	POLIAMIDA KAPTON
$\tau$ (%)	90	85	85	90	80
ESPESOR (PULGS.)	0,004	0,001- 0,005	0,004 - 0,0006	0,008	
$K$ (PULG <sup>-1</sup> )	3,55	5,2	4,19		
$n$	1,45	1,64	1,5		
$\rho$		0,12			
$\alpha$		0,03			
TEMP. MAX(°F)	300	250	120	500	
AÑOS DE VIDA	10	2	3	15	

#### 4. Poliesteres reforzados:

Muchos de estos son conocidos en el comercio como "fiberglass", en la práctica a la fibra de vidrio se le agregan reforzadores, de tal forma que las láminas de espesores mínimos adquieren rigidez.

Este tipo de materiales son tan buenos como el vidrio y en algunos casos mejores, algunas de sus propiedades son semejantes. No se parten o rompen en condiciones normales, pueden ser cortados con serruchos de regular potencia, taladrados y clavados. Entre los más conocidos tenemos los que se citan en la tabla N° 10.

En lo que respecta a su selección para emplearlos en colectores, el uso de materiales con mejores propiedades, tiende a limitarse por su costo, ya que resultan estos plásticos especiales mucho más caros comparado - con vidrios ordinarios.

La facilidad de trabajarlos y su maniabilidad es una gran ventaja de los plásticos duros, los cuales vienen en planchas de medidas normalizadas, los de menor espe

TABLA N° 9  
PROPIEDADES DEL TEFLON

$\tau$ (%)	ESPESOR (PULG)	K (PULG <sup>-1</sup> )	TEMP MAX (°F)	AÑOS VIDA	n
96	0,001-0,002	3,396	400	15-20	1,34

TABLA N° 10

	POLIESTER ACRILICO LAMINADO FLEXIGARD	FIBERGLASS PREMIUN-II SUN-LITE	FIBERGLASS LASCALITE (KALWALL)
$\tau$ (%)	89-91	85-90	81
ESPESOR(PULG)	0,011-0,007	0,04-0,025	0,04
TEMP. MAX. (°F)	275	225	160
n		1,58	
AÑOS DE VIDA	10	20	15

son vienen en rollos de longitud variable.

Rompimiento, ruptura, rajamiento, estiramiento, descoloramiento, etc., son algunos de los daños más comunes en los materiales de coberturas, siendo la causa que generalmente los produce; esfuerzos térmicos, impactos accidentales o condiciones ambientales rigurosas.

La elección del material correcto para una cubierta es crucial para el éxito en el funcionamiento del sistema de calentamiento solar. Está basada principalmente en las características de transmitancia de la radiación solar, ciclo de vida total, absorptancia y reflectancia del material.

De estos tres factores a considerar la transmitancia es la más importante propiedad de todas, esta a su vez depende directamente del índice de refracción del material ( $n$ ), conociendo estos valores sabremos más o menos como se comportará o cumplirá con su función.

Los vidrios son opacos en la región de la infrarroja, algunos plásticos son altamente transparentes, permitiendo

que la radiación térmica escape, sin absorberla.

Este es uno de los motivos por lo que la cubierta exterior tiene que ser un material de un espesor superior a los de la cubierta interior, con propiedades iguales o mejores que las del vidrio, para atrapar el calor.

Según se diseñe el sistema en el estudio de los materialiales a emplearse, es importante conocer su tiempo de vida antes de que se deterioren.

El vidrio es el más durable de todos, en condiciones normales sin considerar accidentes repentinos, los plástics tienden a pandear o amarillarse por la acción de los rayos ultravioletas cuando han sido expuestos durante cierto período de años.

Los plásticos más claros son los más sensitivos a la degradación ultravioleta y pocos pueden tolerar temperaturas superiores a 300°F sin deteriorarse. El precio de ellos va de acuerdo con sus propiedades.

Por otro lado, los plásticos son fuertes, no se rompen fácilmente como el vidrio y son fáciles de transportar los y trabajarlos.

Por su alto contenido de hierro el vidrio ordinario de ventana nunca debería ser usado en un colector solar.

Nosotros en la práctica estamos limitados por los productos de los que podamos abastecernos, no existen en el mercado materiales como para hablar de alguna selección.

Mediante el detallado trabajo de contactar con diferentes instituciones en los Estados Unidos, se pudo conseguir la lista que adjuntamos en la página siguiente, *acerca de los fabricantes de materiales de cubiertas*

Para usarlo en las cubiertas interiores, disponemos de Teflón de 0,001" de espesor, el cual ha sido importado desde los Estados Unidos. Algunas propiedades del Teflón las encontramos en las figuras N°18 y 19. *y Tabla N°2*

Como material de la cubierta exterior tenemos un acrílico, el Plexiglass.

TIPO DE CUBIERTA	NOMBRE DE FABRICA	MANUFACTURA POR
FIBRA DE VIDRIO	SUN-LITE PREMIUM II	KALWALL CORP. BOX 237 MANCHESTER, NH
ACRILICO	SOP	CY/RO IND. 897 Rt. 46 CLIFTON, NO.
POLICARBONATO	LEXAN	GENERAL ELECTRIC BOX 855 CRANFORD, NJ
POLIESTER	3M FLEXIGARD	3M COMP. 3M CENTER 223-2-02
FLUOROCARBON	TEFLON	CHEMPLAST 150 DEY ROED WAYNE, NJ
POLICARBONATO	TUFFAK TWIN-WALL	ROHM & HAAS CO. INDEPENDENCE HALL PHILADELPHIA, PA.
POLIVINIL-FLOURIDE	TEDLAR	DU PONT CO. CSC-CHESTNUT RUN WILMINGTON, DE
VIDRIO	SUNADEx CLEARLITE	AFG IND. BOX 929 KINGSPORT, TN.

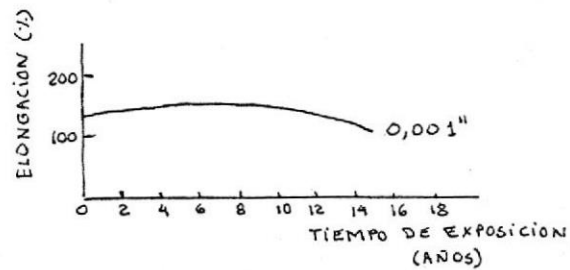
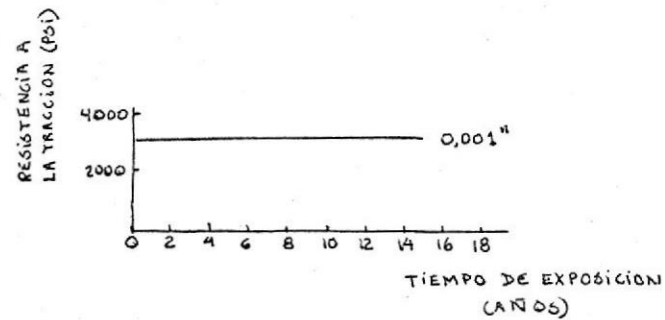
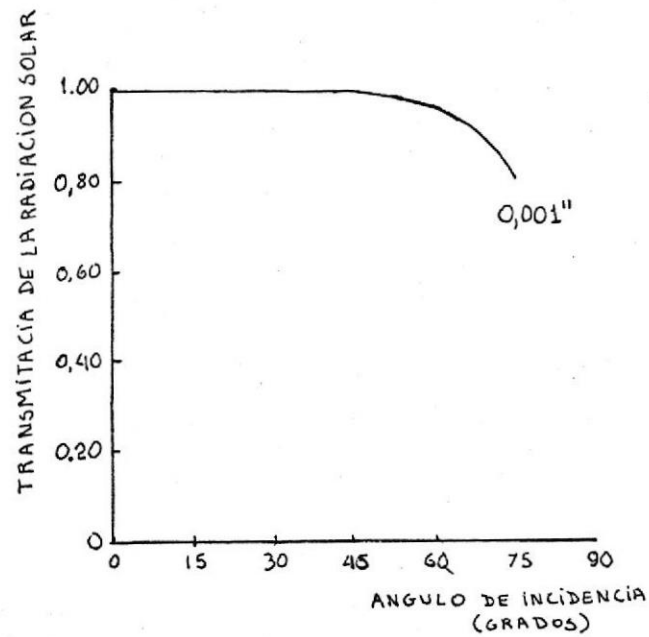


FIGURA Nº 18: PROPIEDADES DEL TEFLON (29)

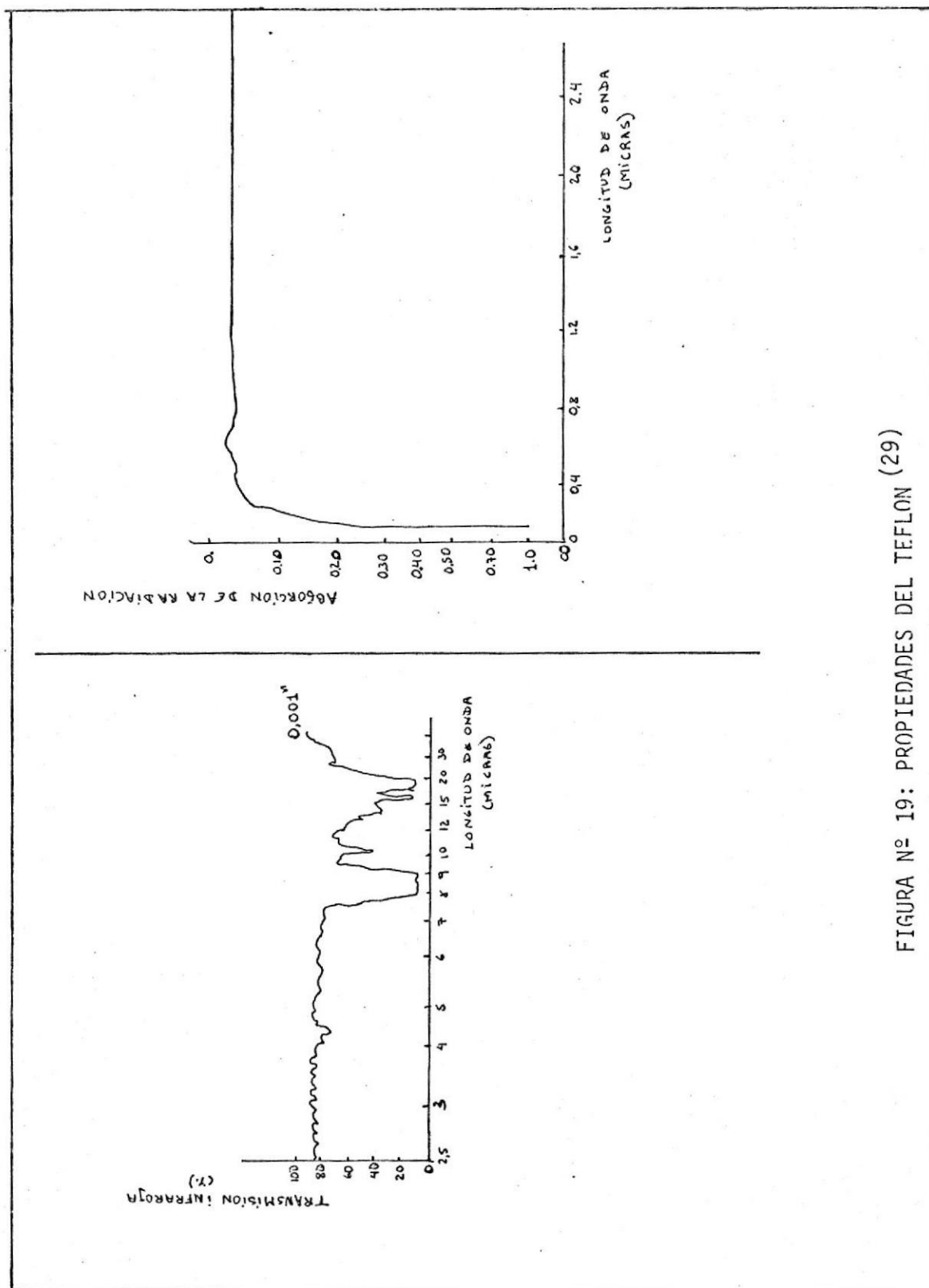


FIGURA N° 19: PROPIEDADES DEL TEFLON (29)

Del análisis de las diferentes figuras, que muestran las propiedades del Teflon, podemos decir que posee una alta transmitancia de la luz, muy transparente, transmite más luz ultravioleta, visible e infrarroja que cualquier vidrio, es altamente flexible, responde a la expansión térmica, es de interés su bajo índice de refracción, bajo peso, durabilidad y su poco espesor.

### 3.3.2. Determinación del arreglo más adecuado

En la determinación del arreglo de las cubiertas, hay que analizar puntos de vista, los que influirán en el resultado final; estos son:

- aspecto económico
- durabilidad del material
- eficiencia
- transmisión del sistema

El valor más alto de la transmisividad posible de obtener en un arreglo de ciertos materiales de cubiertas será el elegido, aquí hay que tener en cuenta que pelícu-

Las de mayor espesor transmiten menos, así también la absorptividad y reflectividad deben ser mínimas.

En términos generales los plásticos son más transparentes que el vidrio. Algunos valores de la transmisión solar total obtenida en paneles experimentales de 1 a 3 capas, para diferentes ángulos de incidencia, se dan en la tabla Nº 11.

La capa externa es usualmente de un material rígido, la cual va sujeta al tope del armazón del colector, sujetándola con una especie de empaquetadura que impida los escapes de aire y a la vez permite en algo la expansión de la cubierta por efectos del calor.

Esta cubierta superior estará sometida a las inclemencias del clima, como granizo, lluvia, etc., además de cualquier otros posibles efectos que puedan influir en la misma, como piedras o golpes accidentales, por esta razón tiene que presentar ciertas características de dureza.

Esta cubierta es generalmente de vidrio, plásticos du-

TABLA N° 11

VALORES DE TRANSMISION SOLAR TOTAL OBTENIDA EN PANALES EX  
PERIMENTALES DE 1 a 3 CAPAS

N° DE CAPAS	MATERIAL	ESPEJOR PULGS.	0°	15°	30°	45°
1	TEDLAR	0,003	0,947	0,947	0,947	0,934
2	TEDLAR	0,003	0,902	0,902	0,902	0,89
3	TEDLAR	0,03	0,857	0,857	0,857	0,845
1	MYLAR	0,003	0,868	0,868	0,873	0,857
2	MYLAR	0,003	0,806	0,806	0,814	0,782
3	MYLAR	0,003	0,761	0,761	0,765	0,747
1	TEFLON	0,001	0,965	0,977	0,977	0,971
1	TEFLON	0,002	0,969	0,977	0,977	0,971
1	TEFLON	0,005	0,966	0,972	0,972	0,967

ros o reforzados especiales para esta aplicación. El vi  
drio es más durable pero está sujeto a daños por impac-  
to, los cuales se podrían evitar colocando una rejilla,  
pero esta disminuiría altamente la transmisividad del  
sistema.

Los vidrios tienen la desventaja que deben ser más grue  
sos que los plásticos, su trabajado es más complicado,  
no así los plásticos los cuales se los puede cortar, ta  
ladrar, etc., con más facilidad.

El calor perjudica más a los plásticos que al vidrio,  
ya que sus propiedades se deterioran con más facilidad.

Al colocar la cubierta exterior, esta protege a las in  
teriores las cuales no estarán ya sujetas a las mismas  
condiciones y permite que estas sean de espesores meno  
res lo cual aumenta la transmisividad del sistema. Ade  
más las cubiertas interiores quedan protegidas de los  
efectos de la radiación ultravioleta, la que -  
no atravieza en un buen porcentaje la capa ex  
terior, lo que alarga la vida de las -  
mismas.

Por esta razón los materiales de las cubiertas interiores poseen una buena transmisividad, absorbiendo ligeramente la luz, el calor casi no lo retienen debido a su infimo espesor.

El teflón es un excelente material para coberturas interiores, existiendo sólo en pequeños espesores, lo cual impide su utilización en cubiertas exteriores.

En resumen diremos que como cubierta exterior es más conveniente el uso de un plástico duro, si consideramos su resistencia al impacto, facilidad de trabajado y propiedades ópticas y el uso del vidrio si tomamos en consideración su tiempo de vida, opacidad a los rayos ultravioleta y costo.

Para cubierta interior el uso de plásticos especiales fabricados para aplicaciones solares es lo más conveniente, sus ínfimos espesores son los más importantes a considerar , además de que son capaces de resistir altas temperaturas de trabajo.

### 3.4. ESTUDIO DEL SISTEMA EN GENERAL

Un colector solar es simplemente un tipo especial de intercambiador de calor, por medio de su eficiencia total de transmisión y de la intensidad de calor en el colector, es posible determinar su rendimiento bajo diferentes condiciones de uso.

La performance del colector solar está determinada por la obtención de valores de eficiencia instantánea para una larga combinación de valores de la radiación incidente, temperatura ambiental y temperatura del fluido.

Estos requerimientos experimentalmente miden la razón de la radiación solar incidente al absorbedor, así como también la razón de energía agregada al fluido de transferencia de calor a medida que este circula en el colector.

La performance de un sistema de calentamiento solar debe a menudo ser teóricamente estimada para evaluar un nuevo diseño, o predecir cómo el diseño ensayado en una localización actuaría en un clima diferente o bajo condiciones distintas de carga.

La perfomancia del colector se la puede calcular por varios métodos, así:

- a. Empleando formulación de modelos numéricos, mediante el uso de ecuaciones que gobiernan el sistema, sintetizando un riguroso análisis que en la práctica no se lleva a cabo.
- b. Determinación práctica, experimental, utilizando un simulador de sistema de calentamiento solar, en el cual se - varían las condiciones y mediante la tabulación y análisis de datos y resultados obtener la perfomancia.
- c. Mediante métodos empíricos, los cuales consisten en un - simple y directo procedimiento para calcular la fracción de carga promedio en un clima particular sobre períodos no muy largos. Este método se basa en resultados experimentales de la evaluación de la perfomancia de muchos trabajos hechos bajo diferentes condiciones y que se los ha estudiado estadísticamente.

