

741 106



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**SUMINISTRO DE ENERGIA TERMICA Y ELECTRICA A UNA  
CASA HABITACION MEDIANTE EL APROVECHAMIENTO  
DE LA ENERGIA SOLAR.**

**T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A N**

**FRANCISCO JAVIER REVILLA BELTRI  
BERNARDO SHIRASAGO GERMAN  
SERGIO MUÑIZ VALDEZ  
GERARDO GARCIA REYES  
CIUDAD UNIVERSITARIA 1981**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## I N D I C E

	Página
INTRODUCCION	1
CAPITULO I.      CONCEPTOS BASICOS DE ENERGIA SOLAR	5
I.1.      Radiación Solar	5
I.1.1    El Sol	5
I.1.2    Constante Solar	6
I.1.3    Variación de la Radiación Extraterres- tre.	7
I.1.4    Definiciones	7
I.1.5    Dirección de la Radiación Directa	9
I.1.6    Relación de la Radiación Directa Sobre una Superficie Inclínada a una Superficie Horizontal	11
I.1.7    Radiación Extraterrestre Sobre una Superficie Horizontal	12
I.2      Radiación Solar Disponible	13
I.2.1    Definiciones	13
I.2.2    Indice de Claridad	14
I.2.3    Componentes Directa y Difusa de Ra- diación Horaria	14
I.2.4    Estimación de la Radiación Horaria a partir de Datos Diarios	15
I.2.5    Radiación Total Sobre Superficies - Inclinadas Fijas	17
I.3      Transmisión a Través de Cubiertas y Absorción por Colectores	20
I.3.1    Reflexión de la Radiación	20
I.3.2    Absorción de la Radiación	23
I.3.3    Propiedades Ópticas de los Sistemas de Cubierta	24
I.3.4    Transmitancia para la Radiación Di- fusa	26
I.3.5    Producto Transmitancia-Absortancia	29
I.3.6    Dependencia de la Transmitancia So- bre el Espectro	30

	Página
I.3.7 Radiación Solar Absorbida	31
<b>CAPITULO II</b> Suministro de Energía Térmica	33
II.1 Teoría de los Colectores Planos	33
II.1.1 Descripción General de los Colectores Planos	33
II.1.2 Ecuación Básica del Balance de - Energía del Colector Plano	35
II.1.3 Distribuciones de Temperatura en un Colector Plano	36
II.1.4 Coeficiente Total de Transferencia de Calor del Colector	40
II.1.5 Distribución de Temperatura entre Tubos y Factor de Eficiencia del - Colector	47
II.1.6 Distribución de la Temperatura en la Dirección del Flujo	54
II.1.7 Factor de Extracción de Calor del Colector	56
II.1.8 Temperatura Media del Fluido y de la Placa	58
II.1.9 Producto Efectivo Transmittancia-Ab-sortancia	60
II.1.10 Efectos de Polvo y Sombreado	64
II.1.11 Efectos de Capacidad de Calor en el Rendimiento de Colectores Planos	65
II.1.12 Consideraciones de Diseño para el - Colector	66
II.2 Superficies Selectivas	69
II.3 Almacenamiento de Energía	71
II.3.1 Almacenamiento de Agua	71
II.3.2 Capacidad de Almacenamiento de Ener-gía	71
II.3.3 Consideraciones de Diseño para el - Termo-Tanque	73
II.4 Sistemas de Circulación Natural	75
II.4.1 Circulación Natural en el Sistema - Colector Termo-Tanque	77
II.4.2 Flujo de Masa	76
II.5 Diseño y Simulación del Colector - Termo-Tanque	85
II.6 Sistema Pasivo de Climatización So-lar	129

II.6.1	Sistemas Pasivos de Calentamiento Solar	130
II.6.2	Selección del Sistema Pasivo de Calentamiento Solar	131
II.6.3	Muro Trombe	133
II.6.4	Consideraciones de Diseño para el Muro Trombe	138
II.7	Determinación de la Carga de Calefacción y Criterios de Confort	139
II.7.1	Método Dia-Grado	139
II.7.2	Criterios de Confort	140
II.8	Propiedades y Efectos de los Materiales	143
II.8.1	Balance de Temperatura en el Interior de la Construcción	143
II.8.2	Calor Entrante Sobre la Superficie Exterior del Material	144
II.8.3	Efectos de Humedad	145
II.8.4	Deterioro de Materiales	146
II.8.5	Transmisión de Calor en los Materiales	147
II.9.	Diseño del Muro Trombe	148
CAPITULO III	Conversión Directa de Luz Solar en Energía Eléctrica	154
III.1.1	El Efecto Fotovoltaico	154
III.1.2	Bandas de Energía	155
III.1.3	Cristales Semiconductores	160
III.1.4	Drogado de los Cristales	162
III.1.5	La Unión P-N	165
III.2	Bandas de Energía en Celdas Solares	173
III.3	Efectos de la Luz Incidente en un Diodo	185
III.4	Celdas Solares	197
III.4.1	La Celda Solar Convencional de Silicio	197
III.4.2	Celda de Silicio Policristalino	206
III.4.3	Celdas de Sulfuro de Cadmio	207
III.4.4	Celdas Solares de Arseniuro de Galio	211
III.4.5	Efectos de la Temperatura	213

	Página	
III.5	Sistemas Fotovoltaicos	218
III.5.1	El Generador Fotovoltaico	218
III.5.2	Diseño de Sistemas Fotovoltaicos	223
III.5.3	Cálculo Estimado del Sistema	232
III.6	Baterías Recargables	236
<b>CAPITULO IV</b>	<b>Conversión de Corriente Directa en Alterna</b>	<b>241</b>
IV.1.1	Tiristores o Semiconductores Controlados de Silicio	241
IV.1.2	Métodos de Disparo del SCR	245
IV.1.3	Características del Tiristor	246
IV.2.1	Transistor Unijuntura (Unijunction Transistor)	260
IV.3.1	Circuito Inversor	265
IV.3.2	Clasificación de los Circuitos Inversores	271
IV.3.3	Circuito Inversor Clase C, Murray-Bedford	274
IV.3.4	Filtro para la Eliminación de Armónicas	279
IV.3.5	Diseño del Circuito Inversor y del Filtro	281
IV.4.1	Circuito de Control o de Disparo - del Inversor	290
<b>APENDICES:</b>		
	APENDICE A. Programas para el Diseño y Simulación	304
	APENDICE B. Condiciones Climatológicas de la Rumorosa, Baja California Norte	337
	APENDICE C. Planos de la Casa	341
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>346</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>350</b>

## I N T R O D U C C I O N

El propósito de este trabajo es dar a conocer una metodología de diseño para el aprovechamiento de la energía solar en viviendas. Esta metodología se aplicará a una casa habitación de dimensiones adecuadas para alojar a cuatro personas.

La energía solar disponible en la Republica Mexicana es cuantiosa, debido a que nuestro país se encuentra dentro de la zona de máxima insolación anual en el mundo, motivo por el cual consideramos de interés el desarrollo de este trabajo.

El aprovechamiento de la energía solar es una solución completamente factible a problemas de climatización y de suministro de energía eléctrica. El sol es una fuente energética limpia, capaz de proporcionar en forma parcial o total las condiciones necesarias para el acondicionamiento térmico en las diversas zonas climáticas. Con el constante aumento en el costo de los hidrocarburos, es posible anticipar una rápida expansión a corto plazo de la tecnología solar con aplicaciones a la vivienda principalmente en zonas rurales.

La climatización de la vivienda se hará por medio de un Sistema Pasivo de Climatización Solar (SPCS) el cuál no requiere de dispositivos electromecánicos accionados con energético convencional. Otras características importantes de estos sistemas son su baja inversión inicial, rápida amortización, mantenimiento mínimo, integración estructural a la vivienda y larga durabilidad. Además por lo general se emplean materiales disponibles en la región.

La localización de la vivienda tiene las siguientes características:

Localidad : La Rumorosa  
Municipio : Tecate  
Estado : Baja California Norte  
Altitud : 1 232 mts.  
Longitud : 116° 02' 47"  
Latitud : 32° 32' 55"  
Clima : Templado

Para la elección de la localidad anterior, se consideró principalmente el hecho de que esta zona cuenta con una radiación global (media diaria) de 475-500 Cal/m<sup>2</sup>-día y 275-300 hrs., mensuales de insolación, por lo que puede decirse que goza de magníficas condiciones de insolación. Esto hace todavía más factible el diseño, pues al contar con tal cantidad de radiación solar, se reduce la complejidad del sistema y consecuentemente los costos del mismo.

Debido a que en la localidad seleccionada se llegan a registrar temperaturas por debajo de 0°C prácticamente durante medio año, es necesario dotar a las viviendas durante este período, de acondicionamiento térmico para el confort de sus habitantes, y así mismo, de dotación de agua caliente para uso doméstico.

Sin embargo cabe señalar que para el diseño se pudo haber escogido cualquier otro lugar, ya que esta metodología no está restringida a una localidad específica. Para otras localidades, simplemente varían los parámetros de diseño de acuerdo a las ca-

racterísticas de localización y condiciones climáticas respectivas.†

Otro aspecto muy importante del aprovechamiento de la energía solar en viviendas es la conversión de la energía solar en energía eléctrica, la cual se efectúa en forma directa aprovechando el llamado "Efecto Fotovoltáico" por medio de celdas solares.

La principal ventaja de estas celdas es su versatilidad, ya que, interconectando el número adecuado de ellas, es factible satisfacer casi cualquier requerimiento de potencia eléctrica, de donde resulta el enorme potencial de estos dispositivos para la generación local de energía eléctrica, aprovechable en zonas rurales o remotas.

No hay duda de la factibilidad técnica de generación de electricidad con estos dispositivos fotovoltaicos, ya que han sido utilizados por muchos años en los programas espaciales y en la provisión de energía en áreas remotas del mundo, pero un obstáculo muy importante a su comercialización es el elevado costo actual de los mismos.

El trabajo desarrollado para lograr reducir dicho costo puede dividirse en tres categorías generales:

- 1.- Reducción del costo de manufactura de las celdas de cristal simple de Silicio, actualmente disponibles en el mercado.
- 2.- Desarrollo de técnicas para producir en masa e incrementar

† En lo referente al SPCS, el diseño es totalmente diferente para una condición climatológica específica.

tar la eficiencia de las celdas hechas de delgadas capas de materiales tales como Sulfuro de Cadmio (CdS), Sulfuro de Cobre ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) y Silicio amorfo.

3.- Desarrollo de celdas de alta eficiencia para instalarse en el foco de sistemas de amplificación óptica.

Para la conversión de la corriente directa proveniente de las celdas solares, a corriente alterna, con el objeto de poder suministrarla a aparatos domésticos convencionales, se mostrará junto con sus principales componentes, un "Circuito Inversor" de estado sólido, el cual tiene como principales características una alta eficiencia y un bajo mantenimiento.

En este trabajo, los sistemas de suministro de energía térmica y energía eléctrica de la vivienda se harán en forma independiente, debido a que son menos sofisticados y por consiguiente -- más económicos.

## CAPITULO I

C O N C E P T O S    B A S I C O S    D E  
E N E R G I A    S O L A R

---

## I.1 RADIACION SOLAR

Esta sección señala las características de la energía solar fuera de la atmósfera terrestre y los efectos de ésta en la atenuación de la radiación.

Se hace un bosquejo de las características de la energía resultante disponible en la superficie de la tierra, y sus características direccionales. Consideramos la radiación en un rango de longitud de onda de 0.3 a 3.0 micrones, que es la porción del espectro que incluye la mayor parte de la energía radiada por el sol.

En general, no es práctico predecir la intensidad y distribución del espectro que se espera en la superficie terrestre, a partir del conocimiento de la radiación extraterrestre.