En general el proceso térmico que ocurre en el colector lo representamos en la figura N° 20 . De esta podemos observar

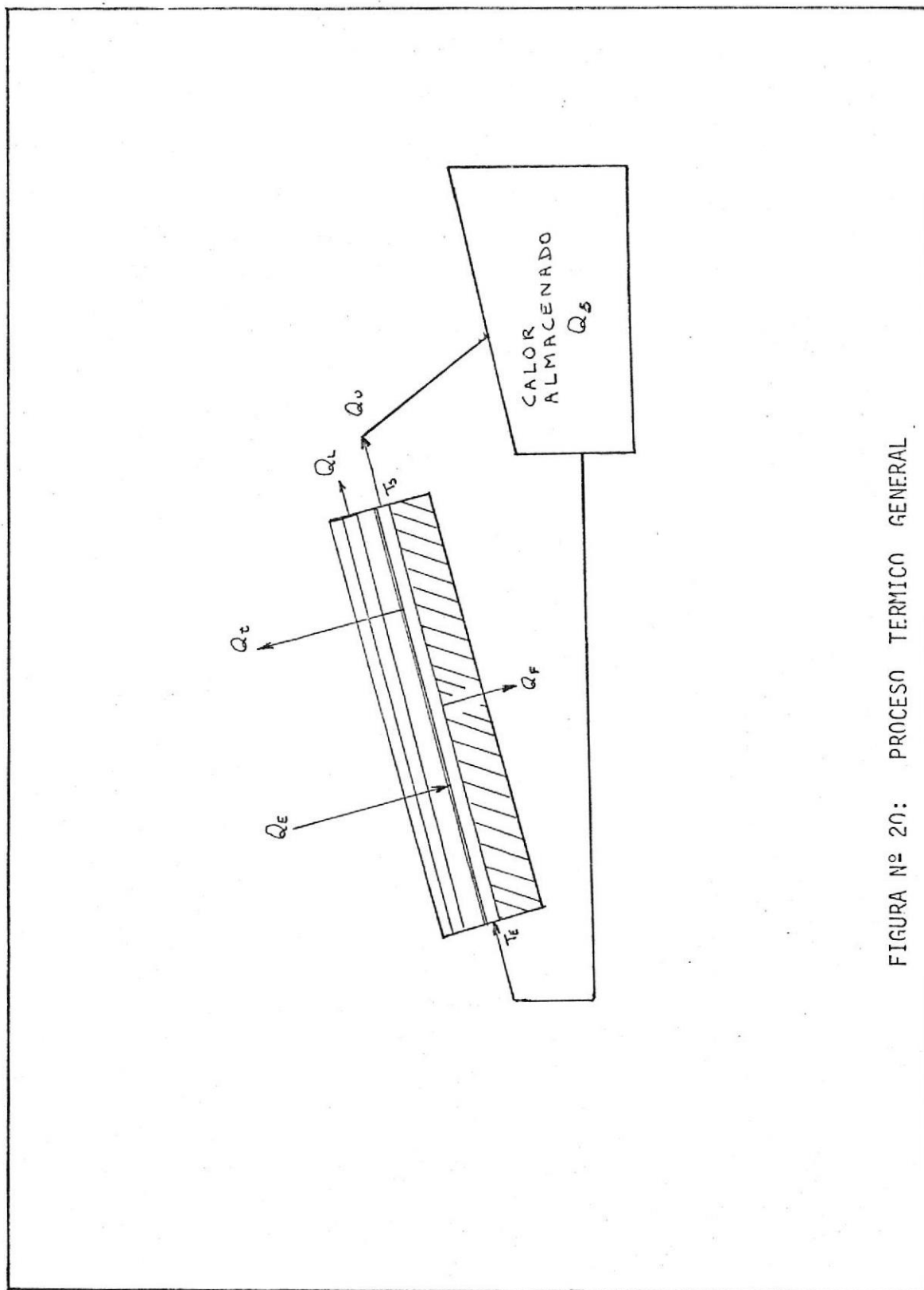


FIGURA N° 20: PROCESO TERMICO GENERAL

que el balance calorífico de la placa absorbadora puede ser expresada:

$$Q_e = Q_u + Q_t + Q_f + Q_l + Q_s \quad (40)$$

Para nuestro caso se cumple que:

$$Q_e = Q_u + Q_t + Q_f + Q_l \quad (41)$$

Esto es:

$$Q_s \text{ se deprecia } (\approx 0)$$

Por analogía con las máquinas térmicas se usa la noción del rendimiento y la ecuación básica que define la perfomancia - del colector, ampliamente conocida como la ecuación de Hottel Whillier-Bliss (1955) es:

$$\eta = \frac{\text{energía útil recogida por el captador}}{\text{energía solar incidente en el captador}} = \frac{Q_u}{Q_e} \quad (42)$$

Esto es, la perfomancia del colector es la medida de la eficien

cia; definida como la razón de energía útil ganada en el período de tiempo de incidencia de la energía solar sobre el mismo período de tiempo.

Para una mayor comprensión de la discusión siguiente es necesario distinguir la perfomancia instantánea del colector, la cual es en un tiempo dado en función de condiciones meteorológicas y operacionales que en ese tiempo se dan y de la perfomancia en largo término. Esta eficiencia instantánea recogida se define más sencillamente como el calor útil por radiación recibida.

Para el diseño de espaciamiento de sistemas de calentamiento, dado que la temperatura de entrada al colector es más fácil de medir que la temperatura de la placa absorbadora o que la del fluido mismo, Duffie y Beckman (7), definieron el factor de calor removido ( $F_r$ ), antes indicado por Bliss, para flujo uniforme como:

$$F_r = \frac{\text{cantidad de calor útil realmente extraído}}{\text{cantidad de calor útil recogido si el absorbador estuviera a la temperatura } T_e}$$

El uso de este factor es uno de los medios más aceptados para describir la performance de un colector solar, que en otras palabras sería el calor actual útil transferido a partir del colector dividido por la transferencia de calor que tiene lugar si la superficie absorbidora fuera mantenida a la temperatura de entrada del fluido.

Con el fin de emplear la temperatura del fluido en los cálculos se definió el factor de eficiencia  $F'$ . Con este se consigue información detallada de la performance del colector y siendo un parámetro constructivo del colector depende de la geometría y materiales del colector, es definido por:

$$F' = \frac{\text{cantidad de calor realmente extraída}}{\text{cantidad de calor recogida con un absorbedor isoterma a la temperatura } T_m}$$

Otro factor de utilidad en el intercambio de calor en los calentadores solares es el así llamado factor de flujo que se lo define como:

$$F'' = F_r / F'$$

Se emplea el término "utilizabilidad" para calcular

o describir la performance de un colector solar.

Este método se fundamenta en que la distribución mensual de la radiación diaria para un término largo es función única - de la razón del promedio diario de radiación solar sobre una superficie horizontal a la radiación extraterrestre.

La utilizabilidad ( $\emptyset$ ) es definida como la fracción de la radiación solar incidente que puede ser convertida en calor - útil por un colector teniendo  $F_r (\tau\alpha) = 1$  y operando en una diferencia fija de temperatura entre el aire exterior y la entrada del colector. Aunque se asume que el colector no tiene pérdidas ópticas y que tiene un  $F_r = 1$ , la utilizabilidad es siempre menor que 1, ya que el colector ha tenido - pérdidas por arriba, por abajo y en los laterales.

## CAPITULO IV

## 4. EXPERIMENTACION

## 4.1. MONTAJE DEL COLECTOR

## 4.1.1. Colocación:

La posición en la cual el colector va a ser colocado de pende de los siguientes factores:

- Localización geográfica del sitio
- Tipo del colector
- Aplicación del calor absorbido

Respecto a la localización geográfica, tiene que ver con la latitud en que estará ubicado el colector, condiciones climatológicas y tipo de terreno, el cual puede ser montañoso, desértico, selvático, etc. Estos van a determinar la disponibilidad de brillo solar que es muy importante en el diseño de un sistema de energía solar.

El tipo de colector se refiere al tamaño o capacidad de éste, su forma, etc., en si lo relacionado con sus ca racterísticas constructivas. Cada diseño tendrá su pro pia ubicación prediseñada, según la aplicación que va a tener el colector se lo sitúa considerando dos puntos diferentes en su funcionamiento que son:

- a. La demanda crítica: en el cual el colector deberá es tar en la capacidad de poder producir la demanda requerida, durante el período que esta de- manda dure.
- b. El de máxima salida: es decir en el cual el colector debe rendir su capacidad máxima en el tiempo dado.

En si el colector estará bien colocado si:

- 1. esta bien orientado
- 2. tiene la inclinación correcta
- 3. esta libre de cualquier interferencia de la inci- dencia de la luz solar sobre él.

Los colectores solares al estar bien orientados, podrán

captar el máximo de la energía solar posible durante el día. Sabemos que el sol sale por el este y se oculta por el oeste, luego si orientamos su largo en dirección de este a oeste podrá captar el máximo de rayos solares durante el tiempo horas sol que duren estos. Es más conveniente, cuando se instalan varios colectores en serie, ubicarlos como se muestra en la figura N° 21(b), ya que así aprovechan por igual la energía que incide sobre ellos.

La inclinación del colector se refiere al ángulo correcto en que la superficie del colector atrapa la mayor cantidad de rayos solares por unidad de área. La determinación de este ángulo de inclinación, va a depender también de la latitud y <sup>aplicación</sup> función del sistema de energía solar. Idealmente un colector solar de placa plana debería girar para seguir al sol en su trayectoria de este al oeste en el cielo, durante el día y también debería ser capaz de inclinarse para seguir los cambios de elevación durante el año. Pero las herramientas, maquinaria y controles que permitirían esto son costosos, complicados y el aumento en la colección de calor que el uso de estos aparatos implicaría, no justifica -

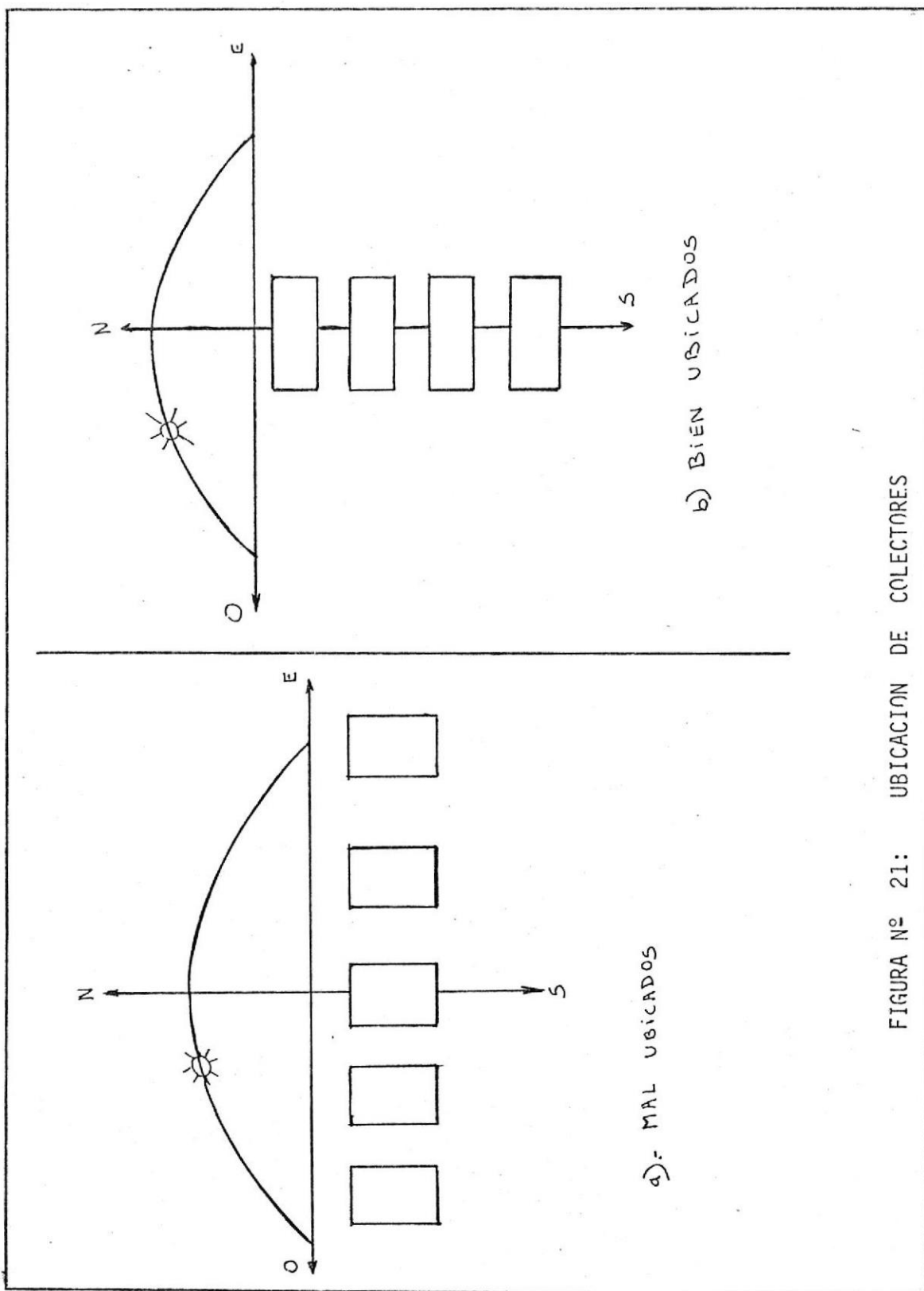


FIGURA Nº 21: UBICACION DE COLECTORES

el empleo de los mismos en los colectores de placa plana.

Para el caso de colectores baratos, no muy sofisticados, simplemente uno puede evitar grandes cálculos aplicando alguna recomendación debida a resultados de experiencias anteriores, generalmente se cumple que el mayor ángulo de inclinación del colector es igual a la latitud del lugar. En instalaciones a gran escala, más complejas, se requiere una determinación más exacta del ángulo óptimo de inclinación. Para Guayaquil las posiciones ideales de un colector, para la trayectoria del sol en el año están en la Tabla N° 12 en la que se aplica las ecuaciones N°2 y 4.

Es conveniente que en zonas de alta precipitación pluviométrica o durante temporadas lluviosas, inclinar el colector aunque sea a un ángulo mínimo para evitar que el agua se acumule sobre la superficie del colector, la pequeña inclinación permitiría el drenaje del agua llevándose consigo polvo y partículas propias del ambiente. En verano es cuando el sol está en su posición más alta y es deseable una mayor inclinación. Para una explotación anual se pueden dar dos inclinaciones fijas al colector, una para el invierno y otra para el

TABLA N° 12

MES	DIA	N	D (GRADOS)	B <sub>opt</sub> (GRADOS)	INCLINADO HACIA
ENE.	1	1	(-) 23,01	(-) 20,81	SUR
	8	8	22,3	20,10	
	15	15	21,27	19,07	
	22	22	19,93	17,73	
FEB	1	32	(-) 17,52	(-) 15,32	SUR
	8	39	15,52	13,32	
	15	46	13,24	11,09	
	22	53	10,87	8,67	
MAR	1	60	(-) 8,29	(-) 6,09	SUR
	8	67	5,60	3,40	
	15	74	2,82	0,62	
	22	81	0	(+) 2,2	
ABR.	1	91	(+) 4,02	(+) 6,22	NORTE
	8	98	6,76	8,96	
	15	105	9,41	11,61	
	22	112	11,93	14,13	
MAY.	1	121	(+) 14,90	(+) 17,10	NORTE
	8	128	16,97	19,17	
	15	135	18,79	20,99	
	22	142	20,34	22,54	
JUN	1	152	(+) 22,04	(+) 24,24	NORTE
	8	159	22,84	25,04	
	15	166	23,37	25,51	
	22	173	23,45	25,65	
JUL	1	182	(+) 23,12	(+) 25,32	NORTE
	8	189	22,48	24,68	
	15	196	21,52	23,72	
	22	203	20,24	22,44	
AGOS.	1	213	(+) 17,91	(+) 20,11	NORTE
	8	220	15,96	18,16	
	15	227	13,78	15,98	
	22	234	11,40	13,60	

continuación....

MES	DIA	N	A (GRADOS)	B <sub>pot</sub> (GRADOS)	INCLINADO HACIA
SEP.	1	244	(+) 7,72	(+) 9,92	NORTE
	8	251	3,01	7,21	
	15	258	2,22	4,42	
	22	265	(-) 0,61	1,59	
OCT.	1	274	(-) 4,22	(-) 2,02	SUR
	8	281	6,96	4,76	
	15	288	9,60	7,40	
	22	295	12,10	9,90	
NOV.	1	305	(-)15,36	(-)13,16	SUR
	8	312	17,38	15,18	
	15	319	19,15	16,95	
	22	326	20,64	18,44	
DIC.	1	335	(-)22,11	(-)19,91	SUR
	8	342	22,89	20,69	
	15	349	23,34	21,14	
	22	356	23,44	21,24	

verano, de esta forma se conseguiría un mayor rendimiento del sistema.

Para elegir el lugar donde estará colocado el colector, - debe tomarse en cuenta los siguientes aspectos:

- Tipo de terreno
- Facilidad de acceso de la luz solar
- Dificultades en la instalación
- Area disponible para la instalación del sistema
- Leyes dentro del vecindario o comunidad

El sitio ideal para la instalación del sistema de calentamiento de aire solar, es la parte más alta de la vivienda, como lo es el techo o terraza, que es generalmente un sitio sólido y apartado libre de sombreado. En sí como primer objetivo, debe tenerse en cuenta - la recepción de la mayor cantidad de energía posible. Hay que evitar los obstáculos como chimeneas, escaleras, jardineras, etc., que pudieran en algún momento del día arrojar sombras sobre el colector. Hay que analizar - también la situación de la vivienda o lugar donde será colou

dado el colector. Por si existen edificios vecinos más altos, árboles, postes de luz, etc., que podrían sombrearlo, los colectores deben estar libres de cualquier sombra que pueda producirse en algún momento del día.

Cuando se monta un colector de placa plana sobre el techo hay que tener en cuenta la inclinación de éste, ver si el techo es capaz de resistir el peso del colector y las facilidades de sujeción al techo. Los colectores deben estar bien sujetos para resistir cargas de vientos. Así mismo, ductos, controles e instalaciones adicionales deben estar bien protegidas y sujetas.

#### 4.1.2. Instalación de aparatos medidores:

Construido el colector procedemos a la instalación de los diferentes equipos sensores, que nos servirían para la toma de datos. Estos aparatos serán colocados en lugares - de fácil acceso. Antes de realizar cada ensayo se debe preparar y revisar el equipo a ensayar.

Instalación de cables eléctricos para obtener voltajes de

110 y 220 voltios, son llevadas a cabo, ya que éstas van a ser las fuentes de poder para el extractor y los sensores.

La instalación y ajuste del equipo se debe realizar con cierta precaución con el fin de evitar daños en las conexiones de las termocuplas y cubiertas. Su preparación para la realización de una prueba, toma alrededor de una hora y media.

Siendo el flujo relativamente bajo, una vez que se ha ajustado este con la aleta a la salida - del extractor se estrangula el ducto, para que - el manómetro pueda captar el cabezal.

Siendo muy delgados los alambres de termocupla, cuando se hacen estas, es importante revisar su continuidad.

Los equipos sensores deben estar debidamente protegidos de los rayos solares, para evitar un sobrecalentamiento de los mismos. En la figura N<sup>o</sup> 22 podemos apreciar la instalación de algunos - equipos.

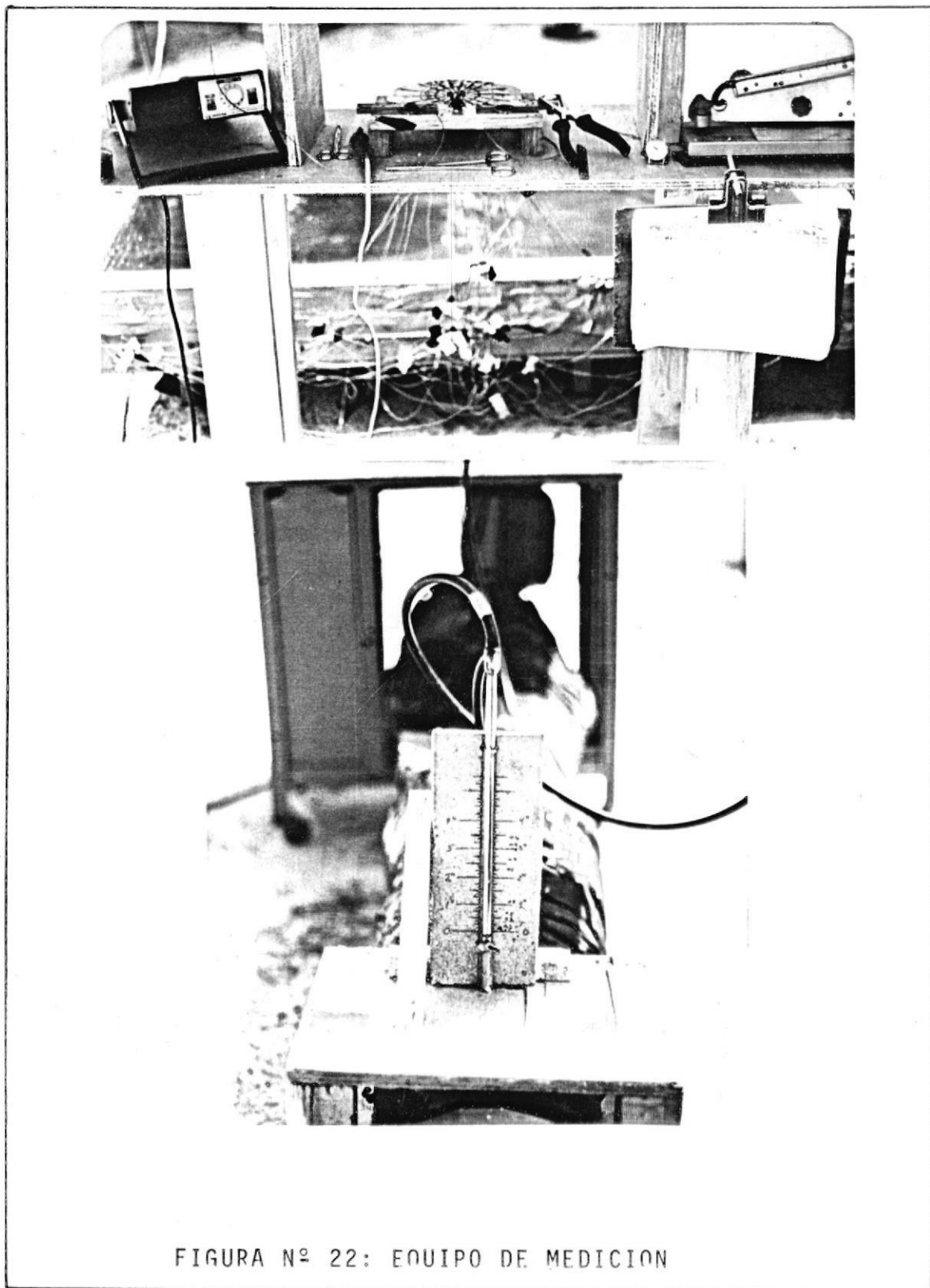


FIGURA N° 22: EQUIPO DE MEDICION

- El dispositivo receptor y selector de las diferentes termocuplas instaladas, fue construído para una mejor y más segura lectura de las temperaturas. Todas las termocuplas se encuentran debidamente soldadas. En general, esquemáticamente el equipo de esta prueba está representado en la figura N° 23.

Es importante conocer la exactitud de un instrumento de medición, que representa la capacidad de este para indicar el verdadero valor medido, en el laboratorio se encuentran debidamente instalados un solarímetro, un piranómetro y un anemómetro, que nos darán respectivamente lecturas de las horas sol, insolación, incidente total y velocidad del viento respectivamente. (ver Fig.24). El piranómetro al igual que el colector está horizontal, todos estos instrumentos tienen registradores de los datos obtenidos, son considerados bastantes exactos y están debidamente calibrados.

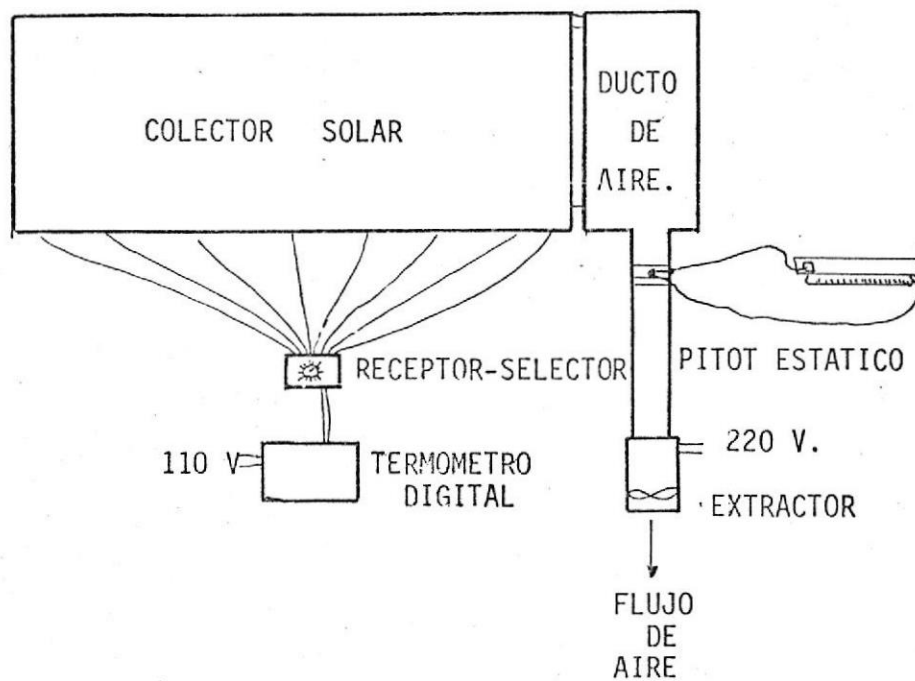
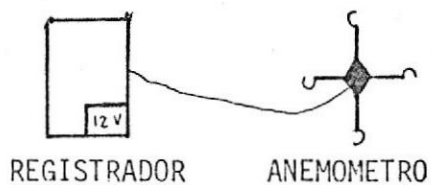


FIGURA Nº 23:ESQUEMA DEL SISTEMA DE PRUEBA

$T_{17}$  = Fondo del colector en la madera

$T_{18}$  = Entrada del flujo

$T_{19}$  = Placa cara superior

Todas estas temperaturas medidas sirven para obtener una detallada información sobre las pérdidas de calor en los diferentes puntos del colector. Las termocuplas fueron conectadas en paralelo, en grupos de nueve por cada lámina y grupos de tres por cada borde, entrada y salida de flujo. La temperatura ambiental es tomada o anotada al principio y final de cada ensayo, para considerar su variación, ya que este es un parámetro importante en el balance de energía del colector. En base a estos datos y aplicándolos en las ecuaciones definidas que gobiernan el sistema se calcula la eficiencia.

Un solo colector es ensayado, en el cual variando los espaciamientos entre las cubiertas y los materiales, se obtendrán diferentes eficiencias que serán analizadas y comparadas. Antes de cada prueba existe una rutina de mantenimiento de las condiciones del colector como son: limpieza de la cubierta exterior, revisión del sellado -

lateral del colector, revisión de ductos y conexiones de los alambres y de las termocuplas.

#### 4.2.2. Variación de la distancia entre coberturas para la determinación de la separación óptima:

El aire es uno de los mejores aislantes, si éste se encuentra en un cerramiento. Las cubiertas en un colector plano se mantienen separadas a una cierta distancia, para aprovechar este efecto del encerramiento y atrapar el calor, originando una resistencia al flujo del calor y evitando que este se pierda por arriba en el colector. En la práctica el espesor de este espaciamiento puede determinarse aproximadamente mediante informaciones de resultados obtenidos de experiencias realizadas. Sugieren que el encerramiento del aire no tenga un espesor superior a 0,098 pies, esto lo comprobaremos en el ensayo. Se variarán las distancias de estos espaciamientos para determinar el efecto en el rendimiento del colector.

Mediante la comparación de las diferentes disposiciones de las cubiertas se estudian las condiciones en la que una es de superior rendimiento a la otra. Luego se saca-

ran conclusiones.

Una correcta determinación del espaciamiento es indispensable para lograr una buena eficiencia en los colectores planos horizontales o inclinados. La determinación del número de Raleigh ( $R_a$ ) es importante, ya que este indica cuando se harán presente las fuerzas convectivas en el encerramiento. Para maximizar la perfomancia térmica del colector, el coeficiente convectivo entre la cubierta debe ser lo más pequeño posible. Los espaciamientos que se ensayaron son los dados en la tabla N°14; en la figura N° 32 se aprecian las varillas de 1/4" que eran colocadas para incrementar el espaciamiento de las cubiertas y la forma como estas eran colocadas.

#### 4.3. CURVAS CARACTERISTICAS

Estas curvas nos ayudarán a interpretar, en si, de una forma resumida y general los resultados obtenidos en la experiencia para su posterior análisis. Estos gráficos que nos indican la perfomancia del sistema son hechos en base de algunos parámetros importantes, los cuales son presentados de forma conveniente

TABLA N° 14

EXPERIENCIA N°	E S P A C I A M I E N T O		
	$\chi_1$ (pies)	$\chi_2$ (pies)	$\chi_3$ (pies)
1	0,036	0,036	0,036
2	0,057	0,057	0,057
3	0,078	0,078	0,078
4	0,099	0,099	0,099
5	0,141	0,141	0,141
6	0,141	0,036	0,036
7	0,078	0,036	0,036
8	0,036	0,141	0,036
9	0,036	0,078	0,036
10	0,036	0,036	0,141
11	0,036	0,036	0,078

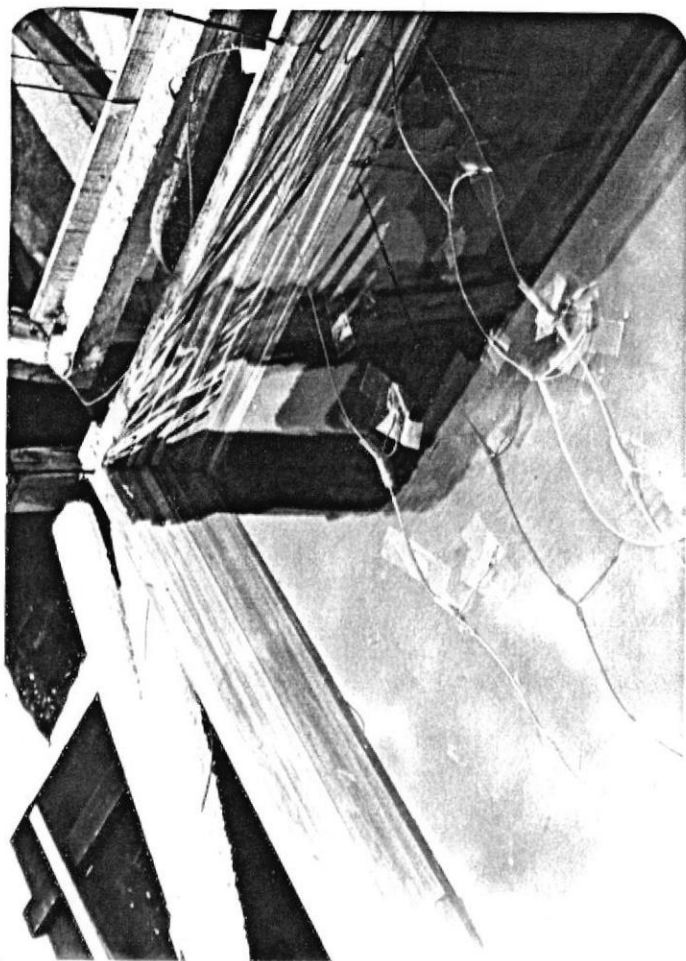


FIGURA N° 32: ESPACIAMIENTOS

te. Estos parámetros o factores de pérdidas y ganancias de calor son relacionados con los diferentes espaciamientos entre cubiertas que se ensayan.

En el presente experimento se analiza de manera especial la transferencia de calor que se produce por la parte superior del colector. Para una mejor comprensión de los resultados obtenidos en esta investigación se presentan los siguientes gráficos:

a. En relación a un solo día de prueba:

Gráfico N° 2             $Q_t$  Vs.  $T_p - T_a$

Gráfico N° 3             $\eta$  Vs.  $T_p - T_a$

b. En relación a todos los días de pruebas consideradas:

Gráfico N° 1             $U_t$  Vs.  $X$

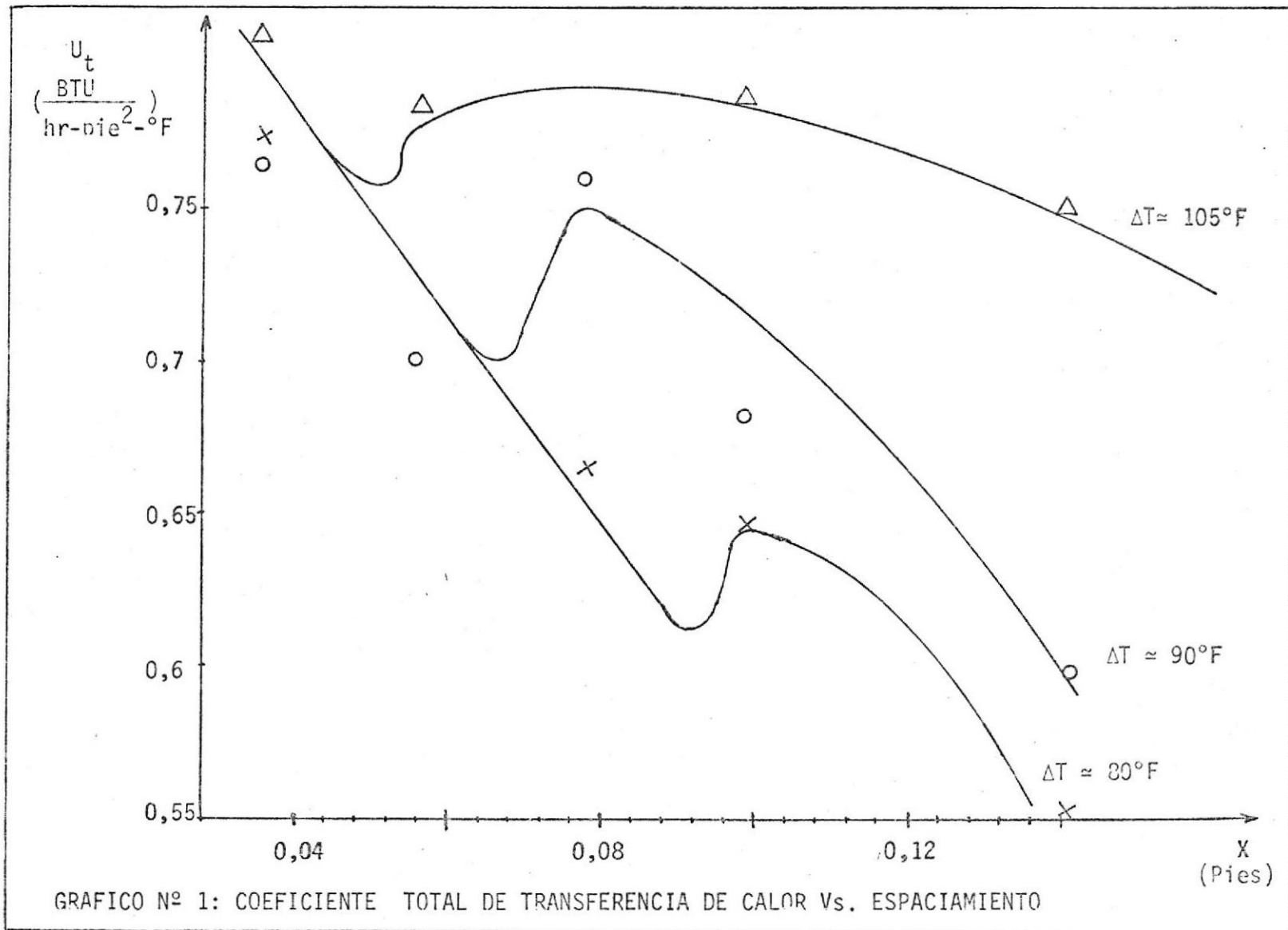
Gráfico N° 4             $h_{c1}$  Vs.  $X_1$

Gráfico N° 5             $h_{c2}$  Vs.  $X_2$

Gráfico N° 6             $h_{c3}$  Vs.  $X_3$

Los datos obtenidos en las pruebas se los resume en la tabla 15.