Los datos meteorológicos para tales cálculos son raramente disponibles, y por lo tanto se recurre generalmente a tomar mediciones. Sin embargo, un conocimiento de la naturaleza de la radiación extraterrestre, atenuación atmosférica y los efectos de orientación de una superficie captadora, son importantes para el conocimiento y empleo de los datos de radiación solar.

## I.1.1 EL SOL

El sol es un conglomerado de materia gaseosa intensamente caliente con un diámetro de  $1.39 \times 10^9$  metros y está aproximada -

mente a  $1.5 \times 10^{11}$  metros de la tierra.

Como se ha observado desde la tierra, el sol rota sobre su eje aproximadamente una vez cada 4 semanas. Sin embargo no rota como un cuerpo sólido; el ecuador toma cerca de 27 días y las regiones polares alrededor de 30 días para cada rotación.

El sol tiene una temperatura efectiva (considerándolo como cuerpo negro) de  $5762^\circ\text{K}$ . La temperatura de la región central interna está estimada de  $8 \times 10^6$  a  $40 \times 10^6$   $^\circ\text{K}$ . La densidad es más o menos cien veces la del agua.

El sol es en efecto un reactor de fusión continua con sus gases constituyentes retenidos por fuerzas gravitacionales.

La fusión más importante es en la cual el hidrógeno (4 protones) se combina para formar helio (un núcleo de helio): la masa del núcleo del helio es menor que la masa de los 4 protones, se ha registrado entonces, una pérdida de masa en la reacción, que se ha convertido en energía.

Esta energía es producida en el interior de la esfera solar a muchos millones de grados. Esta es transferida fuera de la superficie siendo radiada hacia el espacio.

### I.1.2 CONSTANTE SOLAR

La constante solar,  $G_{sc}$ , es la energía del sol, por unidad de tiempo, recibida sobre una área unitaria de superficie perpendicular a la dirección de la propagación de la radiación, a una distancia media entre la tierra y el sol, fuera de la atmósfera. Se han hecho varios estudios para evaluar la constante solar, conforme la tecnología ha avanzado se ha llegado

a un valor estimado de  $1353 \text{ W/m}^2$  con una incertidumbre de - -

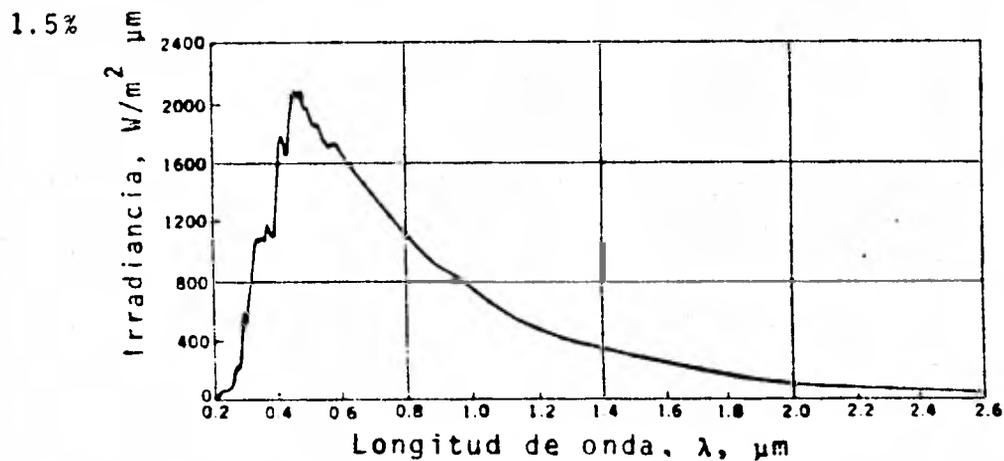


Figura I.1.3,1 Espectro estándar de la irradiancia.

### I.1.3 VARIACION DE LA RADIACION EXTRATERRESTRE

Para propósitos ingenieriles, la energía emitida por el sol puede ser considerada constante.

La variación de la distancia entre la tierra y el sol, -- sin embargo, ocasiona la variación del flujo de radiación extra terrestre en el rango de  $\pm 3\%$ . La dependencia de la radiación -- extraterrestre sobre la época del año es indicada por la ecuación I.1.3.1

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360}{365} n \right) \quad \text{I.1.3.1}$$

donde  $G_{on}$  es la radiación extraterrestre medida sobre el plano normal de la radiación en el n-ésimo día del año.

### I.1.4 DEFINICIONES

Radiación directa: es la radiación solar recibida desde el sol sin haber sido dispersada por la atmósfera (se usará el subíndice "b" para la radiación directa para evitar confusión con la radiación difusa).

**Radiación difusa:** es la radiación solar recibida desde el sol después que su dirección ha sido cambiada y dispersada por la atmósfera.

**Radiación solar total:** es la suma de la radiación directa y la radiación difusa sobre una superficie (la medida más común de radiación solar, es la radiación total sobre una superficie horizontal, a menudo referida como radiación global).

**Irradiancia:** es la rapidez a la cual la energía radiante incide sobre una superficie, por unidad de área de la superficie.

**Tiempo solar:** es el tiempo basado en el movimiento angular aparente del sol a través del cielo, con medio día solar, cuando el sol cruza el meridiano del observador.

El tiempo solar es el tiempo usado en todas las ecuaciones de este trabajo. Este tiempo no coincide con el tiempo local. Por lo tanto es necesario convertir el tiempo local al tiempo solar aplicando dos correcciones: Primero, hay una constante de corrección para la diferencia en longitud entre el meridiano del observador y el meridiano sobre el cual el tiempo local está basado; el sol toma cuatro minutos para atravesar un grado de longitud. La segunda corrección es de la ecuación de tiempo, la cual toma en cuenta las perturbaciones en la variación de la rotación de la tierra, la cual afecta el tiempo en que el sol cruza el meridiano del observador. Así el tiempo solar está relacionado al tiempo local por:

$$\text{Tiempo Solar} = \text{Tiempo Local} + 4 (L_{st} - L_{Loc}) + E \quad \text{I.1.4.1}$$

donde E es la ecuación de tiempo I.1.4.2 expresada en minutos.

$L_{st}$  es el meridiano estándar para la zona de tiempo local y --  
 $L_{Loc}$  es la longitud de la localización en cuestión en grados --  
 oeste:

$$E = 9.87\text{sen}2B - 7.53\text{cos}B - 1.5\text{sen}B \quad \text{I.1.4.2}$$

$$"n" \text{ es el día del año} \quad B = \frac{360(n-81)}{364}$$

$$1 \leq n \leq 365$$

$$364$$

### I.1.5 DIRECCION DE LA RADIACION DIRECTA

Las ecuaciones geométricas entre un plano de cualquier --  
 orientación particular relativa a la tierra a cualquier hora --  
 (si este plano está fijo ó moviéndose relativamente a la tie--  
 rra), y la radiación solar entrante, esto es, la posición del  
 sol relativa a este plano, pueden ser descritas en términos de  
 varios ángulos.

Estos ángulos y relaciones entre ellos son las siguientes:

$\phi$  → Latitud, (localización angular norte ó sur desde el --  
 ecuador; positivo en el norte)  $-90^\circ < \phi < 90^\circ$

$\delta$  → Declinación, posición angular del sol al medio día so\_  
 lar con respecto al plano del ecuador.  $-23.15 < \delta < 23.45$

$\beta$  → Pendiente, ángulo entre la superficie del plano en --  
 cuestión y la horizontal.  $0^\circ < \beta < 180^\circ$

$\gamma$  → Angulo azimutal de la superficie, es la desviación de  
 la normal a la superficie proyectada sobre un plano horizontal,  
 a partir del meridiano local, con  $0^\circ$  hacia el sur, negativo hacia  
 el este y positivo al oeste,  $180^\circ < \gamma < -180$ .

$\omega$  → Angulo horario, es el desplazamiento angular del sol --  
 este u oeste, del meridiano local debido a la rotación de la --

tierra sobre su eje ( $15^\circ$  por hora), negativo en la mañana, positivo en la tarde.

$\theta$  → Angulo de incidencia, es el ángulo entre la radiación directa sobre una superficie y la normal a la superficie.

$\theta_z$  → Angulo zenital, es el ángulo subtendido por una línea vertical hacia el Zenit y la línea de vista al sol.

Angulo zenital, pendiente, y el ángulo azimutal de la superficie son mostrados en la figura I.1.5.1, la declinación,  $\delta$ , puede ser encontrada de la ecuación de Cooper (1969):

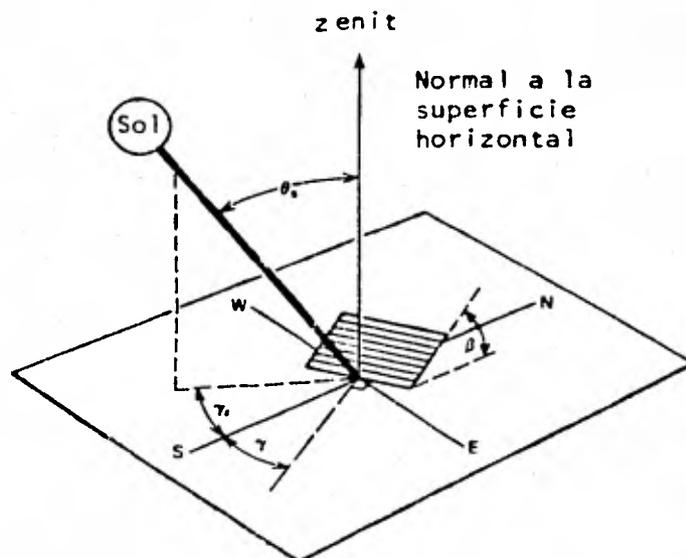


Figura I.1.5.1 Angulo zenital, inclinación, ángulo azimutal de la superficie y ángulo azimutal solar para una superficie inclinada.

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left( 360 \frac{284+n}{365} \right) \quad \text{I.1.5.1}$$

donde  $n$  es el día del año.

La ecuación que relaciona el ángulo de incidencia de la radiación directa,  $\theta$ , y los otros ángulos, es:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \phi \sin \delta \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \\ & \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \\ & \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad \text{I.1.5,2}$$

La longitud del día, se define como el número de horas-luz al día (duración de la insolación); está dada por:

$$L_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad \text{I.1.5,3}$$

#### I.1.6 RELACION DE LA RADIACION DIRECTA SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA A UNA SUPERFICIE HORIZONTAL

Para propósitos de diseños solares y cálculos de rendimiento, es necesario calcular, generalmente, la radiación horaria sobre una superficie inclinada de un colector a partir de medidas ó estimaciones de la radiación solar sobre una superficie horizontal. La mayoría de los datos disponibles están basados en superficies horizontales.

El factor geométrico,  $R_b$ , es el cociente de la radiación directa sobre una superficie inclinada a una superficie horizontal, éste puede ser calculado exactamente con el uso de la ecuación I.1.6,1:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_1} \quad \text{I.1.6,1}$$

Donde  $\cos \theta_1$  es:

$$\cos \theta_1 = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \quad \text{I.1.6,2}$$

donde la ecuación I.1.6,2 se obtiene haciendo  $\beta = 0$  en la ecuación I.1.5,2; para  $\theta_1 = 90^\circ$  en la ecuación I.1.6,2 tenemos que:

$$\cos \omega = \cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad \text{I.1.6,3}$$

donde  $\omega_s$  es el ángulo horario a la puesta del sol.

### I.1.7 RADIACION EXTRATERRESTRE SOBRE UNA SUPERFICIE HORIZONTAL

A cualquier hora la radiación solar incidente fuera de la atmósfera sobre un plano horizontal es:

$$G_o = 3600 \times G_{sc} \left\{ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360}{365} n \right) \right\} (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega)$$

I.1.7,1

Es de interés para nuestros propósitos calcular la radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal para un período definido de una hora. Integrando la ecuación I.1.7,1 para un período definido por ángulos horarios  $\omega_1$ , y  $\omega_2$  los cuales definen una hora (donde  $\omega_2$  es más grande), obtenemos:

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left\{ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360}{365} n \right) \right\} \times$$

$$\left\{ \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \right.$$

$$\left. \frac{2 \pi (\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \phi \sin \delta \right\}$$

I.1.7,2

donde  $I_o$  es la radiación horaria extraterrestre sobre una superficie horizontal.