A continuación se presentan los gráficos mencionados.



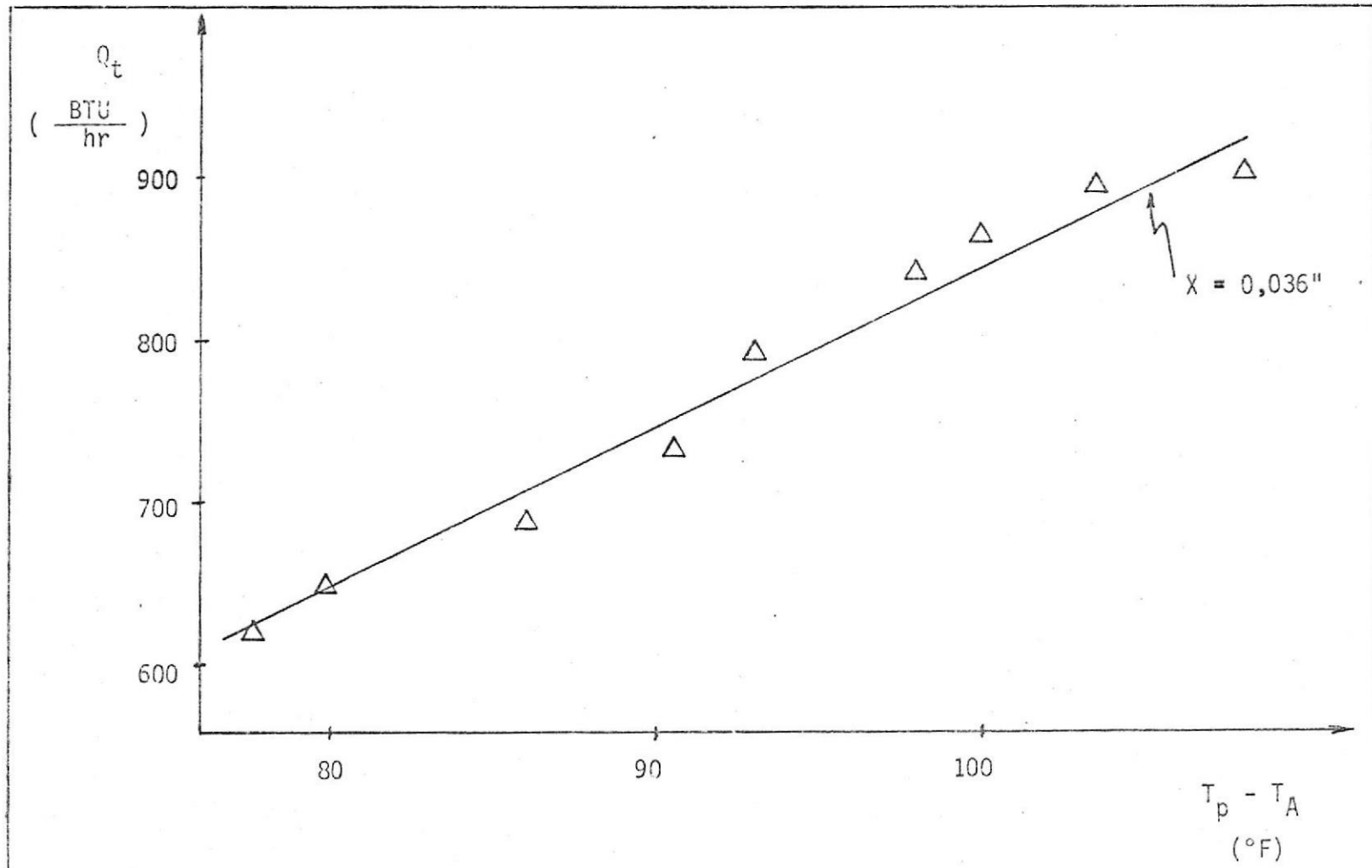
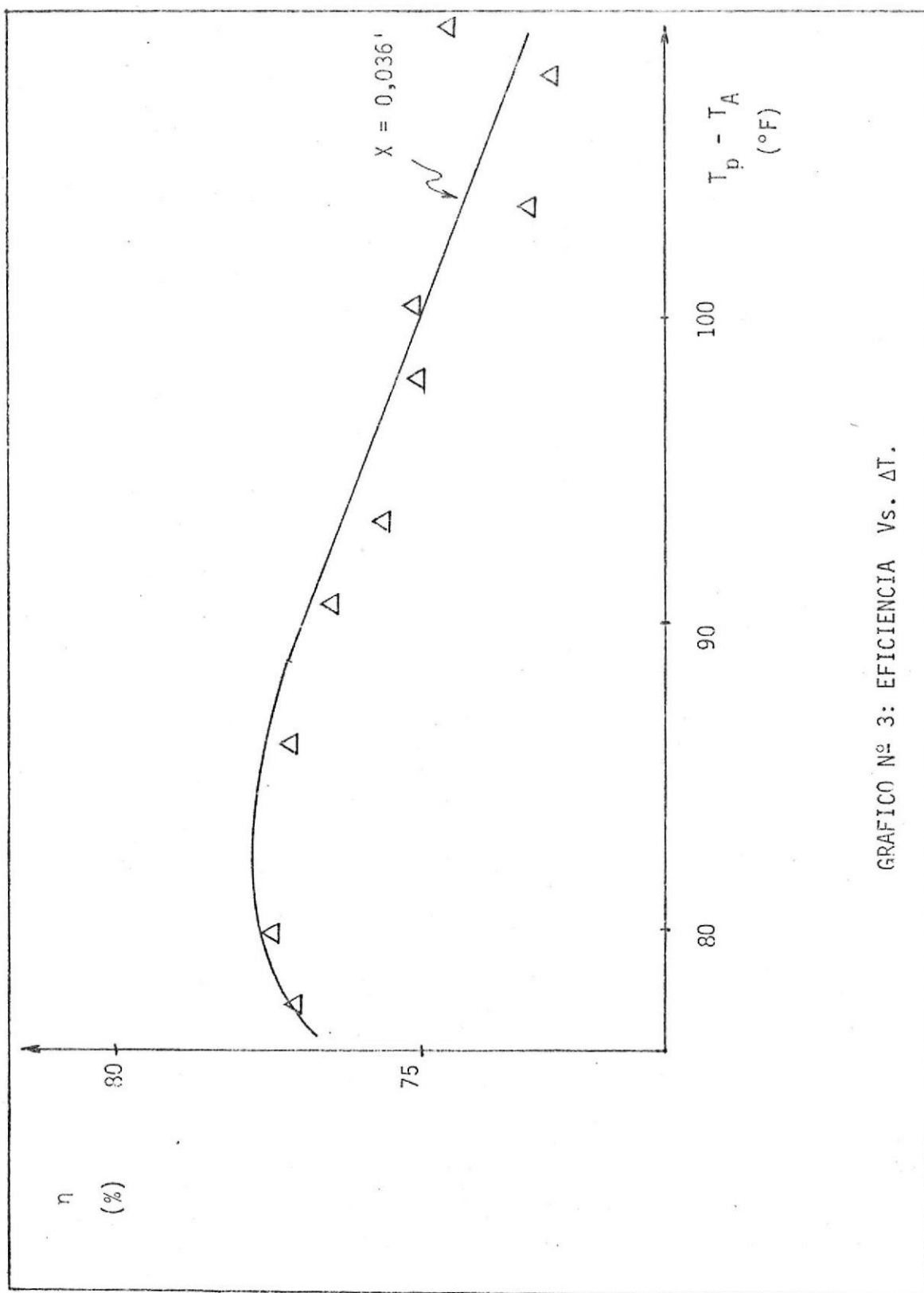


GRAFICO N° 2: PERDIDAS DE CALOR HACIA ARRIBA Vs.  $\Delta T$ .

GRAFICO N° 3: EFICIENCIA Vs.  $\Delta T$ .

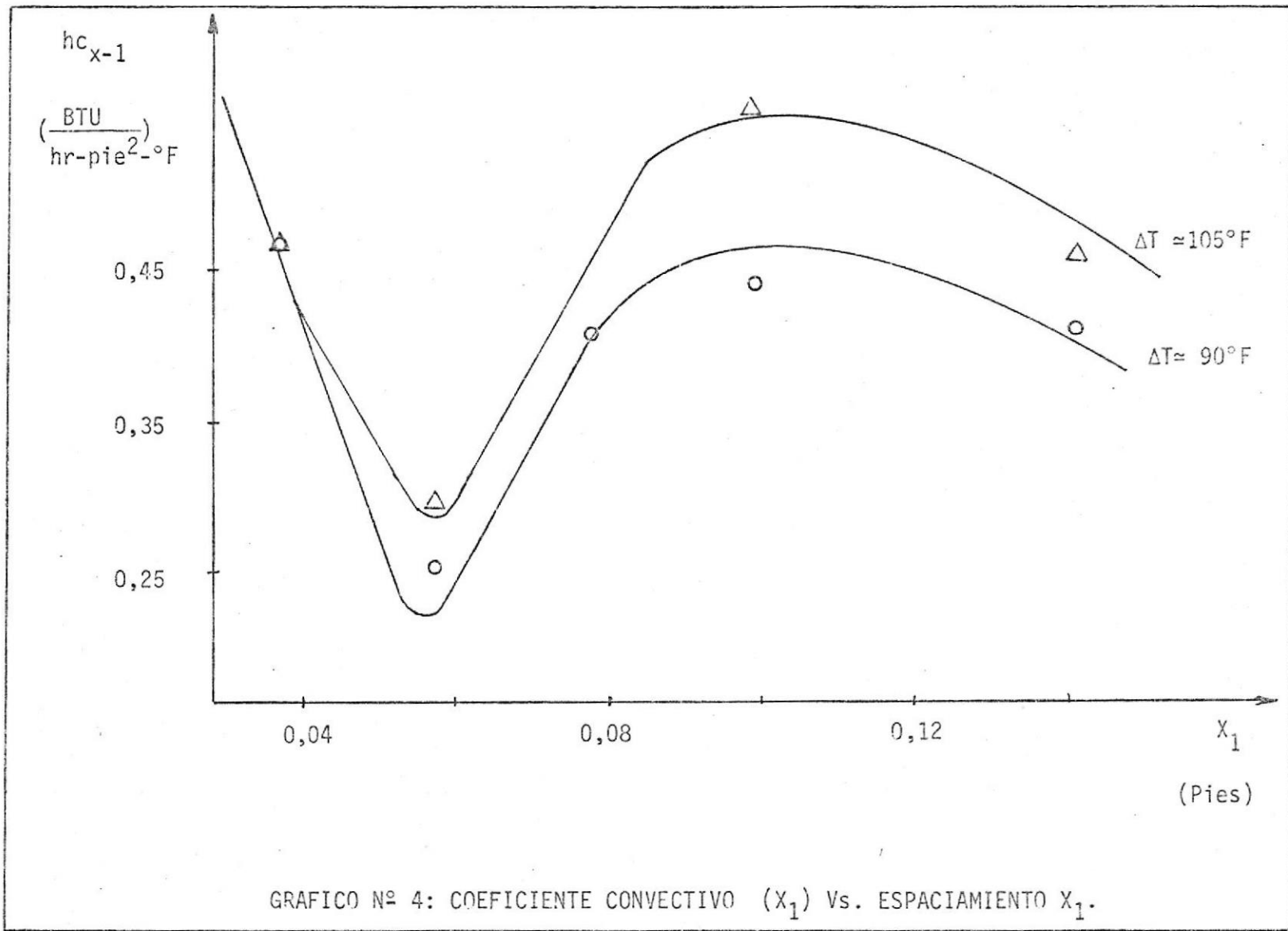
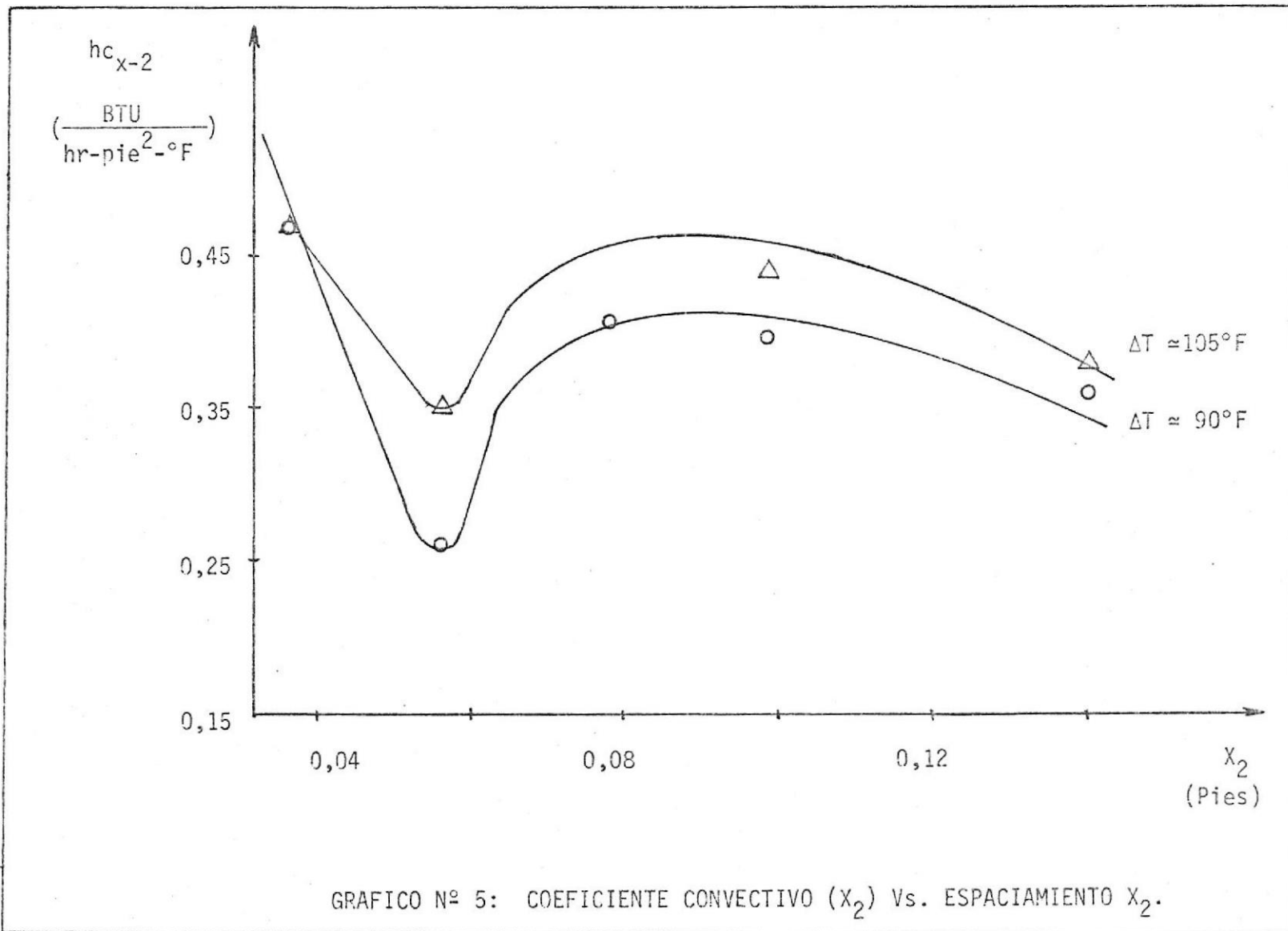


GRAFICO Nº 4: COEFICIENTE CONVECTIVO ( $x_1$ ) Vs. ESPACIAMIENTO  $x_1$ .