La radiación horaria extraterrestre puede también calcularse mediante la ecuación I.1.7,1, siendo  $\omega$  el punto medio de la hora en cuestión. Ejemplo: la radiación horaria extraterrestre entre las 9 y las 10 se obtiene sustituyendo los valores correspondientes de  $\omega_1$  y  $\omega_2$  en la ecuación I.1.7,2, ó también se puede obtener sustituyendo el valor de  $\omega$  para las 9.30 en la ecuación I.1.7,1. La diferencia es muy pequeña entre estas dos secuencias de cálculo, siempre y cuando el período en estudio sea de una hora (ó menor). La cantidad de 3600 en las ecs. I.1.7,1 y I.1.7,2 es un factor para convertir de  $W/m^2$  a  $MJ/m^2$  para un intervalo de una hora.

## I.2 RADIACION SOLAR DISPONIBLE

Generalmente no es práctico basar los cálculos de la radiación solar sobre la radiación extraterrestre atenuada por la atmósfera; como dato meteorológico adecuado es raramente disponible. En cambio, para predecir el rendimiento de los sistemas solares, usaremos mediciones de radiación solar para la localidad en cuestión ó de una localidad cercana climatológicamente similar.

Los datos de radiación solar son usados de varias formas y para una variedad de propósitos. La mayoría de la información detallada que tenemos es la radiación solar directa y difusa sobre una superficie horizontal, por horas, la cuál es útil en la simulación de procesos solares. Los datos diarios son más frecuentemente disponibles (promedio diario) y la radiación horaria puede ser estimada a partir de la radiación diaria. De la referencia (1) obtuvimos la radiación global media diaria para cada mes del año, con estos datos como se citó anteriormente obtendremos la radiación horaria. Cabe señalar que en el Estado de Baja California Norte, la radiación global anual resultó ser de las más intensas junto con otros estados de la República Mexicana.

### I.2.1 DEFINICIONES

Radiación solar ó radiación de onda corta.- Es la radiación originada por el sol en el rango de longitudes de 0.3 a 3.0  $\mu\text{m}$ ., la cuál incluye las componentes directa y difusa. Esta es la radiación aprovechada por los sistemas de captación solar.

Radiación de onda larga.- Es la radiación originada o emi-

tida a partir de cuerpos a temperatura ordinaria, sustancialmente a todas las longitudes de onda mayores de 3.0  $\mu\text{m}$ .

### 1.2.2 INDICE DE CLARIDAD

Es de interés la frecuencia de ocurrencia de periodos de varios niveles de radiación, por ejemplo días despejados y días nublados.

La información sobre la frecuencia de distribución es el eslabón entre dos tipos de correlaciones: la radiación diaria total y la radiación difusa diaria, y la radiación promedio mensual total con la radiación promedio mensual difusa

Un índice horario de claridad (cielo despejado)  $K_T$ , puede ser definido como:

$$K_T = I / I_0$$

1.2.2.1

donde  $I$  es la radiación solar total medida experimentalmente sobre una superficie horizontal, esto es, la comunmente obtenida por piranómetros (solarímetros).

### 1.2.3 COMPONENTES DIRECTA Y DIFUSA DE RADIACION HORARIA

La descomposición de la radiación solar total sobre una superficie horizontal en sus componentes directa y difusa es de interés para el cálculo de la radiación total sobre superficies de otra orientación a partir de datos sobre una superficie horizontal. Para ésto se requiere del tratamiento por separado de la radiación directa y difusa.

El siguiente método para estimar la distribución está basado sobre estudios de datos obtenidos experimentalmente.

Orgill y Hollands (1977) usaron datos de estaciones canadienses para correlacionar  $I_d/I$  (fracción de la radiación horaria sobre un plano horizontal, la cuál es difusa) con el índice horario de claridad,  $K_t$ .

Para una determinada hora, las ecuaciones para la correlación son:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.249K_t & \text{para } K_t < 0.35 \\ 1.557 - 1.84K_t & \text{para } 0.35 < K_t < 0.75 \\ 0.177 & \text{para } K_t > 0.75 \end{cases}$$

#### 1.2.4 ESTIMACION DE LA RADIACION HORARIA A PARTIR DE DATOS DIARIOS

Para calcular el rendimiento de un sistema, generalmente es necesario determinar los valores horarios a partir de datos diarios. Esto no es un proceso exacto. Por ejemplo, los valores de la radiación total diaria en el rango medio entre valores para días despejados y días completamente nublados pueden provenir de varias circunstancias tales como nubes densas, intermitentes, nues claras contínuas, ó nublado denso total. Durante ciertas horas del día no hay un método para determinar éstas circunstancias a partir de datos diarios, sin embargo, el método empleado funciona mejor para días despejados.

Estudios estadísticos de la distribución de la radiación total sobre una superficie horizontal durante el día, usando datos mensuales promedio a partir de un gran número de estaciones climatológicas han llevado a generalizar las cartas de " $r_t$ ", el cociente de radiación total diaria a total horaria, como una

función de la longitud del día y hora en cuestión.

La figura I.2.4,1 muestra una de tales cartas adaptadas según Liu y Jordan (1977) y basada en Whillier (1956), (1965) y Hottel y Whillier (1958).

Las curvas están designadas para el punto medio de cada período de una hora, es decir para cada media hora a partir del medio día solar y los días se consideran simétricos en tor-

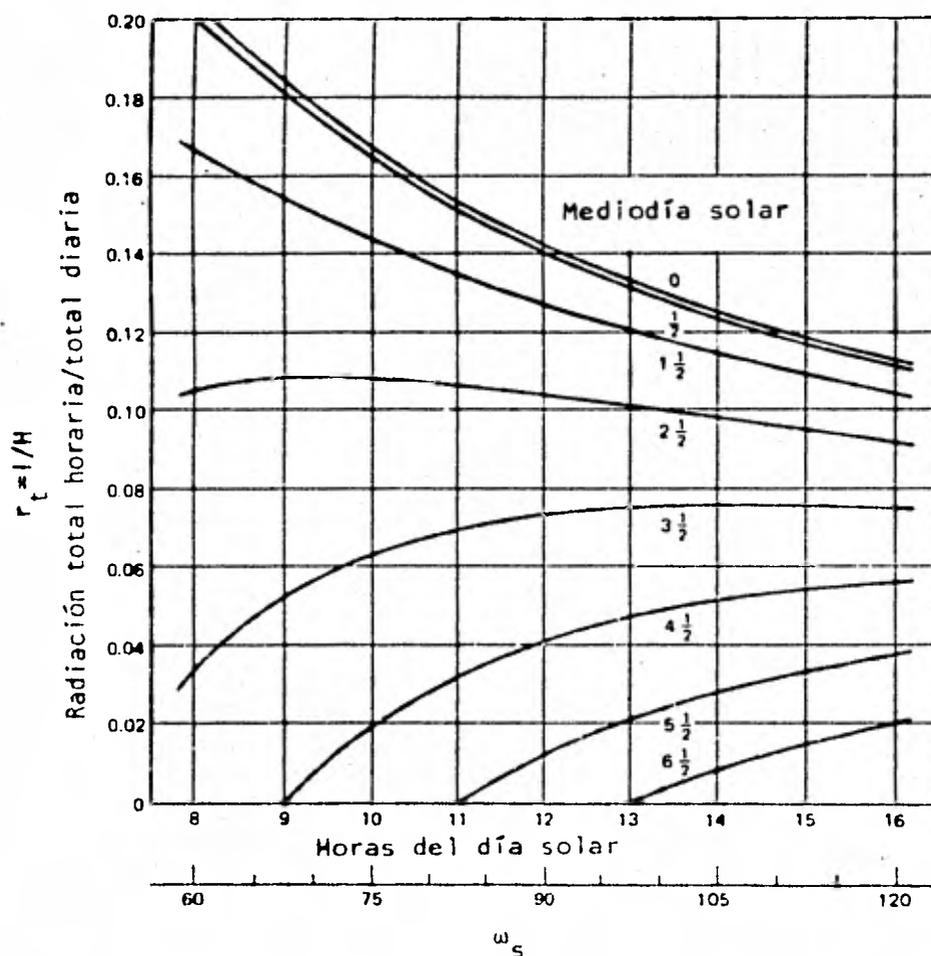


Figura I.2.4,1 Relación de la radiación total horaria a la radiación total diaria (promedio mensual) sobre una superficie horizontal.

no del mediodía solar. Una curva para el medio día solar también es mostrada. La duración de la insolación puede ser calculada de la ecuación I.1.5,3. Así, conociendo la longitud del día y la radiación total diaria puede ser estimada la radiación total horaria para días simétricos, Whillier (1956) recomienda que ésta sea usada para un día específico únicamente si este día está despejado.

Las curvas de la figura I.2.4,1 son representadas por la siguiente ecuación; Collares-Pereira y Raib (1979):

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cdot \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - (2\pi\omega_s/360) \cos \omega_s} \quad \text{I.2.4,1}$$

Por definición  $r_t = I/H$  I.2.4,2

Los coeficientes a y b están dados por:

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin (\omega_s - 60) \quad \text{I.2.4,3}$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin (\omega_s - 60) \quad \text{I.2.4,4}$$

en esta ecuación  $\omega$  es el ángulo horario en grados para el tiempo en cuestión (ejemplo el punto medio de la hora para el cual es hecho el cálculo), y  $\omega_s$  es el ángulo horario a la puesta del sol.

### I.2.5 RADIACION TOTAL SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS FIJAS

Los colectores planos absorben las componentes difusa y directa de la radiación solar. Para usar los datos de radiación total sobre una superficie horizontal y estimar la radiación sobre el plano inclinado de un colector de orientación fija, es necesario conocer R, el cociente de la radiación total sobre una superficie inclinada entre la radiación total sobre una superficie horizontal:

$$R = \frac{I_T}{I} = \frac{\text{Radiación total sobre una Superficie Inclined}}{\text{Radiación total sobre una Superficie Horizontal}} \quad \text{I.2.5,1}$$

éste puede ser expresado en términos de las contribuciones de la radiación directa y difusa:

$$R_b = \frac{\text{Radiación directa sobre una Superficie Inclined} = I_{bt}}{\text{Radiación directa sobre una Superficie Horizontal} = I_b} \quad \text{I.2.5,2}$$

$$R_d = \frac{\text{Radiación difusa sobre una Superficie Inclined} = I_{dt}}{\text{Radiación difusa sobre una Superficie horizontal} = I_d} \quad \text{I.2.5,3}$$

$$R = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} R_d \quad \text{I.2.5,4}$$

La corrección angular para la componente directa es sencilla y puede calcularse de la sección I.1.6. La corrección para la componente difusa depende de la distribución de la radiación difusa en el cielo, la cuál generalmente no es bien conocida; ésta distribución depende del tipo, extensión, ó amplitud y localización de nubes y también de la cantidad y la distribución espacial de otras componentes atmosféricas que dispersan la radiación solar. También una parte de la radiación solar puede ser reflejada desde el suelo hacia la superficie.