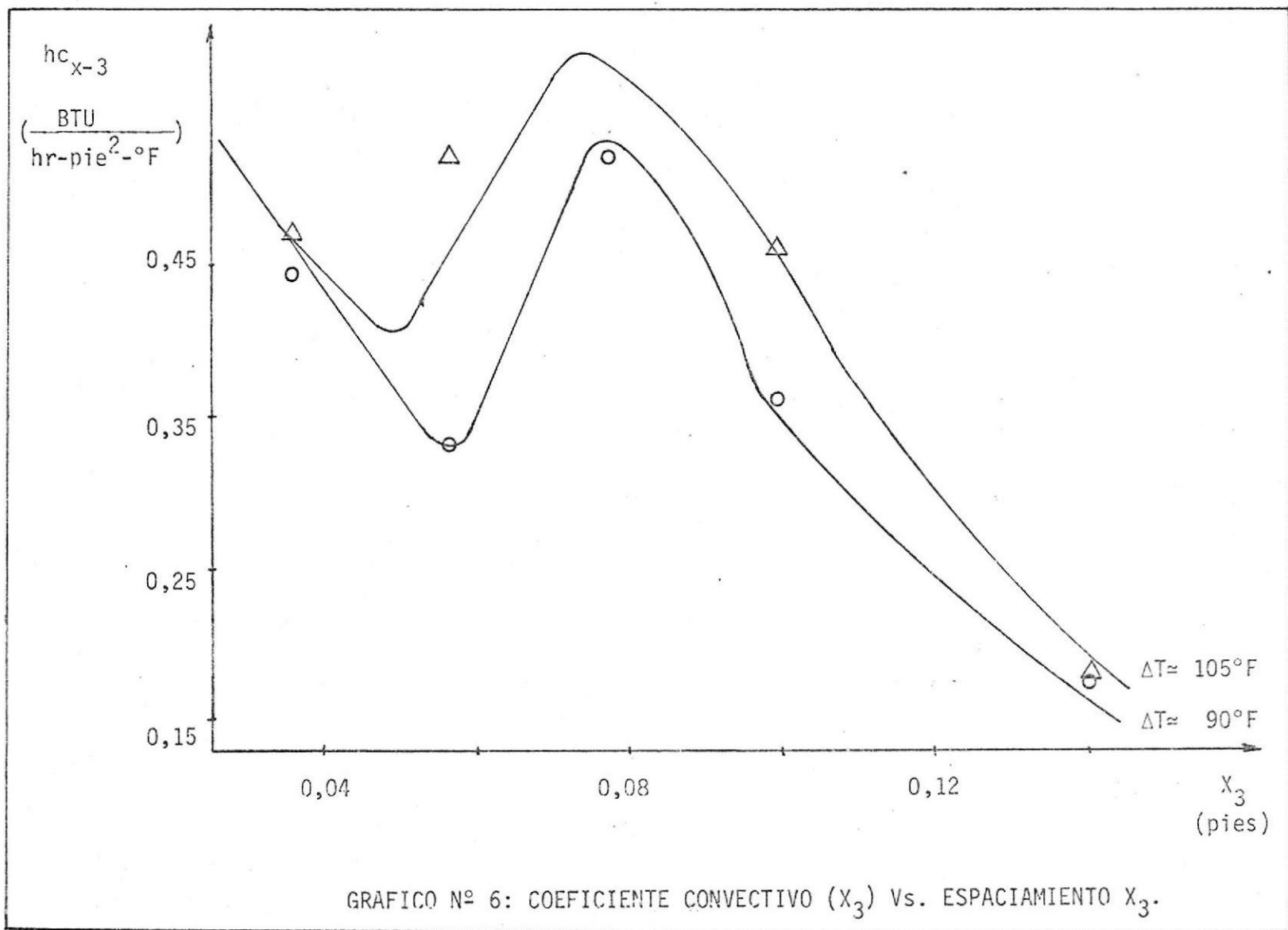


TABLA N° 15

X (pies)	HORA	$U_t$ ( $\frac{BTU}{hr-pie^2-\circ F}$ )	$Q_t$ ( $\frac{BTU}{hr}$ )	$N_u$			$hc$ ( $\frac{BTU}{hr-pie^2-\circ F}$ )			$T_p - T_A$ ( $^{\circ}F$ )
				$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	
	10:00	0,696	444,4	1	1	1	0,444	0,444	0,444	60,6
	10:15	0,759	622,9	1	1	1	0,472	0,472	0,444	77,6
	10:30	0,773	653,7	1	1	1	0,472	0,472	0,444	79,8
	10:45	0,754	688,4	1	1	1	0,472	0,472	0,444	86
	11:00	0,766	738,1	1	1	1	0,472	0,472	0,444	90,6
0,036	11:15	0,797	791,2	1	1	1	0,472	0,472	0,444	93,2
	11:30	0,809	844,8	1	1	1	0,472	0,472	0,472	97,9
	11:45	0,806	863,6	1	1	1	0,472	0,472	0,472	100,3
	12:00	0,809	896,4	1	1	1	0,472	0,472	0,472	103,6
	12:15	0,793	900,7	1	1	1	0,472	0,472	0,472	108,1
	12:30	0,829	990,8	1	1	1	0,472	0,472	0,472	111,6
	14:00	0,8	923,1	1	1	1	0,472	0,472	0,472	108,6
0,057	12:30	0,784	880,4	1	1,18	1,68	0,298	0,352	0,501	105,1
	14:00	0,703	682,5	0,853	0,88	1,19	0,254	0,265	0,333	91,6
0,078	12:45	0,661	568,2	1,28	2,22	2,29	0,278	0,484	0,471	80,5
	15:00	0,76	706,4	1,91	1,99	2,54	0,417	0,409	0,521	89,9
0,099	11:30	0,679	733,9	2,77	2,47	3,1	0,447	0,4	0,352	88,3
	13:00	0,649	556,3	3,07	3,56	3,02	0,496	0,576	0,488	80,5
	14:00	0,787	768,2	3,29	2,75	2,87	0,564	0,445	0,463	108,1
0,141	9:30	0,551	431,2	3,93	3,21	3,46	0,446	0,365	0,166	79,9
	10:15	0,593	556,3	3,83	3,21	3,56	0,435	0,364	0,177	92,1
	14:00	0,751	811,2	3,83	3,16	3,51	0,462	0,381	0,171	104,4

continua.....

$X$ (PIES)	HORA	$Q_u$ (BTU/hr)	$Q_l$ (BTU/hr)	$Q_f$ (BTU/hr)	$Q_e$ (BTU/hr)	$\eta$ ( % )
0,036	10:00	1407,1	7,98	56,3	1915,8	73,5
	10:15	2330,3	11,97	56,75	3021,9	77,1
	10:30	2497,7	13,07	62,13	3226,6	77,4
	10:45	2598,6	13,66	66,31	3366,9	77,2
	11:00	2676,2	13,84	70,19	3498,3	76,5
	11:15	2722,7	12,03	70,34	3596,2	75,7
	11:30	2819,6	12,44	81,54	3758,4	75,0
	11:45	2980,1	12,82	95,04	3951,5	75,4
	12:00	2796,0	15,43	115,34	3823,2	73,1
	12:15	3098,3	16,04	113,69	4128,7	75,0
	12:30	3362,8	15,28	128,42	4497,12	74,8
14:00	2842,5	13,37	126,47	3905,5	72,8	
0,057	12:30	2827,3	23,33	102,4	3833,4	73,8
	14:00	2094,3	15,99	61,05	2760,9	72,5
0,078	12:45	2306,8	20,87	86,47	2982,3	77,4
	15:00	2117,8	22,09	78,97	2925,2	72,4
0,099	11:30	2108,9	24,92	66,32	2934,1	71,9
	13:00	1851,1	16,27	70,41	2494,1	74,2
	14:00	2364,6	20,2	72,49	3225,5	73,3
0,141	9:30	3335,5	23,95	69,44	3860,1	86,4
	10:15	3216,9	27,13	64,06	3869,4	83,3
	14:00	3181,4	29,8	83,01	4105,4	77,5

## CAPITULO V

## 5. RESULTADOS

## 5.1. ANALISIS DE RESULTADOS

Catorce ensayos experimentales fueron llevados a cabo en el desarrollo del estudio, realizados en días diferentes, con el fin de verificar la validez del análisis teórico. En un colector cuyas características principales son: económico, liviano y de fácil construcción.

La predicción del rendimiento del colector está basada en la estimación de la cantidad de perdidas de calor, teniendo en cuenta el área efectiva de transferencia de calor de la placa absorbadora. Un bajo valor del flujo de aire fue usado para minimizar la caída de presión en el colector. Así mismo, el ínfimo espesor de la placa absorbadora se empleó para poder despreciar la conducción a través de ella, tomándose una temperatura de la misma.

No se empleó material antireflectantes por falta de informa-

ción y no justificarse su utilización; en la literatura se señala un aumento de un 3 % por cubierta de la eficiencia del colector cuando se emplea estos materiales, esto para días claros, en días nublados este valor disminuye.

El coeficiente de pérdidas hacia arriba es superior cuando los espaciamientos son menores (ver gráfico N° 1), éste disminuye - hasta cierto valor óptimo, a partir del cual se incrementa hasta llegar a un valor en el cual se mantiene relativamente constante, para luego disminuir su valor conforme aumenta el espaciamiento.

Las pérdidas hacia arriba serán mayores cuando la temperatura - de la placa sea mayor, (ver gráfico N° 2), en los espesores mínimos entre las cubiertas el calor encontrará menos resistencia, lo que da lugar a mayores pérdidas.

Del estudio de los números de Nusselts obtenidos, se resume que el espaciamiento  $X_1$ , tiene que ser mayor que el  $X_2$  y éste a la vez mayor que  $X_3$ . El aire encerrado comienza a ser inestable - con el incremento de  $R_a$ , el que se puede producir con el aumento del espaciamiento o de las temperaturas de las cubiertas. De estos gráficos se puede determinar el rango de espaciamiento óp

timo.

Estando a una mayor temperatura el espaciamiento  $X_1$  es aquí donde se produce la mayor transferencia de calor por convección libre.

Las pérdidas debidas a la convección quedan más ampliamente explícadas en los gráficos N°4, 5, y 6, ésta nos demuestran la importancia de elegir el correcto espaciamiento entre las diferentes cubiertas.

La tabla N° 15 nos demuestra que el colector que funciona a la menor temperatura de la placa será el más eficaz. La eficiencia será mayor en términos generales conforme aumenta el valor de los espaciamientos, pero este aumento tiene un efecto relativamente menor a partir de los 0,1 pies, por lo que no se justifica su incremento.

El rendimiento de un colector solar es determinado por la cantidad de calor que éste produce comparado con la radiación solar disponible. Así podemos decir que a mayor energía disponible habrá más energía útil. Al aumentar el calor útil, también aumentará la temperatura de la placa y a la vez - las pérdidas, haciendo una evaluación general vemos que (gráfico 3) la eficiencia del colector disminuye con el aumento del calor útil.

Los resultados nos muestran como al aumentar el espaciamiento, las pérdidas laterales y calor útil aumentan. Las pérdidas por el fondo en cambio disminuyen con el aumento del espesor del encerramiento, hasta un punto en el cual se estabilizan manteniéndose constantes.

El calor entrante es completamente independiente de la variación del espaciamiento entre las cubiertas, ya que la transmisividad del sistema de cubiertas sólo depende de las propiedades de los materiales. Para una temperatura de la placa existirá una cantidad de calor entrante.

Existe una buena relación entre los valores medidos y curvas obtenidas con los resultados que se esperaban teóricamente, lo que nos indica que la experimentación ha dado buenos resultados y luego de los días de prueba, se realizó una inspección de las condiciones del colector, éste presentaba alguna cantidad de polvo en las cubiertas y bordes, la pintura exterior deteriorada, las cubiertas por efectos del trabajo en la experiencia presentaban ciertas rayaduras, por esta razón, se consideraba un factor de suciedad en el análisis de un 2 %.

La razón del flujo del fluido através del colector se la consi-

deró normalizada en un valor para todos los puntos dados del análisis.

Del estudio de los materiales para cubiertas se destacan las propiedades ópticas superiores del teflón, y resulta ser el más conveniente para cubiertas interiores; no así, para cubiertas exteriores en donde las propiedades físicas como dureza, resistencia a la tensión, etc., es lo más importante a considerar, por lo que se utilizó plexiglass, que es un material que satisface estos requerimientos.

## 5.2. COMPARACION DE EFICIENCIAS

El proceso de la optimización del espaciamiento y arreglo de las cubiertas del colector de una forma general, se lo presenta en la figura N° 33. El mejor rendimiento obtenido no justifica el costo que supone el proceso. La obtención de ese rendimiento implica el uso de materiales más caros, más pesados, de difícil obtención y la construcción del colector es más compleja.

Es conveniente, para incrementar la eficiencia del colector, controlar las pérdidas debidas a la convección, por métodos simples.

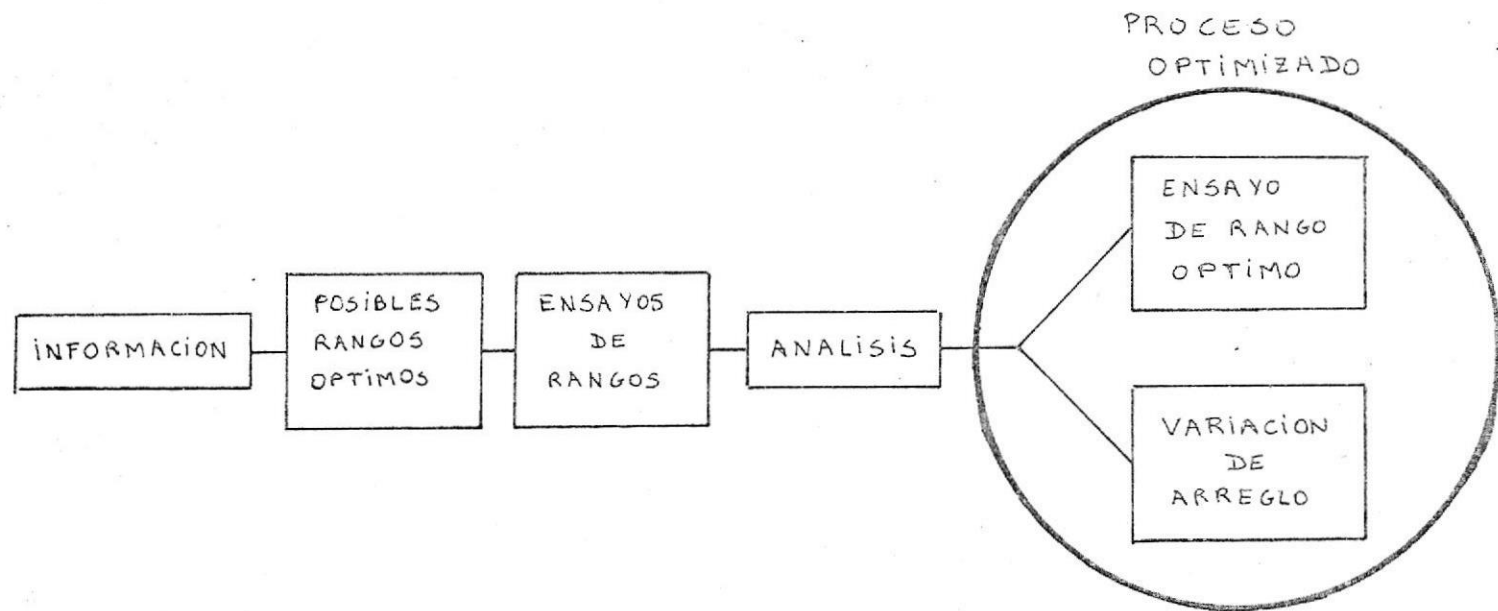


FIGURA Nº 33: PASOS EN LA OPTIMIZACION DEL ESPACIAMIENTO Y ARREGLO DE LAS CUBIERTAS.

En el colector, las pérdidas mayores por convección ocurren por:

- Convección libre en los espacios paralelos
- Convección libre y forzada desde la cubierta exterior expuesta a los efectos atmosféricos.

Los datos resultantes de los varios ensayos que se llevaron a cabo para comparar el efecto del espaciamiento diferente en cada separación de los distintos encerramientos y los de los diversos arreglos de materiales, se encuentran tabulados en las tablas N<sup>o</sup> 16 y 17, mediante un análisis visual sacaremos las conclusiones respectivas.

Los resultados obtenidos en los ensayos, nos confirman los valores de los rangos que mediante el análisis del número de Nusselt esperábamos; cuando el espaciamiento es incorrecto a pesar de estar a una temperatura de trabajo inferior la eficiencia es menor. En el arreglo eficiente, las pérdidas hacia arriba fueron también las de valor mínimo comparadas

TABLA N° 16

HORA	ARREGLO(PIES)			$Q_F$ (BTU/hr)	$Q_t$ (BTU/hr)	$H_u$			$Q_L$ (BTU/hr)	$T_p - T_a$ (°F)	$Q_E$ (BTU/hr)	$\eta$ (%)
	$x_1$	$x_2$	$x_3$			$x_1$	$x_2$	$x_3$				
12:30	0,141	0,036	0,036	88,71	573,60	3,33	1	1	20,67	78,5	2343,40	70,86
12:00	0,078	0,036	0,036	36,30	701,40	1	1	1	17,10	76,30	3064,30	74,88
12:30	0,036	0,141	0,036	87,7	786,90	1	3,12	1	22,43	97,50	3441,50	73,94
12:45	0,036	0,141	0,036	83,8	895,30	1	2,99	1	26,80	107,60	2751,20	63,44
12:45	0,036	0,078	0,036	52,80	925,4	1	2,15	1	26,62	108,70	4290,50	76,58
12:45	0,036	0,036	0,141	146,50	1011,60	1	1	3,69	17,07	114,70	4246,80	72,33
12:15	0,036	0,036	0,098	103,80	834,90	1	1	2,65	19,24	107,30	3705,80	73,61
12:30	0,036	0,036	0,078	104,90	752,50	1	1	2,55	18,39	95,80	3855,90	77,29

TABLA N° 17

## RESULTADOS DE VARIACION DE MATERIALES

ARREGLO N° 1	(1)	TEFLON (2)	TEFLON (3)	PLEXIGLASS
N° 2	(1)	TEFLON (2)	TEFLON (3)	VIDRIO
N° 3	(1)	TEFLON (2)	PLEXIGLASS(3)	VIDRIO

ARREG. #	$U_t$ ( $\frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie}^2\text{-}^\circ\text{F}}$ )	$Q_t$ (BTU/hr)	$Q_f$ (BTU/hr)	$Q_u$ (BTU/hr)	$Q_l$ (BTU/hr)	$Q_E$ (BTU/hr)	$T_p - T_a$ ( $^\circ\text{F}$ )	$\eta$ (%)
1	0,701	697,80	47,80	2234,00	21,80	3001,10	90	74,4
	0,671	675,90	62,50	1962,20	23,90	2726,70	80	71,90
2	0,666	616,90	40,30	1968,20	18,90	2644,40	90	74,40
	0,686	693,80	57,10	1528,10	22,20	2301,20	80	66,40
3	0,547	492,70	59,10	1991,80	18,80	2562,30	80	77,70
	0,549	474,80	50,50	2298,80	18,70	2842,90	90	80,90

con las producidas en los demás arreglos; no así, las pérdidas por el fondo y por los laterales, las cuales no necesariamente fueron las más bajas producidas.

El valor más bajo de la eficiencia se obtuvo cuando el espaciamiento  $X_3$  fue mayor que los dos restantes, en este caso las pérdidas hacia arriba fueron altas. El alto valor de la eficiencia obtenida en el arreglo teflón, plexiglass y vidrio, se explica por la doble trampa de calor producida en el sistema colector. Esta propiedad del vidrio de ser opaco a las ondas caloríficas sumadas a las del plexiglass hacen que las pérdidas hacia arriba sean mínimas.

En el ensayo de los arreglos se comprobó la superioridad del plexiglass comparada con el vidrio común de ventanas, se los probó a los dos en las mismas condiciones de espaciamiento y ambos como cubierta exterior obteniendo un mejor rendimiento con el plexiglass. El arreglo teflón, teflón y plexiglass fue el segundo de mejor eficiencia, a lo que si adjuntamos las buenas propiedades ópticas que poseen estos materiales empleados y su poco peso, diremos que es el mejor arreglo.