Podemos considerar, como lo sugerido por Hottel y Woertz (1942), que la componente difusa es isotrópica, es decir uniformemente distribuida en el cielo. Esta puede ser una aproximación razonable cuando, por ejemplo, hay una cubierta uniforme de nubes. Si además consideramos la radiación reflejada por el suelo y otras superficies hacia la superficie inclinada, similar a la distribución de la radiación solar difusa del cielo, entonces la superficie recibirá la misma radiación difusa sin importar su orientación. Bajo esta consideración,  $R_b$  es siempre

la unidad y la radiación total sobre una superficie inclinada para una hora, esta dada por:

$$I_T = I_b R_b + I_d \quad \text{I.2.5,5}$$

Un perfeccionamiento a este modelo ha sido deducido por -- Liu y Jordan (1963) considerando que la radiación sobre la superficie inclinada está formada por tres componentes: radiación solar directa, radiación solar difusa, y radiación solar reflejada en forma difusa desde el suelo. Una superficie inclinada a una pendiente  $\beta$  de la horizontal tiene un factor de vista hacia el cielo dado por  $(1+\cos\beta)/2$ . Si la radiación solar difusa es isotrópica, el factor anterior se considera como  $R_d$ . La superficie tiene un factor de vista hacia el suelo de --  $(1-\cos\beta)/2$ , y si los alrededores tienen una reflectancia de  $\rho$  para la radiación solar total, la radiación reflejada es --  $\rho(I_b+I_d)(1-\cos\beta)/2$  desde el suelo hacia la superficie. La radiación solar total sobre la superficie inclinada para -- una hora es entonces la suma de tres términos:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left( \frac{1+\cos\beta}{2} \right) + \rho (I_b + I_d) \left( \frac{1-\cos\beta}{2} \right) \quad \text{I.2.5,6}$$

Liu y Jordan sugieren valores de la reflectancia difusa de 0.2 cuando no hay nieve y de 0.7 cuando hay una capa de nieve.

Los dos últimos términos de la ecuación I.2.5,6 son algunas veces considerados, ambos, como la radiación difusa incidente sobre la superficie.

### I.3. TRANSMISION A TRAVES DE CUBIERTAS Y ABSORCION POR COLECTORES

La transmisión, reflexión, y absorción de radiación solar por varias partes de un colector solar son importantes en la determinación del rendimiento del colector. La transmitancia, reflectancia, y absorción son funciones de la radiación solar entrante, el índice de refracción y el coeficiente de extinción del material.

Generalmente el índice de refracción,  $n$ , y el coeficiente de extinción,  $k$ , son función de la longitud de onda de la radiación; sin embargo, en esta sección todas las propiedades serán consideradas independientes de la longitud de onda. Esta es una excelente consideración para el vidrio, material de cubierta muy común - en colectores solares.

#### I.3.1 REFLEXION DE LA RADIACION

Para superficies planas, Fresnel ha deducido expresiones para la reflexión de la radiación no polarizada pasando de un medio 1 con un índice de refracción  $n_1$ , a un medio 2 con un índice de refracción  $n_2$  :

$$r_{\perp} = \frac{\text{sen}^2 (\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2 (\theta_2 + \theta_1)} \quad \text{I.3.1,1}$$

$$r_{\parallel} = \frac{\text{tan}^2 (\theta_2 - \theta_1)}{\text{tan}^2 (\theta_2 + \theta_1)} \quad \text{I.3.1,2}$$

$$r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{1}{2} (r_{\perp} + r_{\parallel}) \quad \text{I.3.1,3}$$

donde  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos de incidencia y refracción, como se muestra en la figura I.3.1.1.  $r_{\perp}$  de la ecuación I.3.1.1 representa

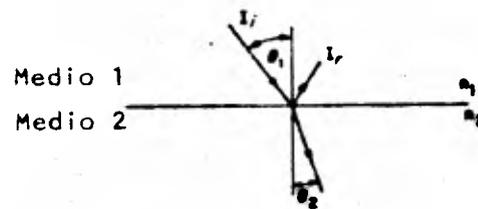


Figura I.3.1,1 Angulos de incidencia y reflexión en los medios 1 y 2, teniendo índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ .

la componente perpendicular de la radiación no polarizada;  $r_{\parallel}$  de la ecuación I.3.1.2 representa la componente paralela no polarizada. (paralelo y perpendicular referidos al plano definido por el rayo incidente y la normal a la superficie). La ecuación I.3.1.3 da entonces la reflexión de la radiación no polarizada como el promedio de las dos componentes. Los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  están relacionados a los índices de refracción por la ley de Snell;

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\text{sen } \theta_2}{\text{sen } \theta_1} \quad \text{I.3.1.4}$$

Así, si el ángulo de incidencia y los índices de refracción son conocidos, las ecuaciones I.3.1.1. a I.3.1.4. son suficientes para calcular la reflectancia de una sola interfase.

En aplicaciones solares, la transmisión de la radiación es a través de una placa o película de material tal que hay dos interfaces por cubierta que causa pérdidas por reflexión. Para incidencias fuera de la normal (perpendicular), la radiación reflejada en una interfase es diferente para cada componente de polarización; así, la radiación transmitida y reflejada llega a ser parcialmen-

te polarizada. Consecuentemente, es necesario tratar cada componente de polarización por separado.

Despreciando la absorción en la placa mostrada en la figura I.3.1.2 y considerando por el momento únicamente la componente perpendicular de polarización de la radiación entrante,  $(1-r_1)$  del rayo incidente llega a la segunda interfase. De éste  $(1-r_1)^2$  pasa a través de la interfase y  $r_1(1-r_1)$  es reflejada hacia la primera y así sucesivamente. Sumando las fracciones de la radiación transmitida, la transmitancia para la componente de polarización es:

$$T_{\perp} = (1-r_1)^2 \sum_{n=0}^{\infty} r_1^{2n} = \frac{(1-r_1)^2}{(1-r_1^2)} = \frac{1-r_1}{1+r_1} \quad \text{I.3.1.5}$$

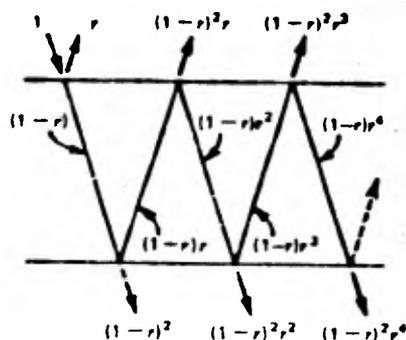


Figura I.3.1,2 Transmisión a través de una cubierta no absorbedora.

Se obtienen exactamente los mismos resultados considerando la componente paralela de polarización. (ver figura I.3.1.2).

$r_{\perp}$  y  $r_{\parallel}$  no son iguales (excepto a incidencia normal) y la transmitancia de la radiación inicialmente no polarizada es el promedio

de la transmitancia de las dos componentes

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left( \frac{1-r_n}{1+r_n} + \frac{1-r_1}{1+r_1} \right) \quad \text{I.3.1.6}$$

donde el subíndice r es un recordatorio de que únicamente las pérdidas por reflexión han sido consideradas.

Para un sistema de n cubiertas todas del mismo material un análisis similar da

$$\tau_{rN} = \frac{1}{2} \left( \frac{1-r_1}{1+(2N-1)r_1} + \frac{1-r_n}{1+(2N-1)r_n} \right) \quad \text{I.3.1.7}$$

El índice de refracción de materiales que han sido considerados para cubiertas de colectores solares están dados en la tabla I.3.1.1.

MATERIAL DE CUBIERTA	INDICE PROMEDIO DE REFRACCION
Vidrio	1.526
Polycarbonato	1.60
Politetrafluorietileno	1.37
Polifluorovinil	1.45

Tabla I.3.1, Índice promedio de refracción en el espectro solar de algunos materiales de cubierta.

### I.3.2 ABSORCION DE LA RADIACION

La absorción de la radiación en un medio parcialmente transparente es descrita por la ley de Bouguer, la cual está basada en la consideración de que la radiación absorbida es proporcional a la intensidad local en el medio y a la distancia que recorre la radiación en el medio "x". Esta ley se expresa matemáticamente como.

$$dI = IKdx$$

I.3.2,1

donde K es la constante de proporcionalidad, llamada coeficiente de extinción, y se considera constante para el espectro solar. Integrando a lo largo de la longitud de fase en el medio (es decir de 0 a  $L/\cos\theta_2$ ) obtenemos:

$$\tau_a = \frac{I_\tau}{I_0} = e^{-KL/\cos\theta_2}$$

I.3.2,2

donde el subíndice "a" indica que han sido consideradas únicamente las pérdidas por absorción.

Para el vidrio, el valor de K varía de  $4 \text{ m}^{-1}$  para vidrio de canto claro (el cuál tiene apariencia clara cuando es visto por el borde), y aproximadamente de  $32 \text{ m}^{-1}$  para vidrio de mala calidad (el cuál tiene apariencia verdosa cuando es visto por el borde).

### I.3.3 PROPIEDADES OPTICAS DE LOS SISTEMAS DE CUBIERTA

La transmitancia, absortancia, reflectancia, de una sola cubierta, tomando en cuenta las pérdidas por reflexión y absorción, pueden ser determinadas por la técnica de trazado, similar a la usada para deducir la ecuación I.3.1,5. Para la componente paralela de polarización la transmitancia,  $\tau_{||}$ , la reflectancia,  $\rho_{||}$ , y la absortancia,  $\alpha_{||}$ , de la cubierta son:

$$\tau_{||} = \frac{\tau_a (1-r_{||})^2}{1-(r_{||}\tau_a)^2} = \tau_a \left( \frac{1-r_{||}}{1+r_{||}} \right) \left( \frac{1-r_{||}^2}{1-(r_{||}\tau_a)^2} \right) \quad \text{I.3.3,1}$$

$$\rho_{||} = r_{||} + \frac{(1-r_{||})^2 \tau_a^2 r_{||}}{1-(r_{||}\tau_a)^2} = r_{||} (1 + \tau_a \tau_{||}) \quad \text{I.3.3,2}$$

$$\alpha_{||} = (1 - \tau_a) \left( \frac{1 - r_{||}}{1 - r_{||}\tau_a} \right)$$

I.3.3,3

resultados similares se encuentran para la componente perpendicular de polarización. Para la radiación incidente no polarizada, las propiedades ópticas se encuentran por el promedio de las dos componentes.

La ecuación para la transmitancia de una cubierta de colector, notando que el último término de la ecuación I.3.3,1 (y su equivalente para la componente perpendicular de polarización) es aproximadamente la unidad, ya que  $\tau_a$  es rara vez menor que 0.9 y "r" es del orden de 0.1 para cubiertas de colector.

Con esta simplificación y con la ecuación I.3.1,6 la transmitancia de una cubierta llega a ser:

$$\tau \sim \tau_a \tau_r$$

I.3.3,4

esta es una ecuación satisfactoria para colectores solares con materiales y ángulos de interés práctico.

La absorptancia de una cubierta de colector solar puede calcularse aproximadamente considerando que el último término de la ecuación I.3.3,3 sea la unidad.

$$\alpha \sim 1 - \tau_a$$

I.3.3,5

Aunque el término despreciado de la ecuación I.3.3,3 es más grande que el despreciado en la ecuación I.3.3,1, la absorptancia es mucho más pequeña que la transmitancia tal que la precisión total de las dos aproximaciones es esencialmente la misma.

La reflectancia de una cubierta se encuentra entonces a partir de,  $\rho = 1 - \alpha - \tau$ , tal que:

$$\rho \approx \tau_a(1-\tau_r) = \tau_a - \tau$$

I.3.3,6

La ventaja de las ecuaciones I.3.3,4 a I.3.3,6 sobre las ecuaciones I.3.3,1 a I.3.3,3 es que la polarización es considerada dentro de las ecuaciones aproximadas a través del único término,  $\tau_r$  más bien que por las expresiones más complicadas para cada propiedad óptica individual. Para nuestros cálculos emplearemos las ecuaciones aproximadas, pues los resultados son congruentes y su ficientemente exactos para nuestro propósito.

Aunque las ecuaciones I.3.3,4 a I.3.3,6 fueron deducidas pa ra una sola cubierta, se pueden aplicar igualmente para cubiertas múltiples del mismo material, (el programa para la evaluación de estos parámetros se restringe por esta condición).

La cantidad  $\tau_r$ , deberá ser evaluada a partir de la ecuación I.3.1,7 y la cantidad  $\tau_a$ , de la ecuación I.3.2,2 con L igual al espesor total del sistema de cubiertas.

#### I.3.4 TRANSMITANCIA PARA LA RADIACION DIFUSA

El análisis precedente se aplica únicamente a la componente directa de radiación solar. La radiación incidente sobre un colec tor también consiste de radiación solar dispersa desde el cielo y posiblemente, radiación solar reflejada por el suelo.

En principio, la cantidad de esta radiación que pasa a través de un sistema de cubiertas puede ser calculada por integración de la radiación transmitida para todos los ángulos. Sin embargo la distribución de esta radiación es generalmente desconocida, si la radiación incidente es isotrópica (independiente del

ángulo), entonces la integración puede llevarse a cabo. La obtención de los resultados pueden ser simplificados definiendo un ángulo equivalente para la radiación directa que dé la misma transmitancia que para la radiación difusa. Para un amplio rango de condiciones encontradas en aplicaciones de colectores solares, este ángulo equivalente es esencialmente de 60°. En otras palabras la radiación directa incidente a un ángulo de 60° tiene la misma transmitancia que la radiación difusa isotrópica.

Los colectores solares son generalmente orientados tal que "vean" al cielo y al suelo. Si la radiación del cielo y del suelo son ambas isotrópicas, entonces la transmitancia de los sistemas de vidrio para radiación difusa, puede ser encontrada por la integración de la transmitancia para radiación directa sobre ángulos de incidencia apropiados. Esta integración ha sido hecha por Brandmuehl y Beckman (1980) y los resultados son presentados en la figura I.3.4,1 en términos del ángulo efectivo de radiación directa incidente.

La región sombreada incluye un amplio rango de vidrios dentro del cual están los más comunmente empleados.

La línea punteada mostrada en la figura I.3.4,1 está dada por:

$$\theta_{e_g} = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \quad \text{I.3.4,1}$$

para radiación difusa del suelo, y:

$$\theta_{e_d} = 59.68 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \quad \text{I.3.4,2}$$

para la radiación difusa del cielo.

NOTA: En la secciones anteriores I.3.1 a I.3.3, se desarro-

llaron las ecuaciones considerando que la radiación es directa, - es decir, que con estas obtenemos  $\tau_b$ . Para obtener los valores de  $\tau_d$  y  $\tau_g$  se sigue la misma secuencia de cálculo que para  $\tau_b$ , pero con el valor de  $\theta_1$  igual a  $\theta_e$  en cada uno de los casos, es decir,  $\theta_{e_d}$  para radiación difusa del cielo y  $\theta_{e_g}$  para radiación difusa -- del suelo. Los subíndices b,d,g se refieren a la radiación directa, radiación difusa del cielo y radiación difusa del suelo, respectivamente.

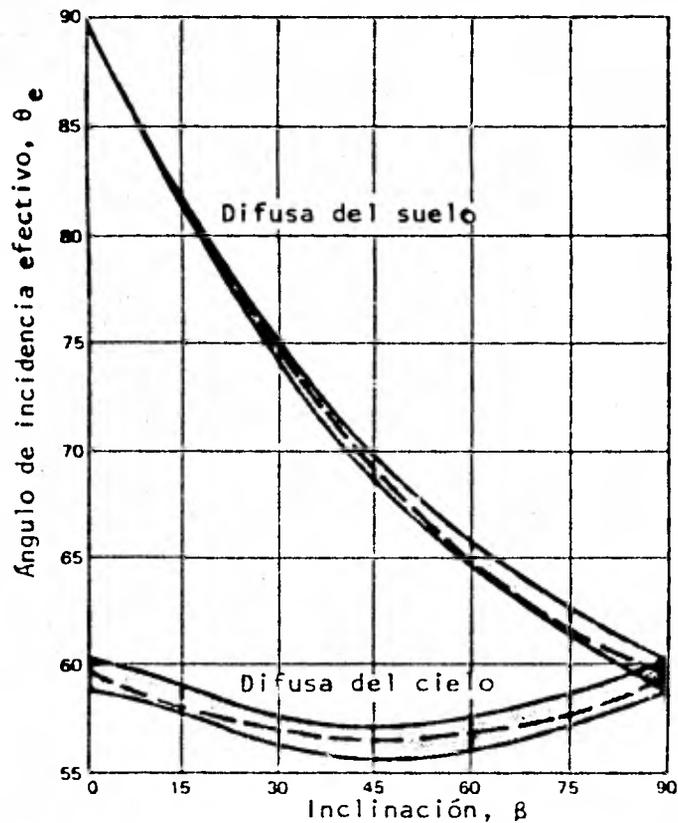


Figura I.3.4,1 ángulo de incidencia efectiva de la radiación difusa isotrópica.

### I.3.5 PRODUCTO TRANSMITANCIA-ABSORTANCIA

Para pasar al análisis del próximo capítulo es necesario evaluar el producto transmitancia-absortancia ( $\tau\alpha$ ). De la radiación que pasa a través del sistema de cubiertas y que toca la placa, una parte es reflejada hacia atrás, es decir, al sistema de cubiertas. Sin embargo, no toda esta radiación se pierde ya que -- algo de ésta regresa hacia la placa; la situación es ilustrada en la figura I.3.5,1 donde  $\tau$  es la transmitancia del sistema de cubiertas al ángulo deseado y  $\alpha$  es la absortancia angular de la placa absorbidora. De la energía incidente ( $\tau\alpha$ ) es absorbida por la placa absorbidora y  $(1-\alpha)\tau$  es reflejada hacia el sistema de cubiertas. La reflexión a partir de la placa absorbidora se considera difusa (y no polarizada) tal que la fracción  $(1-\alpha)\tau$  que toca la cubierta es radiación difusa y  $(1-\alpha)\tau\rho_d$  es reflejada hacia la placa absorbidora. La cantidad  $\rho_d$  se refiere a la reflectancia de las cubiertas para radiación difusa incidente que parece y puede ser estimada de la ecuación I.3.3.6 a un ángulo de -- 60°.

Si el sistema de cubiertas consiste de dos (o más) cubiertas de materiales diferentes,  $\rho_d$  será diferente (levemente) a la reflectancia difusa de la radiación solar incidente.

La reflexión múltiple de radiación difusa continúa hasta que la energía es absorbida totalmente.

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} \{(1-\alpha)\rho_d\}^n = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_d} \quad \text{I.3.5,1}$$

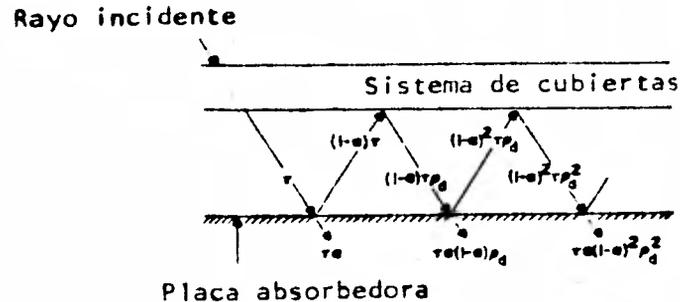


Figura I.3.5,1 absorción de la radiación solar por la placa absorbedora.

### I.3.6 DEPENDENCIA DE LA TRANSMITANCIA SOBRE EL ESPECTRO

La mayoría de los medios transparentes transmiten selectivamente, esto es, la transmitancia es una función de la longitud de onda incidente. El vidrio es el material más comunmente usado como cubierta en colectores solares, pero puede absorber poca de la energía solar del espectro si su contenido de  $F_eO_3$  es bajo. Si su contenido de  $F_eO_3$  es alto, absorberá la porción en el infrarrojo - del espectro solar. La transmitancia de varios vidrios de contenido variado de hierro es mostrado en la figura I.3.6,1. Esta, muestra claramente que "vidrio claro" (bajo contenido de hierro) tiene la mejor transmisión; cristales con alto contenido de  $F_eO_3$  tienen una apariencia verduzca y son pobres transmisores. Nótese que la transmisión no es una fuerte función de la longitud de onda en el espectro solar excepto para el vidrio "absorbedor de calor". El vidrio llega a ser sustancialmente opaco a longitudes mayores de 3.0 micrones.

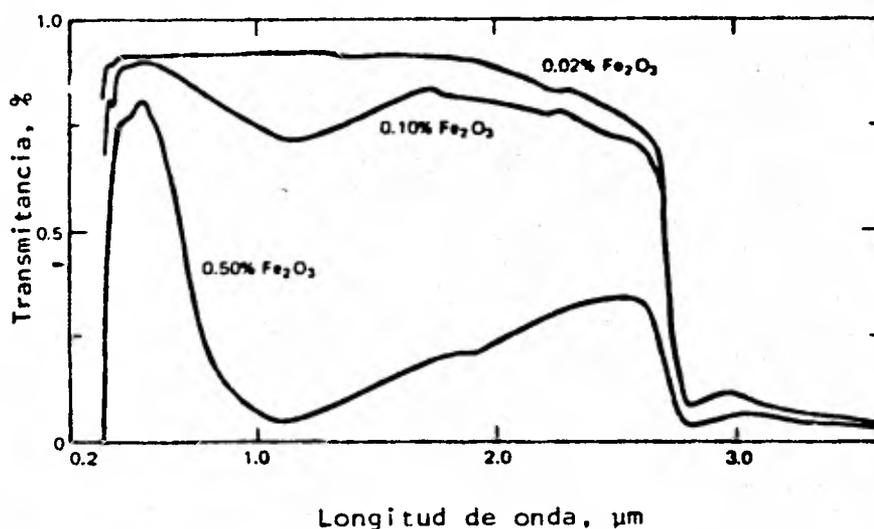


Figura I.3.6,1 transmitancia del vidrio de 6mm de espesor con diferentes contenidos de hierro a diferentes longitudes de onda.

### I.3.7 RADIACION SOLAR ABSORBIDA

La predicción del rendimiento del colector requiere de información sobre la energía solar absorbida por la placa del colector. La energía solar incidente sobre un colector inclinado puede ser encontrada por los métodos de la sección I.2.2. Esta radiación incidente tiene tres diferentes componentes; radiación directa, radiación difusa del cielo y radiación difusa reflejada del suelo y cada una debe ser tratada por separado. Sobre una base horaria la radiación absorbida,  $S$ , es:

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left( \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \rho_g (I_b + I_d) (\tau\alpha)_g \left( \frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

I.3.7.1

donde  $\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right)$  y  $\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right)$  son los factores de vista desde el colector hacia el cielo y al suelo respectivamente. Podemos usar la ecuación I.3.5,1 para encontrar  $(\tau\alpha)_d$  y  $(\tau\alpha)_g$  empleando el ángulo efectivo de incidencia, el cuál se obtiene a partir de las ecuaciones I.3.4,1 y I.3.4,2. El ángulo  $\theta$  empleado para evaluar  $R_b$  es usado para encontrar  $(\tau\alpha)_b$ .

## CAPITULO II

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

---

## II.1 TEORIA DE LOS COLECTORES PLANOS

Un colector es un tipo especial de intercambiador de calor - que transforma la energía solar radiante en calor. En el colector solar, la energía se transfiere desde una fuente radiante distante, hacia el fluido.

Sin concentración óptica, el flujo de radiación incidente es aproximadamente de  $1100 \text{ W/m}^2$ , en lugares despejados.

El rango de la longitud de onda captado es de 0.29 a 2.5 micrones, la cual es considerablemente más corta que la radiación emitida por la mayoría de las superficies absorbedoras de energía..

Captan la radiación difusa y directa, no requieren de un mecanismo que siga la trayectoria del sol, necesitan de poco mantenimiento, y son mecánicamente más simples que los colectores concentradores.

Las aplicaciones más comunes de estas unidades son:

Calentamiento de agua

Calefacción de construcciones.

Su uso potencial incluye acondicionamiento de aire en edificios (refrigeración) y calentamiento en procesos industriales.