### 5.3. COSTO DEL COLECTOR

#### 5.3.1. Valor Actual.

Para poder tomar una decisión de aspecto económico, en lo que respecta a colectores solares, hay que considerar el valor de la energía así obtenida y cuanto representaría en ahorro el uso de este sistema, analizar ventajas e inconvenientes que presentan su empleo, cuestión prima económica hablando, al comparar la energía solar con otras fuentes alternativas de energía. Entre las ventajas de la energía solar tenemos:

- Gastos de explotación bajos y conocidos
- Disponibilidad
- Gran duración del equipo
- Confiabilidad
- Posibilidad de transferencia de tecnología
- Ninguna degradación de los recursos naturales
- Ninguna contaminación

- No se necesita mano de obra calificada
- El mantenimiento es reducido al cuidado del equipo

y las desventajas tenemos:

- Inversión inicial elevada
- Suministro discontinuo
- Obras de Ingeniería Civil de más envergadura

Además otras consideraciones técnicas, termodinámicas, ecológicas y de interés general por el ahorro energético favorecen la creciente implantación de este tipo de sistemas. Conclusiones en el aspecto económico son difíciles de alcanzar por algunas razones como:

- Factores importantes en el costo y rendimiento, varían entre diferentes constructores de equipos.
- La eficiencia del sistema se altera con el clima local, tiempo y cantidad de luz solar.
- Los precios del combustible y electricidad, que determinan el costo del ahorro que se implica en el uso

de energía solar, son diferentes en cada país.

- Vitales características como el tiempo de vida y - costo de operación no son exactamente conocidos.
- No existe todavía un análisis económico adecuado y de fácil comprensión para precisar las ventajas.
- Inestable posición de los precios de los combustibles.

Técnicas de evaluación económica son requeridas para determinar el diseño y dimensionamiento de un sistema solar que implique el máximo beneficio y estimar así el ahorro o pérdidas futuras. Algunos parámetros en que puede basarse un análisis económico son:

- Número de años en que el ahorro de combustible empieza a ser mayor que los gastos extras.
- Número de años requeridos para que los ahorros acumulados balanceen el pago inicial y pérdidas efectivas iniciales.

- Número de años requeridos para que los ahorros acumulados repaguen el costo total del sistema.

El hecho de que un colector operacionalmente sea más económico que otro, no significa que también sea el más eficiente. El valor del calor producido por cualquier sistema de calefacción puede considerarse como producto del costo de combustible, su valor calorífico y la eficiencia total del sistema. Los gastos así obtenidos pueden compararse con los gastos invertidos en la instalación.

Un sistema es practicable cuando en dos años o menos hay ganancias, en cinco o menos, se completa el pago inicial y en 10 o menos, el pago total. El beneficio económico se presenta obviamente cada mes con el ahorro de energía eléctrica o de combustible, que ha sido obtenido con el empleo del calentamiento solar. La energía solar es gratis, pero la inversión en el equipo es alta, entre los factores que aumentan el valor total tenemos:

- Costo del material empleado en el equipo para su ins

talación y ajuste.

- Costo del equipo auxiliar de energía
- Costo de la mano de obra
- Costo adicional para adecuar el sistema al lugar donde de será colocado.
- Costo de mantenimiento y reemplazo de partes averiadas.
- Seguro e impuesto a la propiedad
- Costo de mejoras.
- Si el dinero procede de un préstamo, habrá que contar con los intereses.

En nuestro país aún no existen constructores de calentadores de aire, por lo que no se puede estimar el precio que representaría una instalación de este tipo. En los Estados Unidos de Norteamérica el precio equivalendo

te de la instalación total por pie cuadrado de colector hasta el año 80 estaba alrededor de los 25 a 35 dólares.

Reducciones en el costo total pueden ser esperadas que ocurran por algunos caminos, tales como:

- Reducción del empleo de materiales caros.
- Alto rendimiento de los componentes.
- Aprendizaje de la labor de instalación.
- Economía en la manufacturación e intalación del sistema.
- Saber controlar debidamente el uso del equipo.

La utilidad que daría la inversión con el tiempo es una curva ascendente, en la figura N° 34, se ve que las ganancias producidas por el valor del ahorro, de energía, se producirían a partir de los dos años de ins

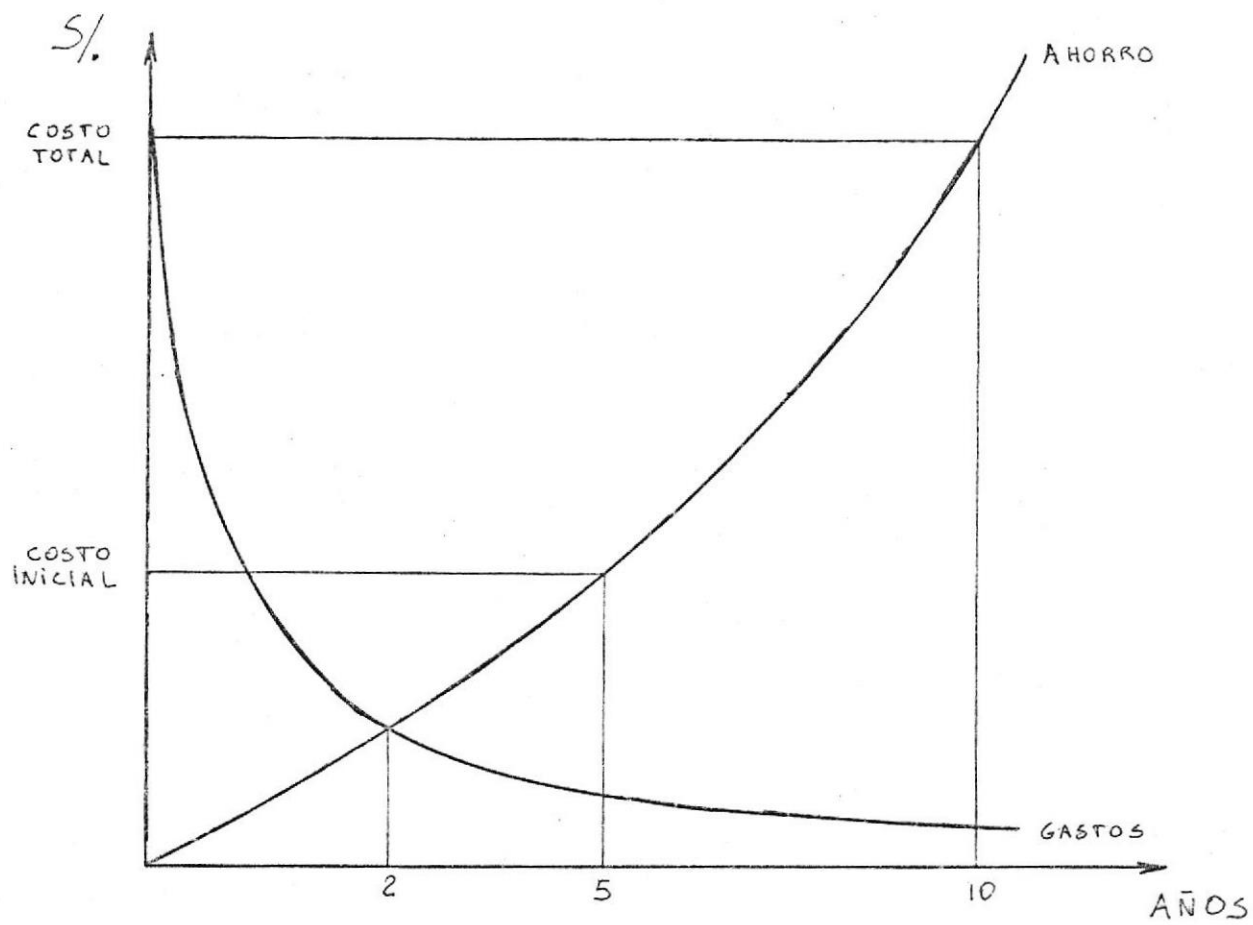


FIGURA Nº 34 : UTILIDAD DE LA INVERSION

talado el equipo; el costo inicial de la inversión se lo cubriría en base a los ahorros acumulados hasta los cinco años y el costo total del equipo con los ahorros de diez años.

El empleo de un sistema de energía solar, no implica que ésta reemplaza de una forma total a un sistema similar de calentamiento, es de esperar un 50 % de ahorro total de energía.

#### 5.3.2. Perspectivas

El empleo de la energía solar, con el aprovechamiento de otras fuentes de mayor rendimiento, no ha sido tratado todavía muy a fondo, careciendo de la importancia debida se ha atrofiado su desarrollo, considerando que es una fuente de energía de la cual se tiene conocimientos desde muchos años atrás.

Su utilización no interfiere con otras necesidades, no contamina el aire, no produce residuos, ni produce el desequilibrio ecológico. Con el escaseamiento de estas fuentes convencionales nuevos auges se presentan en el

estudio del aprovechamiento de la energía solar. Convertir la energía solar en electricidad o en trabajo mecánico, se logra con sistemas, cuyos rendimientos son pequeños; sólo un mínimo porcentajes de la energía recibida se puede realmente aprovechar.

Una de las grandes ventajas del sistema de calentamiento solar de aire, es el mínimo mantenimiento que necesita el único dispositivo que merece atención es el ventilador. Posibles daños no quedan descartados; pero esto, entra dentro de lo fortuito; en general, una vez puesto en funcionamiento el equipo, según referencias de estudios de experiencias realizadas en el extranjero, rara vez luego de ajustado el equipo y puesto en marcha, es necesario darle mantenimiento. Por esta razón, los constructores de colectores de este tipo, se arriesgan a garantizar sus equipos por tiempo de hasta 5 años contra cualquier daño.

En lo que respecta a información sobre el tema, se da gran apoyo por parte de entidades internacionales encargadas del desarrollo de fuentes no convencionales, inclusive ésta se la obtiene gratis en algunos casos. Esto per

mite que cualquier persona interesada en el asunto se entere de los principios básicos, desarrollo y aplicación de la misma.

En nuestra región, la cantidad de energía que incide diariamente es mayor que la energía que podría ser utilizada en algún proyecto de calefacción solar. Es cuestión de realizar estudios que se encarguen de justificar su aplicabilidad.

Las zonas desérticas, donde la escasa nubosidad con pocas lluvias, son sitios ideales para el aprovechamiento del sol. Nosotros tenemos zonas desérticas en el Litoral, páramos en la Sierra, lugares en los que se facilita la instalación de algunas de las diferentes aplicaciones de la energía solar.

Esta puede desempeñar un papel importante en la economía rural, de un país subdesarrollado como el nuestro. Siendo este campo considerado como de investigación o en proceso de desarrollo existen ciertas facilidades, lo que puede incentivar a los interesados.

En la actualidad los principales materiales usados en aplicaciones solares, como son: pintura selectiva, material de cubierta, fotoceldas, etc., no se los encuentra en el mercado nacional. Esto implica que -equipos muy sofisticados no podrán construirse, al menos que se los importe, lo que impacte será lo de fácil construcción y de gran utilidad.

Técnicas mejoradas, más complejas y con -proyecciones, aparecen cada día en el mercado extranjero, más firmas constructoras, organizaciones dedicadas al estudio de la energía solar, etc., esto nos -permite pensar en un desarrollo ascendente del uso de la energía solar, que en parte se debe a la subida de los precios y agotamiento de las fuentes tradicionales.

Es razonable, anticipar que la investigación acelerada hará que en la década entrante se produzcan numerosos avances técnicos; tal vez, una mayor simplificación en la implementación y manufacturación de procesos utilizados en energía solar. Con esto, los costos de los equipos podrían reducirse grandemente, esto ha quedado comprobado en otros campos como lo es la medicina

y la exploración espacial.

La inflación, es un factor que incrementaría el valor inicial del sistema, pero que a largo plazo tenderá - al ahorro. Lo que hoy es caro, mañana sería barato. La inversión inicial sería considerada como ventajosa, - económicamente hablando, si tomamos en cuenta el beneficio y la no utilización de materiales que se gasten o pierdan rápidamente.

Actualmente, no existe en nuestro país una mentalidad abierta al uso de la energía solar, sólo por medio de un cierto número de realizaciones se podrá instaurar este objetivo.

El desarrollo natural del país, el alza de precios de otras fuentes de energía, conducirán a extender el actual período de investigación, y lograr la aplicación cada día mayor de la energía solar en nuestra vida cotidiana.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Este proyecto describe el diseño, construcción y pruebas de un colector solar que calienta aire. Ha sido presentado un estudio - que determina, una solución analítica de la transferencia de calor que se produce en el captador y forma de obtener su rendimiento.
- Un control significante del rendimiento del colector puede ser - realizado por un dominio del coeficiente de transferencia de calor entre la placa absorbedora y el ambiente.
- Se analizaron las diferentes pérdidas de calor que se producen en un colector de tres cubiertas, se estudió el efecto del espacia-miento entre estas coberturas y materiales de las mismas sobre las pérdidas.
- En si, el empleo de tres cubiertas, incrementa tanto el costo del colector como su rendimiento térmico. Para poder realizar un análisis completo se prefirió trabajar con las tres cubiertas.

- En lo que respecta al material de la cubierta, el factor más importante en el diseño para usar plásticos especiales son sus propiedades ópticas. El teflón posee propiedades ópticas muy superiores a los plásticos comunes, es de interés por su bajo índice de refracción, bajo peso, disponibilidad en espesores mínimos, que permiten una alta transmitancia de la radiación solar, y su durabilidad es superior a la de los plásticos duros.
- El vidrio siendo más resistente a la exposición solar, es superior al teflón, para usarlo como cubierta exterior, es también superior desde el punto de vista de la eficiencia ya que es virtualmente opaco a las ondas infrarrojas.
- La cara interna de la cubierta externa absorbe la radiación infrarroja, aumentando su temperatura. Al calentarse ligeramente las cubiertas transparentes, se reducen en cierto modo las pérdidas de calor hacia el exterior desde la placa absorbidora.
- Las pérdidas por radiación en las cubiertas operan independientemente de las producidas por convección.
- El colector plano convencional es razonablemente eficiente

cuando la temperatura del fluido de trabajo de salida está entre los 150°F y 212°F. La eficiencia promedio instantánea del colector probado en este rango está alrededor del 73 %, con un porcentaje de error hallado del  $\pm 12$  %.

- Los rangos óptimos de trabajo, de los espaciamientos entre las diferentes cubiertas y la placa son:

a. Espacio entre la placa y la cubierta inferior ( $X_1$ )

$$0,06' < X_1 < 0,073' ; \text{ para un } X_{1\text{-opt}} \approx 0,07 \text{ pies}$$

b. Espacio entre la cubierta inferior y la intermedia ( $X_2$ )

$$0,04' < X_2 < 0,055' ; \text{ para un } X_{2\text{-opt}} \approx 0,052 \text{ pies}$$

c. Espacio entre la cubierta exterior y la intermedia ( $X_3$ )

$$0,037' < X_3 < 0,048' ; \text{ para un } X_{3\text{-opt}} \approx 0,045 \text{ pies}$$

- Los valores mínimos de los rangos señalados, indican el comienzo desde donde fenómenos convectivos comienzan a hacerse presente en los espaciamientos, ya que para es-

pacios más pequeños sólo se produce transferencia de calor por conducción al presentarse un estado estacionario en el aire encerrado.

- Del análisis del problema puede decirse que es conveniente también que los espaciamientos sean superiores a 0,141 pies en donde la eficiencia es superior. Pero la aplicación de estas distancias daría lugar a un incremento en el costo del colector, y ya que es necesario más material, el peso del colector aumentaría, además la altura de los bordes laterales del colector se haría considerable, lo que originará sombras. Estos espaciamientos superiores se justifican sólo en colectores de gran tamaño, en los que la relación de su longitud y ancho con el espesor lateral, no permite comparación, en colectores pequeños no se justifican.
  
- De los resultados se concluye que el mejor arreglo de cubiertas es el de:

Para la cubierta exterior (Nº3) - plexiglass (acrílico)

Para la cubierta intermedia (Nº 2) - teflón; y,

Para la cubierta inferior (Nº 1) - teflón.

- esto porque este sistema de cubiertas es de alta eficiencia, bajo peso, los materiales poseen buenas propiedades ópticas, fácilmente trabajables, relativamente económicos, etc.
- El arreglo más eficiente es el de vidrio, plexiglass y teflón, pero considerando otros factores como el peso de los materiales, costo, manuableidad y sus propiedades, hacen que este no sea el más adecuado.
  - Las pérdidas en el colector considerando los valores extremos pueden resumirse a:

Pérdidas por arriba: 30 % - 18 %

Pérdidas por el fondo: 3 % - 1 %

Pérdidas laterales: 1 % - 0,6 %

Para una eficiencia del colector solar de: 16 % - 80,4%

#### RECOMENDACIONES

- Un colector de tres cubiertas debe ser diseñado para poder

resistir elevadas temperaturas, porque puede darse el caso de que el aparato que permite la circulación del fluido de trabajo falle o no estar conectado cuando capte la luz solar.

- El colector debe ser capaz de resistir cargas de viento y lluvia pertinaz.
- La reducción del calor perdido desde el absorbedor a través de las cubiertas permite que áreas más pequeñas de colector sean usadas; he aquí, la importancia de tener un control debido de las mismas.
- En la construcción de un colector plano deben ser tomados en cuenta los siguientes puntos:
  - a. Evitar que penetre polvo y humedad al interior.
  - b. Los materiales a emplearse deben estar libres de humedad alguna, ya que, al calentarse éstos, pueden evaporar la humedad y producir una condensación en las cubiertas, lo que disminuye la transmisividad de éstas.
  - c. Colocar el espesor correcto de aislamiento en el fondo y

los laterales, un insuficiente aislamiento incrementa las pérdidas.