## II.1.1 DESCRIPCION GENERAL DE LOS COLECTORES PLANOS

El colector solar plano esta formado por:

Un ensamble de cubiertas transparentes (generalmente dos pla

cas de vidrio), una placa de absorción (superficie selectiva) -- aislamiento y un bastidor (marco) de soporte.

La cubierta de vidrio debe ser transparente a la radiación incidente y opaca a la radiación infrarroja (de onda larga: calor) que emite la superficie de absorción. Tienen tres funciones: prevenir las pérdidas por convección desde el colector hacia el medio ambiente mientras que transmite los rayos solares, reducir las pérdidas por radiación térmica desde la placa absorbadora y protegerla de los fenómenos del medio ambiente. Las condiciones geográficas y climáticas de un sitio dado y la trayectoria diaria del sol así como las características de insolación de terminará la configuración precisa de la cubierta; algunos colectores operan más eficientemente con una, dos, o tres cubiertas -- mientras que otros no necesitarán ninguna.

El absorbedor es una placa delgada recubierta de una superficie selectiva (ver sección II.2 ), sobre la cual, la energía del sol es convertida en calor. La selección de dicha superficie es una función de la demanda energética, la cual debe satisfacer el sistema, y las condiciones climatológicas del sitio en el cual debe operar. Todos los colectores conducen el calor generado sobre la superficie hacia el fluido de trabajo que puede ser aire, agua, etc.

La absorción y la transferencia de calor es la "razón de -- ser" del colector, en consecuencia, las pérdidas de calor se deben reducir a un mínimo. La mayoría de los colectores producidos comercialmente están provistos de aislamiento detrás de la placa colectora cerca de su extremo, pero un ensamble bien diseñado usará aislamiento adicional, entre los bordes de la placa y su --

bastidor para reducir las pérdidas. El bastidor lleva a cabo la obvia función de detener el ensamblaje y al mismo tiempo, dependiendo de la construcción, sirve de soporte para la placa colectora.

Los colectores planos están generalmente, aunque no siempre, montados en posición estacionaria (como parte integral de la estructura de una pared o techo en una casa solar) con una orientación optimizada para la localidad en cuestión y para el tiempo del año en el cual el aparato solar se intenta que opere.

### II.1.2 ECUACION BASICA DEL BALANCE DE ENERGIA DEL COLECTOR PLANO

El comportamiento térmico del colector solar en estado estable es descrito por un balance de energía que incluye, la contribución de la energía solar en calor útil, pérdidas térmicas, y pérdidas ópticas.

La radiación solar absorbida,  $S$ , por un colector es igual a la diferencia entre la radiación solar incidente y las pérdidas ópticas del sistema, y es definida por la ecuación I.3.7,1. La pérdida de energía térmica del colector hacia los alrededores, por conducción, convección y radiación infrarroja, pueden ser representadas por un coeficiente de transferencia de calor global  $U_L$ , por la diferencia entre la temperatura media de la placa absorbidora,  $T_{p,m}$ , y la temperatura ambiente,  $T_a$ . En estado estable la generación de calor útil de un colector es entonces la diferencia entre la radiación solar absorbida y las pérdidas térmicas.

$$Q_u = A_c \{ S - U_L (T_{p,m} - T_a) \} \quad \text{II.1.2,1}$$

donde  $A_c$  es el área del colector.

El problema con esta ecuación es que la temperatura media de la placa absorbidora es difícil de calcular o medir ya que es una función del diseño del colector, la radiación solar incidente, y las condiciones del fluido a la entrada.

Una medida del rendimiento es la eficiencia del colector, definida como la relación de la ganancia útil en cualquier período de tiempo a la energía solar incidente sobre el mismo período de tiempo

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G_t dt} \quad \text{II.1.2,2}$$

donde  $G_t$  es la radiación total incidente sobre la superficie inclinada a cualquier hora entre la salida y la puesta del sol. Si el período de tiempo es de una hora la  $\int G_t dt$  es igual a  $I_t$  que se obtuvo en la sección I.2.5, por lo tanto la eficiencia para el período de una hora es

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c I_t} \quad \text{II.1.2,3}$$

### II.1.3 DISTRIBUCIONES DE TEMPERATURA EN UN COLECTOR PLANO

El análisis detallado de un colector solar es un problema -- muy complicado. Afortunadamente, un análisis relativamente simple producirá resultados muy útiles. Estos resultados mostrarán las variables importantes, cómo son relacionadas, y cómo afectan el rendimiento de un colector solar. Para ilustrar estos principios básicos, será examinado un colector para calentamiento de líquido

como el mostrado en la figura II.1.3,1. El análisis presentado sigue la deducción básica hecha por: Hottel y Whillier (1958), Bliss (1959), Whillier (1953, 1967).

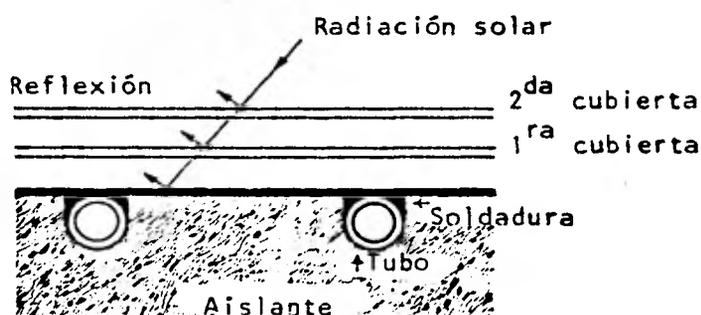


Figura II.1.3,1 Colector solar de placa y tubo.

Para apreciar el desarrollo que sigue, es deseable tener un conocimiento de los gradientes de temperatura que existen en un colector solar construido como el que se muestra en la figura -- II.1.3,1. La figura II.1.3,2 muestra la región entre dos tubos. Una parte del calor generado por la placa absorbedora tiene que ser conducido a lo largo de ella, hacia la región de los tubos. Así la temperatura de la placa a una distancia media entre los -- tubos será más alta que la temperatura en la vecindad de los tu-- bos. La temperatura arriba de los tubos será aproximadamente uniforme debido a la alta conductividad del tubo y del metal de soldadura.

La energía transferida al fluido ocasionará que éste se caliente causando un gradiente de temperatura en la dirección del -- flujo. Puesto que en cualquier región de colector, el nivel gene-

ral de temperatura es gobernado por el nivel de temperatura local del fluido, se espera una situación tal como la que muestra la -- figura II.1.3,2b. A cualquier localización "Y" la distribución general de temperatura en la dirección "X" es como se muestra en la figura II.1.3.2c, y a una "X" dada, la distribución de temperatura en la dirección "Y" tendrá el aspecto mostrado en la figura - - - II.1.3.2d.

Para obtener la situación mostrada en la figura II.1.3.2 se hicieron las siguientes consideraciones sin confundir la situación física básica:

Estas consideraciones importantes son:

1. El rendimiento se calcula en estado permanente.
2. La construcción del colector es del tipo lámina-tubo.
3. Los cabezales cubren una pequeña área del colector y su efecto sobre la transferencia de calor puede ser despreciado.
4. Los cabezales propocionan un flujo uniforme hacia los tubos.
5. No hay absorción de energía solar por las cubiertas en tanto que esto afecta las pérdidas térmicas en el colector.
6. Hay un flujo de calor unidimensional a través de las cubiertas.
7. Existe un decremento de temperatura insignificante a través de una cubierta (vidrio).
8. Hay un flujo de calor unidireccional a través del aislamiento de la base.
9. El cielo se considera como un cuerpo negro para radiación de longitud de onda larga, a una temperatura del cielo --

equivalente.

10. Los gradientes de temperatura en la dirección del flujo y entre los tubos son tratados independientemente.
11. Los gradientes de temperatura alrededor de los tubos son despreciados.
12. Las propiedades físicas de los materiales del colector - son independientes de la temperatura.
13. Las pérdidas a través de la base y el frente del colector se calculan a la misma temperatura ambiente.
14. Los efectos de polvo y mugre sobre la eficiencia del colector son insignificantes.
15. Los efectos de sombra sobre la placa absorbadora del colector es insignificante.

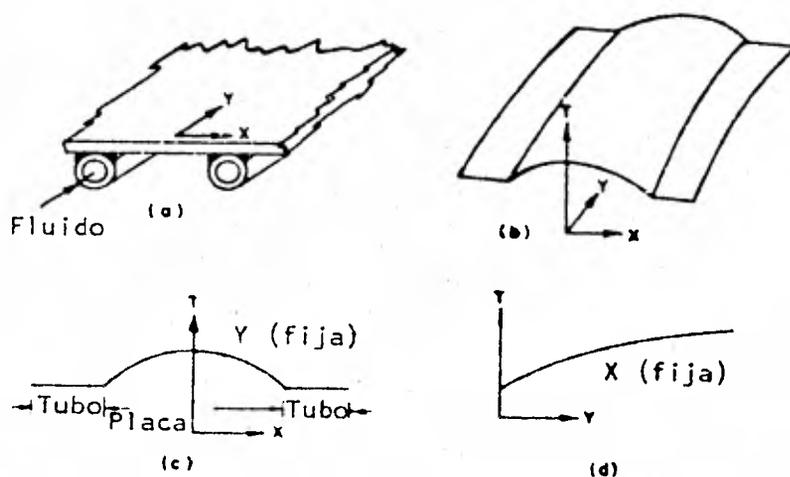


Figura II.1.3,2 Distribución de temperatura sobre una placa absorbadora.

### II.1.4 COEFICIENTE TOTAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL COLECTOR

Para desarrollar el concepto de un coeficiente total de -- pérdidas para un colector solar, es conveniente simplificar las matemáticas. Consideremos la red térmica para un sistema de dos cubiertas como el mostrado en la figura II.1.4,1.

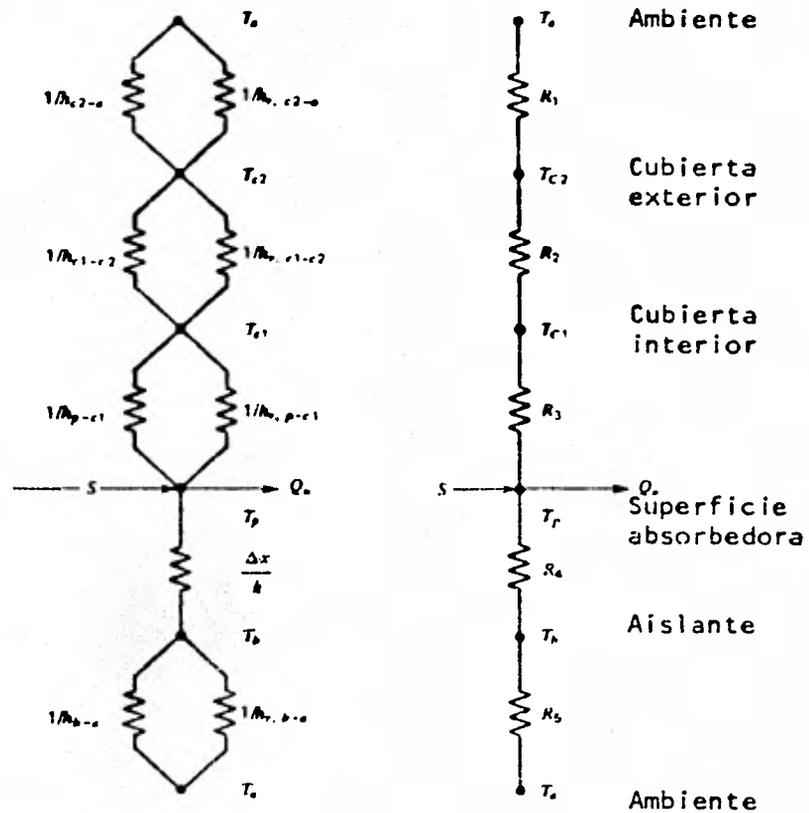


Figura II.1.4,1 Red térmica para un colector plano de dos cubiertas. a) en términos de la resistencia a la conducción, convección, y radiación. b) en términos de las resistencias entre placas.

En algún punto donde la placa se encuentra a una temperatura  $T_p$ , la cantidad de energía  $S$  que es absorbida por la placa es -- igual a la radiación incidente menos las pérdidas ópticas como se mostró en la sección I.3.7. Esta energía absorbida se distribuye en, ganancia de energía útil; pérdidas a través de la tapa, la base y las orillas o borde.

El propósito de esta sección es convertir la red térmica -- II.1.4,1 a la red térmica de la figura II.1.4,2.

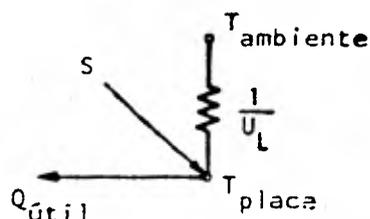


Figura II.4,2 Red térmica equivalente para un colector solar.

La pérdida de energía desde la superficie absorbidora hacia el medio ambiente (pérdida por la tapa) es el resultado de convección y radiación entre placas paralelas. La transferencia de energía entre la placa a una temperatura  $T_p$ , y la cubierta de vidrio interior a una temperatura  $T_{c1}$ , es exactamente la misma como entre las dos placas de vidrio adyacentes y también igual a la energía - pérdida hacia los alrededores desde la cubierta de vidrio exterior.

Esto no es verdadero a cualquier instante de tiempo si se considera que el vidrio absorbe energía solar.

Las pérdidas a través de la tapa por unidad de área son entonces igual al calor transferido desde la placa absorbidora hacia la cubierta interior.

$$q_{p-c_1} = h_{p-c_1}(T_p - T_{c_1}) + \frac{\sigma(T_p^4 + T_{c_1}^4)}{(1/\epsilon_p + 1/\epsilon_c - 1)} \quad \text{II.1.4,1}$$

donde:  $\epsilon_p$  es la emitancia de la placa

$\epsilon_c$  es la emitancia del vidrio

$\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.6697 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

$h_{p-c_1}$  es el coeficiente de transferencia de calor entre dos placas paralelas

Si el término de radiación es linealizado, el coeficiente de transferencia de calor por radiación puede usarse y la pérdida de calor llega a ser:

$$q_{p-c_1} = (h_{p-c_1} + h_{r,p-c_1})(T_p - T_{c_1}) \quad \text{II.1.4,2}$$

$$\text{donde: } h_{r,p-c_1} = \sigma(T_p + T_{c_1})(T_p^2 + T_{c_1}^2)/(1/\epsilon_p + 1/\epsilon_c - 1)$$

La resistencia a la transferencia de calor, puede por lo tanto ser expresada como:

$$R_3 = \frac{1}{h_{p-c_1} + h_{r,p-c_1}} \quad \text{II.1.4,3}$$

Una expresión similar puede ser escrita para  $R_2$  que es la resistencia entre las placas de vidrio:

$$R_2 = \frac{1}{h_{c_1-c_2} + h_{r,c_1-c_2}}$$

La última resistencia desde la cubierta exterior hacia los alrededores tiene la misma forma que la ecuación II.1.4,3, pero el coeficiente de transferencia de calor por convección es para el viento en contacto con el colector. La resistencia a la transferencia de calor por radiación desde la cubierta exterior considera, el intercambio de radiación de la cubierta con el cielo a una temperatura  $T_s$ . Para simplificar, referiremos esta resistencia a la temperatura del aire  $T_a$  así que el coeficiente de transferencia de calor puede ser escrito como:

$$h_{r,c_2-a} = \epsilon_c \sigma (T_{c_2} + T_s)(T_{c_2}^2 + T_s^2)(T_{c_2} - T_s) / T_{c_2} - T_a$$

II.1.4,4

donde:  $T_{c_2}$  es la temperatura de la cubierta exterior.

La resistencia hacia los alrededores esta dada entonces por:

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r,c_2-a}}$$

II.1.4,5

donde:  $h_w$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección debido al viento.

Para este sistema de dos cubiertas el coeficiente de transferencia de calor desde la placa absorbadora hasta el medio ambiente es:

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

II.1.4,6

El procedimiento para encontrar el coeficiente de pérdidas en la tapa es un proceso iterativo. Primero, se hace una suposición de las temperaturas de las cubiertas no conocidas, a partir de las cuales los coeficientes de transferencia de calor convectivos y -- radiactivos entre placas paralelas son calculados. Con estas estimaciones, la ecuación II.1.4,6 puede resolverse. La pérdida de calor en la etapa (Q) es el coeficiente de pérdidas en la tapa ( $U_t$ ) por la diferencia de temperatura:

$$Q = AU_t(T_p - T_a) = q_{p-c_1}$$

Este debe ser igual al intercambio de energía entre placas, si no es así es necesario calcular un nuevo conjunto de temperatura de placa. Suponiendo una temperatura de la placa absorbidora, se calcula una nueva temperatura para la cubierta interior, esta nueva temperatura de la cubierta interior es usada para encontrar la siguiente temperatura de cubierta y así sucesivamente. Para dos -- placas adyacentes cualquiera, la nueva temperatura de la placa j - puede ser expresada en términos de la temperatura de la placa i como:

$$T_j = T_i - \frac{U_t(T_p - T_a)}{h_{i-j} + h_{r,i-j}} \quad \text{II.1.4,7}$$

El proceso se repite hasta que las temperaturas de cubierta no cambian mucho entre cada iteración.

La solución del conjunto de ecuaciones anteriores consumen -- mucho tiempo aún en computadoras de alta velocidad, ya que quizás se requieran miles de iteraciones. Una ecuación empírica para  $U_t$  fue desarrollada por Klein (1979) siguiendo el procedimiento bási-

co de Hottel y Woertz (1942) y Klein (1975).

$$U_t = \left\{ \frac{N}{\frac{c}{T_{p,m}} \left( \frac{(T_{p,m} - T_a)}{(N + f)} \right)^e + \frac{1}{h_w}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma(T_{p,m} + T_a)(T_{p,m}^2 + T_a^2)}{(\epsilon_p + 0.00591 N h_w)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133 \epsilon_p}{\epsilon_g}} - N$$

II.1.4,8

donde:

$N$  = número de cubiertas (vidrios)

$f = (1 + 0.089 h_w - 0.1166 h_w \epsilon_p)(1 + 0.07866N)$

$c = 520(1 - 0.000051 \beta^2)$  para  $0^\circ < \beta < 70^\circ$ , para  $70^\circ < \beta < 90^\circ$  usar  $\beta = 70^\circ$

$e = 0.43(1 - 100/T_{p,m})$

$\beta$  = inclinación del colector (grados)

$\epsilon_g$  = emitancia del vidrio (0.88)

$\epsilon_p$  = emitancia de la placa absorbadora

$T_a$  = temperatura ambiente (K)

$T_{p,m}$  = temperatura media de la placa absorbadora (K)

$h_w$  = coeficiente de transferencia de calor por convección debido al viento ( $W/m^2C$ )

La ecuación II.1.4,8 es conveniente para cálculos manuales y para cálculos en una computadora digital, para usar esta ecuación empírica es necesario conocer la temperatura media de la placa, -  $T_{p,m}$ , (un método para la estimación de  $T_{p,m}$  es dado en la sección II.1.8).

Los resultados de Michell (1976) muestran que para colectores montados sobre techos, el coeficiente de transferencia de calor - por convección debido al viento es:

$$h_w = \frac{8.6V^{0.6}}{E^{0.4}}$$

II.1.4,9

donde:  $V$  es la velocidad del viento en metros por segundo y  $E$  es la raíz cúbica del volúmen de la casa en metros.

La pérdida de energía a través de la base del colector es representada por dos resistencias en serie,  $R_4$  y  $R_5$ .  $R_4$  representa la resistencia al flujo de calor por conducción a través del aislamiento y  $R_5$  representa la resistencia a la transferencia de calor por convección y radiación hacia el medio ambiente. Las magnitudes de  $R_4$  y  $R_5$  son tales que generalmente es posible considerar que  $R_5$  es cero y la resistencia total al flujo de calor es debido al aislamiento únicamente. Así, el coeficiente de pérdidas en la base,  $U_b$  es aproximadamente:

$$U_b = \frac{1}{R_4} = \frac{K}{\ell_b} \quad \text{II.1.4,10}$$

donde:  $K$  es la conductividad térmica del aislante y  $\ell_b$  es el espesor del aislamiento.

Para la mayoría de los colectores la evaluación de las pérdidas de borde es muy complicada. Sin embargo, en un sistema bien diseñado, las pérdidas en el borde deben ser pequeñas tal que no es necesario predecirlas con gran exactitud. Tabor (1958) recomienda aislamiento en el borde alrededor del colector del mismo espesor que el aislamiento de la base. Las pérdidas de borde son por lo tanto estimadas considerando el flujo de calor unidimensional hacia los costados alrededor del perímetro del sistema colector. Las pérdidas a través del borde deben ser referidas al área del colector. Si el producto coeficiente de pérdidas en el borde por el área de borde es  $(UA)_{\text{borde}}$  entonces el coeficiente de pérdidas

en el borde ( $U_e$ ), basado sobre el área del colector,  $A_c$ , es:

$$U_e = \frac{(UA)_{\text{borde}}}{A_c} \quad \text{II.1.4,11}$$

donde  $U = K/\lambda_e$ ,  $\lambda_e$  = espesor del aislamiento de borde

El coeficiente de total de pérdidas,  $U_L$ , es entonces la suma de los coeficientes de pérdidas en la tapa, la base, y el borde

$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad \text{II.1.4,12}$$

### II.1.5 DISTRIBUCION DE TEMPERATURA ENTRE TUBOS Y FACTOR DE EFICIENCIA DEL COLECTOR

La distribución de temperatura entre dos tubos puede ser deducida si consideramos temporalmente que el gradiente de temperatura en la dirección del flujo es insignificante. Consideramos la configuración placa-tubo como se muestra en la figura II.1.5,1 . .

La distancia entre tubos es  $W$ , el diametro exterior del tubo es  $D$ , y  $\delta$  es el espesor de la placa delgada . . Debido a que el material de la placa es buen conductor, el gradiente de temperatura -- a través de ella es insignificante. Consideramos que la porción de placa por arriba de la soldadura, está a una temperatura local de la base,  $T_b$ . La región  $W-D/2$  de la placa (Figura II.1.5,1) se considera como un problema clásico de aleta.

La aleta, mostrada en la figura II.1.5,2a es de largo  $(W-D)/2$ . Una región de anchura  $\Delta x$  y longitud unitaria en la dirección

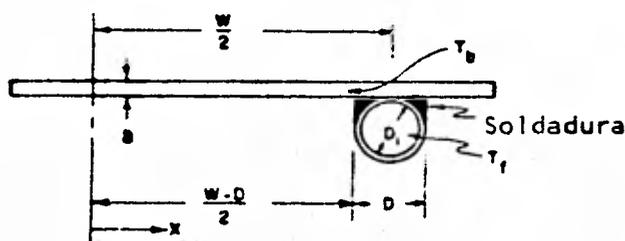


Figura II.1.5,1 dimensiones de placa y tubo.

del flujo es mostrada en la figura II.1.5,2b. Un balance de energía sobre este elemento nos da:

$$S\Delta x + U_L \Delta x (T_a - T) + (-k\delta \frac{dT}{dx}) \Big|_x - (-k\delta \frac{dT}{dx}) \Big|_{x+\Delta x} = 0 \quad \text{II.1.5,1}$$

donde S es la energía solar absorbida de la ecuación 1.3.7,1; dividiendo todo por  $\Delta x$  y encontrando el límite cuando  $\Delta x$  tiende a cero nos da:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{U_L}{k\delta} (T - T_a - S/U_L) \quad \text{II.1.5,2}$$

Las dos condiciones de frontera necesarias para resolver esta ecuación diferencial de segundo orden son simétricas a la línea central, y conociendo la temperatura en la raíz de la aleta:

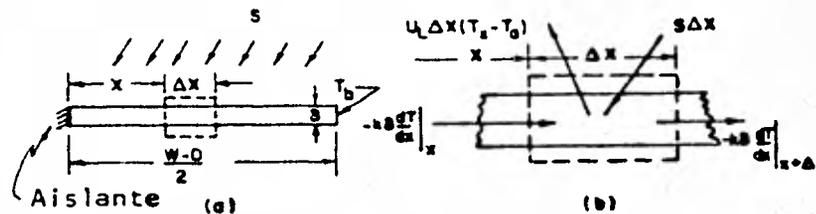


Figura II.1.5,2 balance de energía sobre un elemento de ale  
ta.