- d. De ser construído de madera el colector, ésta debe ser tratada con un líquido exteriormente, para que la proteja contra el deterioro y la polilla.
  - e. La base para la selección de un correcto diseño son las condiciones meteorológicas y la aplicación que se le va a dar al sistema.
- A continuación se citan algunas maneras de reducir las pérdidas por arriba en el colector, estas son:
- a. Mediante el efecto de invernadero, esto es producir una especie de trampa al calor, lo cual se produce porque el vidrio y ciertos plásticos gruesos actúan como filtros respecto a las radiaciones, transmitiendo una gran cantidad de energía solar, que en su mayor parte es de onda corta, pero no transmite las ondas largas caloríficas.
  - b. Manteniendo baja la temperatura de trabajo de la placa, con lo que la energía pérdida será escasa. Esto debe hacerse controladamente, ya que, una temperatura inferior de la placa

- ca implica un mayor gasto en hacer circular el aire a tra vez del colector, para aprovechar el calor absorbido por el colector.
- c. Pérdidas por convección pueden ser eliminadas produciendo un vacío parcial en los espaciamientos de las cubiertas.
- d. Adaptando al colector superficies reflectoras convenientemente orientadas, las cuales dirigen la radiación in cidente hacia el absorbedor, aumentando la energía en trante al colector.
- e. Haciendo que el camino que recorra el aire en el colector sea lo más largo posible, así alcanzará el aire la mayor temperatura posible de salida.
- El colector más barato será el que requiera de menor equipa miento. No existe colector que se adapte bien a todas las necesidades a que es sometido. Para poder proporcionarles mantenimiento, los colectores, en caso de presentarse algu na falla o anomalía en su funcionamiento, deben estar - ubicados en lugares accesibles. Las siguientes sugerencias de mantenimiento servirán de ayuda para obtener la mejor ope ración posible del colector solar plano:

- a. El flujo de aire es requerido para evitar que la unidad se sobrecaliente; así en caso de falla eléctrica o mal funcionamiento del ventilador, es necesario cubrir el colector.
- b. Cuando el extractor o ventilador que hace que el aire circule, funciona continuamente, es conveniente darle el mantenimiento correspondiente.
- c. Revisar el sellado del colector para evitar los escapes de aire.
- d. Con el fin de permitir la máxima colección de luz solar, la superficie exterior debe mantenerse completamente limpia.
- e. Para aumentar la vida de ductos y colector, ocasionalmente debe dárseles una mano de pintura protectora, que incluso mejora su apariencia.
- f. Durante un día lluvioso debe protegerse debidamente el equipo, manteniendo desconectado el ventilador.
- g. Revisar la base o soportes del colector cada cierto tiempo, para asegurar una perfecta estabilidad del mismo.

A P E N D I C E S

## APENDICE N° 1

## MEDICION DE EMISIVIDAD DE PINTURA NEGRA SELECTIVA

Los resultados en experiencia se los encuentra resumidos en la Tabla N° 18. .

TABLA N° 18

VOLTAJE (VOLT)	AMP. (AMP)	TEMP.ELEM. (°C)	TEMP.CAV. (°C )	PRESION CAV. (TORR)	$\Delta T$ (°C)	$P^{1/4}$
		158	0	259	158	4,01
		164	0	180	164	3,66
		174	0	95	174	3,12
11	1	186	0,5	35	185,5	2,43
		192	0,5	13	191,5	1,9
		203	1	2	202	1,19
		204	1	1	203	1
		205,5	1,5	0,55	204	0,86
		207	1,5	0,24	205,5	0,7
		208	1,5	0,17	206,6	0,64

Tomamos como valor medio de la temperatura de la cavidad:

$$T_c = 0,75 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ó

$$T_c = 273,75^\circ\text{K}$$

Graficando los puntos (ver gráfico N° 7) y aplicando las fórmulas recomendadas en este procedimiento, las cuales son:

$$W = \frac{\text{Volt.} \times \text{Amp.} \times 0,96}{4,186} - 0,0004 \overbrace{(T_e - T_c)}^{\Delta T} \text{ ( Cal/seg)}$$

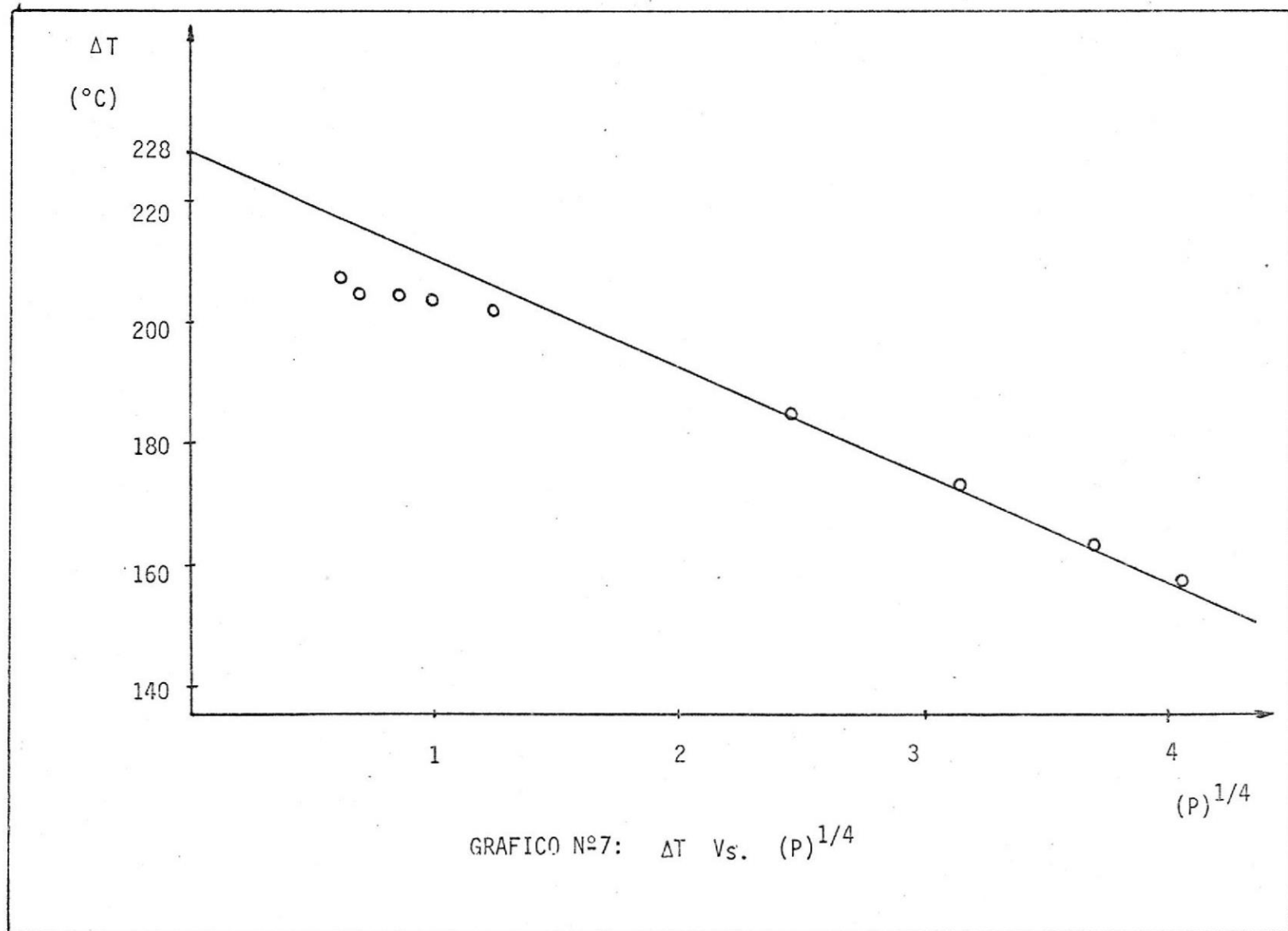
$$\emptyset = Q/A = W \times 0,0301 \text{ (Cal/cm}^2 \text{ - seg)}$$

$$\epsilon = \frac{\emptyset}{\sigma(T_e^4 - T_c^4)}$$

Obtenemos las siguientes conclusiones:

$\Delta T$ (°C)	$\bar{T}_{cav}$ (°K)	$T_e$ (°K)	Q (Cal/seg)	$\epsilon$ (EMISIVIDAD)
215	273,75	488,75	0,0733	1,04
220	273,75	493,75	0,0733	0,994
228	273,75	501,75	0,0732	0,925

De lo que se concluye, que el valor más aceptable de la emisividad



de la pintura negra ensayada es:

$$\epsilon = 0,925$$

Considerando que:

- A temperaturas mayores de trabajo el equipo funciona mejor, ya que, los cambios que se producen en él, se los capta más exactamente.
- Cuando se trabajó con vacíos inferiores a 0,1 TORR<sup>(1)</sup> la presión no era estable y su valor aumenta, hasta que se espere que el valor de la temperatura se estabilice más o menos.

---

(1) 1 Torr = 1 mm. Hg

APENDICE Nº 2

DATOS DE FLUJO

ECUACION USADA 
$$V = \sqrt{2 g h \frac{\rho_{\text{agua}}}{\rho_{\text{aire}}}}$$

POSICION DEL TUBO MEDIDOR	RANGO DE ESCALA	MEDICIONES (cm DE H <sub>2</sub> O)	
SUPERIOR	0 - 5	1. 0,02	6. 0,08
	Factor:0,2	2. 0,04	7. 0,07
		3. 0,05	8. 0,06
		4. 0,07	9. 0,04
		5. 0,08	10. 0,03
MEDIA	0 - 2,50	1. 0,03	6. 0,09
	Factor:0,1	2. 0,04	7. 0,085
		3. 0,05	8. 0,07
		4. 0,07	9. 0,06
		5. 0,08	10. 0,035
FONDO	0 - 1,25	1. 0,025	6. 0,08
	Factor:0,05	2. 0,04	7. 0,075
		3. 0,05	8. 0,065
		4. 0,06	9. 0,055
		5. 0,07	10. 0,045

VELOCIDADES (PIES/SEG)

SUPERIOR	5,99	8,471	9,471	11,206	11,98	11,98	11,206	10,375	8,471	7,336
MEDIA	7,336	8,471	9,471	11,206	11,98	12,707	12,348	11,206	10,375	7,924
FONDO	6,697	8,471	9,471	10,375	11,206	11,98	11,599	10,798	9,933	8,985

VELOCIDADES MEDIAS

	$\bar{V}$ (PIES/SEG)	$\bar{V}$ (PIE/MIN)	$\bar{V}$ (PIE/ M)
SUPERIOR	9,649	578,916	34734,96
MEDIA	10,302	618,144	37088,64
FONDO	9,952	597,09	35825,4

De estos valores de  $\bar{V}$ , obtenemos una velocidad total de:

$$V_T = 9,968 \text{ Pies/seg} = 598,06 \text{ Pies/min} = 35.883,6 \text{ pie/hr}$$

Asumimos una velocidad aproximada de:

$$V = 10 \text{ pie/seg} = 600 \text{ pies/min} = 36.000 \text{ pie/hr}$$

## APENDICE N° 3

## CALCULO EXPERIMENTAL

En la comprensión del análisis matemático aplicado, el siguiente cálculo de ejemplo, tiende a esclarecer el procedimiento se guido en la aplicación de fórmulas y con ceptos.

...

## CALCULO DE EJEMPLO

DATOS	FORMULAS	RESULTADOS
	A. ANGULOS SOLARES	
DIA: 10.4.82		N = 100
HORA: 12h45	H = 15(t)	T = 0,25
	$D = 23,45 \text{Sen} \left[ \frac{360}{365} (284 + N) \right]$	H = 3,75
L = 2,2°	$A = \text{sen}^{-1} (\text{CosD CosH CosL} + \text{SenL Sen D})$	D = 7,534°
		A = 83,472°
	B. AREA DE LA PLACA	
X <sub>1</sub> = 0,078'		
X <sub>2</sub> = 0,078'		
X <sub>3</sub> = 0,078'	H = X <sub>1</sub> + X <sub>2</sub> + X <sub>3</sub>	H = 0,234'
	$W_p = \frac{H}{\text{TgA}}$	W = 0,027'
L = 4,885'		
W = 2,198'	A <sub>p</sub> = (L - W <sub>p</sub> )(W)	A <sub>p</sub> = 10,678 pies <sup>2</sup>
	C. FACTORES DE FORMA	
	Y = X/W	Y <sub>1</sub> = 0,035'
		Y <sub>2</sub> = 0,035'
		Y <sub>3</sub> = 0,035'
		Y <sub>3-w</sub> = 0
		Y <sub>p-2</sub> = 0,071'
		Y <sub>1-3</sub> = 0,071'
		Y <sub>p-3</sub> = 0,106'
		Y <sub>p-w</sub> = 0
		F <sub>p-1</sub> = 0,966'
		F <sub>1-2</sub> = 0,966'
		F <sub>2-3</sub> = 0,966'

$$F = \sqrt{1 + Y^2} - Y$$

$$\begin{aligned}
 F_{3-w} &= 1' \\
 F_{p-2} &= 0,932' \\
 F_{1-3} &= 0,932' \\
 F_{p-3} &= 0,900' \\
 F_{p-w} &= 1'
 \end{aligned}$$

## D. COEFICIENTES RADIOACTIVOS

$$h_{i-j} = \frac{\sigma(T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j)}{\frac{1}{\epsilon_i} + \frac{1}{\epsilon_j} + \frac{1}{F_{i-j}} - 2}$$

$$T_p = 174^\circ\text{F} = 634^\circ\text{R}$$

$$T_1 = 167^\circ\text{F} = 627^\circ\text{R}$$

$$\epsilon_p = 0,925$$

$$\epsilon_1 = 0,341 \text{ (Para } T_p)$$

(Tabla II)

$$T_2 = 148,2^\circ\text{F} = 608,2^\circ\text{R}$$

$$\bar{\epsilon}_2 = 0,3435 \text{ (Para } T_1)$$

(Tabla II)

$$T_{3in} = 129,4^\circ\text{F} = 589,4^\circ\text{R}$$

$$\epsilon_p = 1$$

$$T_{Afin} = 97^\circ\text{F}$$

$$T_{ain} = 90^\circ\text{F}$$

$$T_A = 553,5^\circ\text{R}$$

$$T_w = 75,72^\circ\text{F}$$

$$\epsilon_w = 1$$

$$T_A = \frac{T_{Ain} + T_{Afin}}{2}$$

$$T_w = 0,04114 T_A^{1,5}$$

$$hr_{p-1} = 0,564 \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie}^2-\text{°F}}$$

$$hr_{1-2} = 0,331 \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie}^2-\text{°F}}$$

$$hr_{2-3} = 0,499 \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie}^2-\text{°F}}$$

$$T_A = 93,5^\circ\text{F}$$

$$T_w = 535,72^\circ\text{R}$$

$$hr_{3-w} = 1,164 \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie}^2-\text{°F}}$$

$$\tau_1 = 0,532 \text{ (Para } T_p) \\ \text{(Tabla II)}$$

$$hr_{p-2} = F_{p-2} \tau_1 E_2 \sigma \frac{(T_p^4 - T_2^4)}{(T_p - T_2)}$$

$$hr_{p-2} = 0,279 \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie}^2-\text{°F}}$$

$$\tau_2 = 0,530 \text{ (Para } T_1) \\ \text{(Tabla II)}$$

$$hr_{1-3} = F_{1-3} \tau_2 E_1 \sigma \frac{(T_1^4 - T_{3in}^4)}{(T_p - T_{3in})}$$

$$hr_{1-3} = 0,219 \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie}^2-\text{°F}}$$

$$hr_{p-3} = F_{r-3} \tau_1 \tau_2 \sigma \frac{(T_p^4 - T_{3in}^4)}{(T_p - T_{3in})}$$

$$hr_{p-3} = 0,399 \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie}^2-\text{°F}}$$

### E. COEFICIENTES CONVECTIVOS

$$T_x = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$T_{x1} = 170,5 \text{ °F}$$

$$T_{x2} = 157,6 \text{ °F}$$

$$T_{x3} = 148,2 \text{ °F}$$

$$\left. \begin{array}{l} a_1 = 1,118 \times 10^6 \\ a_2 = 1,236 \times 10^6 \\ a_3 = 1,321 \times 10^6 \end{array} \right\} \frac{1}{\text{°F-pie}^3}$$

$$\left. \begin{array}{l} \mu_1 = 1,394 \times 10^{-5} \\ \mu_2 = 1,374 \times 10^{-5} \\ \mu_3 = 1,360 \times 10^{-5} \end{array} \right\} \frac{\text{Lb}}{\text{pie-seg}}$$

$$\left. \begin{array}{l} C_{p1} = 0,241 \\ C_{p2} = 0,241 \\ C_{p3} = 0,240 \end{array} \right\} \frac{\text{BTU}}{\text{Lb}_m-\text{°F}}$$

$$\left. \begin{array}{l} k_1 = 0,017 \\ k_2 = 0,017 \\ k_3 = 0,016 \end{array} \right\} \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie-°F}}$$

$$R_a = X^3 (T_i - T_j) \frac{a C_p}{k} \mu (3.600)$$

$$N_u = 1,44 \left\{ 1 - \frac{1708}{R_a} \right\} + \left( \frac{R_a}{5830} \right)^{1/3}$$

$$h_c = \frac{N_u k}{X}$$

$$R_{a1} = 2642,147$$

$$R_{a2} = 7732,456$$

$$R_{a3} = 8655,201$$

$$N_{u1} = 1,277$$

$$N_{u2} = 2,221$$

$$N_{u3} = 2,297$$

$$\left. \begin{array}{l} hc_{p-1} = 0,278 \\ hc_{1-2} = 0,484 \\ hc_{2-3} = 0,471 \end{array} \right\} \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}}$$

$$V'_{\text{viento}} = 0,5 \text{ mt/seg}$$

$$V_v = 2,237 V'_v$$

$$hc_{3-w} = 1 + 0,3 (V_v)$$

$$V_v = 1,119 \frac{\text{millas}}{\text{hr}}$$

$$hc_{3-w} = 1,201 \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}}$$

#### F. CALCULO DEL CALOR PERDIDO POR ARRIBA

$$R_{2-3} = \frac{1}{hc_{2-3} + hr_{2-3}}$$

$$R_{2-3} = 1,031 \frac{\text{hr-pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}}{\text{BTU}}$$

$$R_{p-1} = \frac{1}{hc_{p-1} + hr_{p-1}}$$

$$R_{p-1} = 1,187 \frac{\text{hr-pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}}{\text{BTU}}$$

$$R_{1-2} = \frac{1}{hc_{1-2} + hr_{1-2}}$$

$$R_{1-2} = 1,227 \frac{\text{hr-pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}}{\text{BTU}}$$

$$R_{p-2} = \frac{1}{R_{1-2} + R_{p-1} + hr_{p-2}}$$

$$R_{p-2} = 1,442 \frac{\text{hr-pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}}{\text{BTU}}$$

$$X_{p1} = 0,01'$$

$$k_{p1} = 0,1083 \frac{\text{BTU}}{\text{hr. pie}^{\circ}\text{F}}$$

$$R_{p-3} = \frac{1}{\frac{1}{R_{p-2} + R_{2-3}} + \text{hr}_{1-3} + \text{hr}_{p-3}}$$

$$R_1 = \frac{X_{p1}}{k_{p1}}$$

$$R_{3-w} = \frac{1}{\text{hr}_{3-w} + hc_{3-w}}$$

$$R_T = R_{p-3} + R_1 + R_{3-w}$$

$$U_t = \frac{1}{R_T}$$

$$Q_t = A_p U_t (T_p - T_a)$$

$$R_{p-3} = 1,022 \frac{\text{hr. pie}^2 \text{ } ^{\circ}\text{F}}{\text{BTU}}$$

$$R_1 = 0,092 \frac{\text{hr. pie}^2 \text{ } ^{\circ}\text{F}}{\text{BTU}}$$

$$R_{3-w} = 0,40 \frac{\text{hr. pie}^2 \text{ } ^{\circ}\text{F}}{\text{BTU}}$$

$$R_T = 1,514 \frac{\text{hr. pie}^2 \text{ } ^{\circ}\text{F}}{\text{BTU}}$$

$$U_t = 0,661 \frac{\text{BTU}}{\text{hr. pie}^2 \text{ } ^{\circ}\text{F}}$$

$$Q_t = 568,182 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

#### G. CALCULO DEL CALOR UTIL

$$T_E = 100^{\circ}\text{F}$$

$$T_S = 158,6^{\circ}\text{F}$$

$$T_m = \frac{T_E + T_S}{2}$$

$$T_m = 129,3^{\circ}\text{F}$$

$$C_p = 0,240 \text{ BTU/Lbm. } ^{\circ}\text{F}$$

$$\rho = 0,068 \text{ Lbm/pie}^3$$

$$\mu = 1,330 \times 10^{-5} \text{ Lbm/pie. Seg.}$$

$$D_D = 0,292 \text{ pies} \quad A_D = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A_D = 0,067 \text{ pie}^2$$

$$V = 36000 \text{ pies/hr}$$

$$m = \rho VA_3$$

$$m = 164,02 \text{ Lb/hr}$$

$$Q_u = C_p m (T_s - T_E)$$

$$Q_u = 2306,78 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

$$D_H = 0,292 \text{ pies} \quad R_e = \frac{D_H V \rho}{\mu}$$

$$R_e = 14929,323$$

#### H. CALCULO DEL CALOR PERDIDO POR EL FONDO

$$X_{ai} = 0,167'$$

$$X_M = 0,042'$$

$$X_T = X_{ai} + X_M$$

$$X_T = 0,209'$$

$$k_{ai} = 0,032 \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie} \cdot ^\circ\text{F}}$$

$$k_m = 0,034 \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie} \cdot ^\circ\text{F}}$$

$$R_F = \frac{X_{Ai}}{k_{Ai}} + \frac{X_M}{k_M}$$

$$R_F = 6,454 \frac{\text{hr-pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}}{\text{BTU}}$$

$$hc_{m-w} = hc_{3-w}$$

$$hc_{m-w} = 1,201 \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}}$$

$$T_m = 54818^\circ\text{R}$$

$$\epsilon_m = 0,87$$

$$hr_{m-w} = \sigma E_m (T_m^2 + T_w^2) (T_m + T_w)$$

$$hr_{m-w} = 0,951 \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}}$$

$$R_{m-w} = \frac{1}{hc_{m-w} + hr_{m-w}}$$

$$R_{m-w} = 0,465 \frac{\text{hr-pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}}{\text{BTU}}$$

$$U_F = \frac{1}{R_{m-w} + R_F}$$

$$U_F = 0,145 \frac{\text{BTU}}{\text{hr-pie}^2-\text{°F}}$$

$$A_F = W(L - 0,167')$$

$$A_F = 10,371 \text{ pie}^2$$

$$T_{ai} = 151^\circ\text{F}$$

$$Q_f = A_F U_F (T_{ai} - T_A)$$

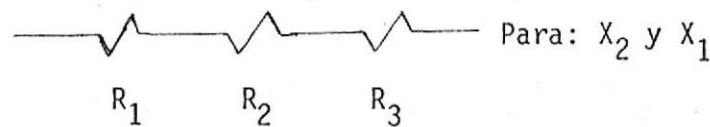
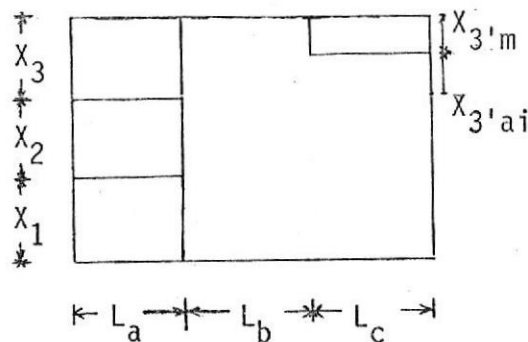
$$Q_f = 86,468 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}}$$

I. CALCULO DEL CALOR PERDIDO POR  
LOS LADOS

$$L_a = 0,068'$$

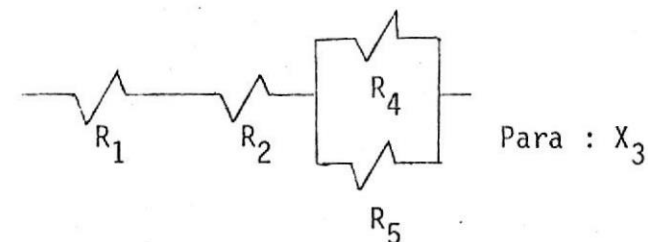
$$L_b = 0,094'$$

$$L_c = 0,078'$$



$$X_{3'm} = 0,073'$$

$$X_{3'ai} = 0,005'$$



$$R = L/k$$

$$\left. \begin{array}{l} R_1 = 2 \\ R_2 = 2,938 \\ R_3 = 2,438 \end{array} \right\} \frac{\text{hr-pie}^2-\text{°F}}{\text{BTU}}$$

$$R_4 = \frac{L_c}{k_{ai}} \left( \frac{x_3}{x_{3'ai}} \right)$$

$$R_4 = 38,086 \frac{\text{hr} \cdot \text{pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}}{\text{BTU}}$$

$$R_5 = \frac{L_c}{k_m} \left( \frac{x_3}{x_{3'm}} \right)$$

$$R_5 = 2,451 \frac{\text{hr} \cdot \text{pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}}{\text{BTU}}$$

$$R_{3'} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}$$

$$R_{3'} = 2,303 \frac{\text{hr} \cdot \text{pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}}{\text{BTU}}$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 \quad \delta$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_{3'}$$

$$U_L = 1/R_T$$

$$\left. \begin{array}{l} U_{L1} = 0,136 \\ U_{L2} = 0,136 \\ U_{L3} = 0,138 \end{array} \right\} \frac{\text{BTU}}{\text{hr} \cdot \text{pie}^2 \cdot ^\circ\text{F}}$$

$$A_{L-A} = (X)(W)$$

$$\left. \begin{array}{l} A_{L-A-1} = 0,171 \\ A_{L-A-2} = 0,171 \\ A_{L-A-3} = 0,171 \end{array} \right\} \text{PIES}^2$$

$$Q_{L-A} = A_{L-A} V_L (T_{ES} - T_A)$$

$$T_{ES-1-D} = 160,4$$

$$Q_{L-A-1-D} = 1,621 \text{ BTU/hr}$$

$$T_{ES-1-I} = 127,4^\circ\text{F}$$

$$Q_{L-A-1-I} = 0,788 \text{ BTU/hr}$$

$$T_{ES-2-D} = 158^\circ\text{F}$$

$$Q_{L-A-2-D} = 1,5 \text{ BTU/hr}$$

$$T_{ES-2-I} = 126,8^\circ\text{F}$$

$$Q_{L-A-2-I} = 0,774 \text{ BTU/hr}$$

$$T_{ES-3-D} = 144,8^\circ\text{F}$$

$$Q_{L-A-3-D} = 1,211 \text{ BTU/hr}$$

$$T_{ES-3-I} = 132,6^\circ\text{F}$$

$$Q_{L-A-3-I} = 0,923 \text{ BTU/hr}$$

$$A_{L-L} = (X)(L)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{L-L-1} &= 0,381 \\ A_{L-L-2} &= 0,381 \\ A_{L-L-3} &= 0,381 \end{aligned} \right\} \text{PIES}^2$$

$$Q_{L-L} = 2A_{L-L} U_L (T_{ES} - T_A)$$

$$T_{ES-L-1} = 141^\circ\text{F}$$

$$T_{ES-L-2} = 144,6^\circ\text{F}$$

$$T_{ES-L-3} = 130^\circ\text{F}$$

$$Q_{L-L-1} = 4,923 \text{ BTU/hr}$$

$$Q_{L-L-2} = 5,296 \text{ BTU/hr}$$

$$Q_{L-L-3} = 3,838 \text{ BTU/hr}$$

$$Q_{\ell} = \Sigma Q_{L-A} + \Sigma Q_{L-L}$$

$$Q_{\ell} = 20,874 \text{ BTU/hr}$$

#### J. CALCULO DE LA EFICIENCIA

$$Q_e = Q_u + Q_t + Q_f + Q_{\ell}$$

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_E} \times 100$$

$$Q_e = 2982,304 \text{ BTU/hr}$$

$$\eta = 77,35\%$$

APENDICE N°4

NOMENCLATURA

A	=	área (PIE <sup>2</sup> )
c <sub>p</sub>	=	calor específico (BTU/Lbm - °F)
d	=	factor de suciedad
e	=	exponencial
F''	=	factor de flujo
F <sub>r</sub>	=	factor de calor removido
F'	=	factor de eficacia
g	=	gravedad (Pies / seg <sup>2</sup> )
G <sub>r</sub>	=	número de grashof
h	=	coeficiente de transferencia de calor(BTU/hr - pie <sup>2</sup> - °F)
I	=	intensidad de radiación solar
K	=	coeficiente de extinción
k	=	conductividad térmica (BTU/hr - pie - °F)
L	=	longitud (Pie)
m	=	masa (Lbm)
N	=	número de cubiertas, días
Nu	=	número de nusselt
n'	=	índice de refracción
p	=	presión (Pulg. H <sub>2</sub> O)

$P_r$	=	número de Prandl
$Q$	=	calor (BTU/hr)
$R_a$	=	número de raleigh
$R_e$	=	número de Reynold
$r$	=	reflectividad
$s$	=	factor de sombra
$T$	=	temperatura ( $^{\circ}F$ )
$t$	=	tiempo (seg)
$U$	=	coeficiente de transferencia de calor total (BTU/hr-pie <sup>2</sup> - $^{\circ}F$ )
$v$	=	velocidad (pie/seg)
$V$	=	volumen (pie <sup>3</sup> )
$x$	=	espesor (pie)

## SIMBOLOS GRIEGOS

$\alpha$	=	absortividad
$\Delta$	=	diferencia, cambio
$\epsilon$	=	emisivad
$\eta$	=	eficiencia
$\phi, \theta$	=	ángulo
$\mu$	=	viscosidad dinámica
$\nu$	=	viscosidad cinématica
$\rho$	=	densidad
$\sigma$	=	constante de Stefan-Boltzman
$\tau$	=	transmitancia

ANGULOS

A	=	altitud
D	=	declinación
H	=	horario
L	=	latitud
i	=	incidencia
i'	=	refracción

SUBESCRITOS

A	=	aire ambiental, ancho
a	=	absorbida
ai	=	aislamiento
ab	=	absorvedor
c	=	caliente, convección
cb	=	cubierta
cj	=	caja
cr	=	crítico
cs	=	constante solar
d	=	difusa
D	=	directa, derecha, ducto
e	=	entrada
f	=	frío, fondo
I	=	izquierda

l	=	local, lateral, largo
m	=	media
max	=	máxima
min	=	mínima
ms	=	mediodía solar
n	=	enésima
N	=	normal
H	=	horizontal
o	=	condiciones normales, equilibrio
opt	=	óptima
p	=	pérdidas, placa
pl	=	plexiglass
r	=	radiación, reflejada
s	=	salida
st	=	estandar
T	=	total, teflón
t	=	arriba, tope
u	=	útil
v	=	viento, vidrio
w	=	cielo

APENDICE N° 6

TEORIA DE ERRORES

Hallaremos el error absoluto de cada función, el cual es igual a la derivada parcial de esta función con respecto a cada una de las variables que depende la función, multiplicada por la desviación de cada una de las variables, esto es:

$$X = F(a, b, c, \dots\dots\dots)$$

$$\Delta a = \frac{\partial X}{\partial a} \delta a$$

$$\Delta K = \frac{\partial X}{\partial K} \delta K$$

Siendo el mas probable valor del efecto resultante igual a:

$$\Delta X = (\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta c^2 + \dots\dots\dots)^{1/2}$$

Fueron encontradas las siguientes desviaciones para cada uno de los parámetros:

PARAMETRO	I DESVIACION NUMERICA
X	$\pm 0,005$ (PIES)
T	$\pm 2$ ( $^{\circ}\text{F}$ )
L	$\pm 0,031$ PIES)
W	$\pm 0,031$ (PIES)
$A_p$	$\pm 0,167$ (PIES <sup>2</sup> )
A	$\pm 0,166$ (PIES <sup>2</sup> )
F	$\pm 0,006$ (PIES)
hr	$\pm 0,004$ (BTU/hr - pie <sup>2</sup> - $^{\circ}\text{F}$ )
$N_u$	$\pm 0,186$
hc	$\pm 0,043$ (BTU/hr - pie <sup>2</sup> - $^{\circ}\text{F}$ )
$U_t$	$\pm 0,019$ (BTU/hr - pie <sup>2</sup> - $^{\circ}\text{F}$ )
$Q_t$	$\pm 27,28$ (BTU/hr)
$Q_u$	$\pm 287,131$ (BTU/hr)
$Q_F$	$\pm 5,093$ (BTU/hr)
$Q_L$	$\pm 1$ ( BTU/hr)
$Q_E$	$\pm 288,47$ (BTU/hr)
$\eta$	$\pm 12,1$ (%)

## BIBLIOGRAFIA

1. AMETEK, Solar energy handbook theory and applications, Chilton book company, Radnor (USA), 179 pag. 1979.
2. AMSTRONG P., How weather persistence affects performance of solar heating systems, Tesis de la Universidad de Colorado (USA), 57 pag. 1980.
3. BARDUO P., Sol y arquitectura, Gustavo Gili, Barcelona (España), 171 pag. - , 1980.
4. BRINKWORTH B., Energía Solar para el hombre, Blume, Madrid (España), 244 pag., 1981.
5. BUCHBERG H., Natural Convection in enclosed spaces-a review of - application to solar energy collection, asme U.S.A., Journal of heat transfer pag. 182 - 188, mayo de 1976.
6. CLARK E., ROBERTS W., GRIMES J., Y EMBREE E., NBS, Washington (USA), 91 pag., 1979.
7. DUFFIE J. Y BECKMAN W., Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, New York (USA), 762 pag., 1980.

8. FENTON R. Y DONAHUE P., Solar space heaters for low-income families, Springfield (USA), 21 pag., 1978.
9. GONZALEZ J., Energía Solar, Alhambra, Madrid (España), 56 pag., 1978.
10. HILL J., STREED E., GEIST J. KUSUDA T., Development of proposed standards for testing solar collectors and thermal storage devices, NBS, Washington (USA), 258 pag., 1976.
11. HOWELL Y. Y BERENY J., Enggineer's guide to solar energy, SEIS, San Mateo (USA), 323 pag., 1979.
12. JENKINS J., HILL J. Y JONES D., Experimental verification of a standar test procedure for solar collectors, NBS, Washington (USA), 126 pag., 1978.
13. KAYS W., Convective heat and mass transfer, McGraw Hill, New York - (USA), 387 pag., 1966.
14. KREIDER J. KREITH F., Solar energy Handbook, McGraw Hill, New York - (USA), 29 cap., 1981.
15. KREIDER J. Y KREITH F., Solar heating and cooling, McGraw Hill, New York (USA), 342 pag. 1977.

16. KREITH F., Principios de transferencia de calor, HHS S.A., Mexico (Mexico), 672 pag., 1968.
17. LEUNG C., Methodology of Computing average daily solar insolation on inclined surfaces, renewable energy review journal: vol.2, N°1, (USA), pag. 25-33, julio,1980.
18. LUCAS T., How to build a solar heater, Ward Ritchie Press, New York (USA), 238 pag. 1977.
19. LUNDE P. Solar thermal engineering space heating and hot water systems, John Wiley & Sons, New York (USA), 603 pag., 1980.
20. MATTOX D., Evaluation of heat transfer enhancement in air-heating collectors, DOE, Washington (USA), 5 cap., 1979.
21. McCARTNEY K., Agua caliente solar, manual práctico, Blume, Madrid (ESPAÑA), 186 pag., 1980.
22. McVEIGH B., Sun power, Pergamon Press, Gran Bretaña, 208 pag., 1977.
23. MEINEL A. Y MEINEL M., Applied solar energy an introduction, Adison-Wesley, Massachusetts (USA),651 pag. 1977.

24. PAZMIÑO M., Clima y diseño arquitectónico en Guayaquil, ESPOL, Guayaquil, 15 pag., 1981.
25. PAMIÑO M., Energía Solar Teoría y experimentos, ESPOL, Guayaquil, (Ecuador), 165 pag., 1981.
26. RANI U., GARG-H y MALHOTRA A., Minimizing convective heat losses in flat plate solar collectors, pergamow press, Inglaterra, Solar Energy Vol.25 pag.521-526., 1980.
27. RANKINS W. Y WILSON D., The Solar energy notebook, Lourien House, Black Mountain (USA) 56 pag., 1980.
28. RAPP D., Solar energy, Prentice Hall, Englewood Cliffs (USA), 516 pag. 1981.
29. RIBBANS R., Teflón Film, as inner glazing in flat plate solar collectors Du pont Inc., wilmington (USA), 5 pag., 1979.
30. SANTELLI F., Heat transfer from a vee-corrugated absorber in a solar - air heater, Tesis de la Universidad de Kentucky, (USA), 94 pag., 1980.
31. SIEGEL R. Y HOWELL J., Thermal Radiation heat transfer, McGraw Hill, New York (USA), 814 pag., 1972.

32. THRELKELD J., Ingeniería del ámbito térmico, Prentice Hall Int., España, 501, pag., 1973.
  
33. WINTER F. y FITZGERALD L. The financial incentives for the fabrication of improved absorption coatings for the flat plate collector, International solar energy society, Canada, 24 pag., Agosto, 1976.