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad T \Big|_{x=(W-D)/2} = T_b \quad \text{II.1.5,3}$$

Si definimos  $m^2 = U_L/k\delta$  y  $\psi = T - T_a - S/U_L$  la ecuación II.1.5,2 se  
ra:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} - m^2\psi = 0 \quad \text{II.1.5,4}$$

La cual tiene condiciones de frontera:

$$\left. \frac{d\psi}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad \psi \Big|_{x=(W-D)/2} = T_b - T_a - S/U_L \quad \text{II.1.5,5}$$

La solución general es entonces:

$$\psi = C_1 \sinh mx + C_2 \cosh mx \quad \text{II.1.5,6}$$

Las constantes  $C_1$  y  $C_2$  pueden encontrarse sustituyendo las  
condiciones de frontera, de la ecuación II.1.5,5 dentro de  
la ecuación general. El resultado es:

$$\frac{T - T_a - S/U_L}{T_b - T_a - S/U_L} = \frac{\cosh mx}{\cosh m(W-D)/2} \quad \text{II.1.5,7}$$

La energía conducida hacia la región del tubo por unidad de longitud en la dirección del flujo de calor es encontrada aplicando la Ley de Fourier en la base de la aleta:

$$\begin{aligned} q'_{\text{aleta}} &= -k\delta \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=(W-D)/2} \\ &= \frac{k\delta m}{U_L} \{S - U_L (T_b - T_a)\} \tanh m(W-D)/2 \end{aligned} \quad \text{II.1.5,8}$$

Pero  $k\delta m/U_L$  es precisamente  $1/m$ . La ecuación II.1.5,8 considera la energía colectada únicamente sobre un lado del tubo; por lo tanto la colección de energía para ambos lados es:

$$q'_{\text{aleta}} = (W-D) \{S - U_L (T_b - T_a)\} \frac{\tanh m(W-D)/2}{m(W-D)/2} \quad \text{II.1.5,9}$$

Es conveniente usar el concepto de eficiencia de aleta para reescribir la ecuación II.1.5,9 como:

$$q'_{\text{aleta}} = (W-D) F \{S - U_L (T_b - T_a)\} \quad \text{II.1.5,10}$$

donde:

$$F = \frac{\tanh m(W-D)/2}{m(W-D)/2} \quad \text{II.1.5,11}$$

La función  $F$  es la eficiencia estandar para aletas rectas con perfil rectangular y es mostrada en la figura II.1.5,3.

La ganancia útil del colector también incluye la energía -- absorbida por arriba de la región del tubo. La ganancia de energía en la región del tubo es entonces:

$$q'_{\text{tubo}} = D \{S - U_L (T_b - T_a)\} \quad \text{II.1.5,12}$$

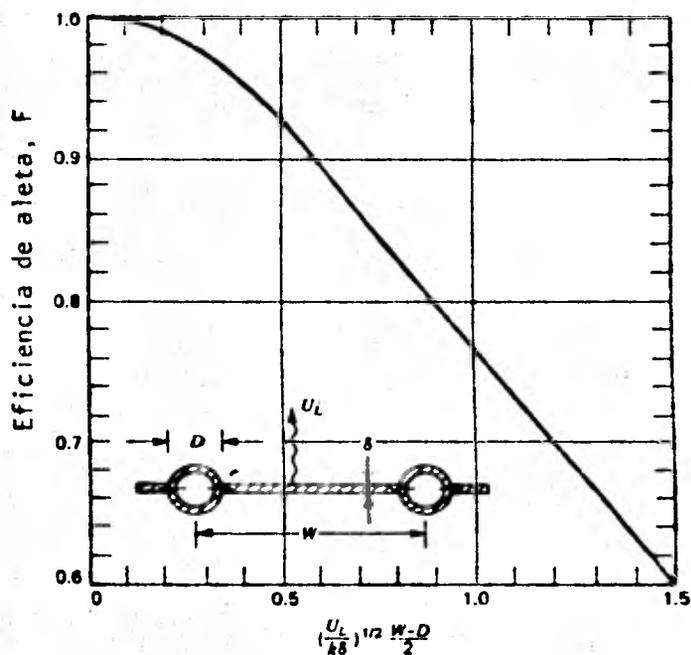


Figura II.1.5,3 Eficiencia de aleta para colectores de placa y tubo

Tabla II.1.5,1 Espacio entre tubos para un 95% de eficiencia

Espesor de la placa del colector (mm)	Material de placa del colector Espacio entre tubos (cm)		
	Cobre (W)	Aluminio (W)	Acero (W)
0.1	9.0	7.5	4.0
0.2	11.5	9.5	6.0
0.3	12.5	10.5	6.5
0.5	14.5	13.0	7.5
1.0	16.0	15.0	9.5
1.5		16.5	10.5
2.0		18.0	11.5
3.0			13.0

y la ganancia útil para el colector por unidad de longitud en la dirección del flujo de calor, llega ser:

$$q'_u = \{(W-D)F + D\}(S-U_L (T_b - T_a)) \quad \text{II.1.5,13}$$

Finalmente, la ganancia útil de la ecuación II.1.5,13 tiene que ser transferida al fluido. La resistencia al flujo de calor hacia el fluido resulta de la resistencia de la soldadura y del tubo. La ganancia útil puede ser expresada en términos de estas dos resistencias como:

$$q'_u = \frac{T_b - T_f}{1/(h_{fi} \pi D_i) + 1/C_b} \quad \text{II.1.5,14}$$

donde  $D_i$  es el diametro interior del tubo y  $h_{fi}$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el fluido y la pared del tubo. La conductancia de la soldadura,  $C_b$  puede ser estimada conociendo: la conductividad térmica de la soldadura,  $k$ , el espesor promedio de la soldadura,  $\gamma$ , y el ancho de la misma,  $b$ . Así la conductancia de la soldadura por unidad de longitud es:

$$C_b = \frac{k_b b}{\gamma} \quad \text{II.1.5,15}$$

La conductancia de la soldadura puede ser muy importante en la descripción correcta del rendimiento del colector. Whillier y Saluja (1965) muestran con experimentos que la simple sujeción o amarre de los tubos a la placa, da como resultado una significativa pérdida de rendimiento. Ellos concluyen que es necesario tener un buen contacto metal a metal de manera que la resistencia de la soldadura sea menor que  $0.03 \text{ m } ^\circ\text{C/W}$ .

Ahora queremos eliminar  $T_b$  y obtener una expresión de ganancia útil en términos de dimensiones conocidas, parámetros físicos, y temperatura local del fluido. Resolviendo la ecuación II.1.5,14 para  $T_b$ , sustituyéndola en la ecuación II.1.5,13, y resolviendo para la ganancia útil, obtenemos:

$$q'_u = WF' \{ S - U_L (T_f - T_a) \} \quad \text{II.1.5,16}$$

donde  $F'$ , es el factor de eficiencia del colector y es:

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left\{ \frac{1}{U_L \{ D + (W-D)F \}} + 1/C_b + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right\}} \quad \text{II.1.5,17}$$

Para la mayoría de las geometrías, una interpretación física del parámetro  $F'$ , es clara cuando notamos que el denominador de la ecuación II.1.5,17 es la resistencia a la transferencia de calor desde el fluido hasta el medio ambiente. Esta resistencia está dada por el símbolo  $1/U_o$ . El numerador es la resistencia a la transferencia de calor desde la placa absorbadora hasta el medio ambiente.  $F'$  es, así, la razón de estos dos coeficientes de transferencia de calor:

$$F' = \frac{U_o}{U_L} \quad \text{II.1.5,18}$$

Otra interpretación de  $F'$  resulta examinando la ecuación II.1.5,16 ordenándola en una forma particular,  $F'$  representa la razón de la ganancia de energía útil, a la ganancia de energía útil si la superficie absorbadora del colector estuviera a la temperatura local del fluido.

El factor de eficiencia del colector es esencialmente una constante para un diseño de colector dado y para cualquier variación de flujo de masa (gasto).

La razón de  $U_L$  a  $C_b$ , la razón de  $U_L$  a  $h_{fi}$  y el parámetro de eficiencia de aleta,  $F$ , son las únicas variables que aparecen en la ecuación II.1.5,17 que pueden estar en función de la temperatura. Para la mayoría de los diseños de colector,  $F$  es la variable más importante en la determinación de  $F'$ , pero no es una función fuertemente dependiente de la temperatura.

Como es de esperarse el factor de eficiencia disminuye con el aumento de la distancia entre centros de los tubos, y se incrementa con el aumento del espesor y conductividad térmica de ambos materiales (placa y tubo). Incrementando el coeficiente total de pérdidas, disminuye  $F'$ , mientras que incrementando el coeficiente de transferencia de calor entre el tubo y el fluido, aumenta  $F'$ .

#### II.1.6 DISTRIBUCION DE LA TEMPERATURA EN LA DIRECCION DEL FLUJO

La ganancia de energía útil por unidad de longitud (calculada según la ecuación II.1.5,16) es transferida al fluido. El fluido entra al colector a una temperatura  $T_{fi}$  y aumenta hasta que sale a  $T_{fo}$ . Refiriendonos a la figura II.1.6,1, podemos expresar un balance de energía sobre el fluido circulando a través de un solo tubo de largo  $\Delta Y$ , como:

$$\left(\frac{\dot{m}}{n}\right)C_p T_f \Big|_Y - \left(\frac{\dot{m}}{n}\right)C_p T_f \Big|_{Y+\Delta Y} + \Delta Y q'_u = 0 \quad \text{II.1.6,1}$$

donde:

$\dot{m}$  - es el gasto total en el colector

$n$  - es el número de tubos paralelos

$T_{fi}$  - temperatura del fluido a la entrada del colector

$T_{fo}$  - temperatura del fluido a la salida del colector

Dividiendo toda la ecuación por  $\Delta Y$ , encontrando el límite - cuando  $\Delta Y$  tiende a cero, y substituyendo la ecuación II.1.5,16 para  $q'_u$ , obtenemos:

$$\dot{m} C_p \frac{dT_f}{dY} - n W F' \{ S - U_L (T_f - T_a) \} = 0 \quad \text{II.1.6,2}$$

Si consideramos que  $F'$  y  $U_L$  son independientes de la posición, entonces la solución para la temperatura a cualquier posición ' $Y$ ' (sujeta a la condición de que la temperatura del fluido que entra es  $T_{fi}$ ) es:

$$\frac{T_{fo} - T_a - S/U_L}{T_{fi} - T_a - S/U_L} = e^{- (U_L n W F' Y / \dot{m} C_p)} \quad \text{II.1.6,3}$$

Si el colector tiene una longitud " $L$ " en la dirección del flujo, entonces la temperatura del fluido a la salida,  $T_{fo}$  se encuentra substituyendo " $L$ " por " $Y$ " en la ecuación II.1.6,3. La cantidad " $nWL$ " es el area del colector, por lo tanto:

$$\frac{T_{fo} - T_a - S/U_L}{T_{fi} - T_a - S/U_L} = e^{- (A_c U_L F' / \dot{m} C_p)} \quad \text{II.1.6,4}$$

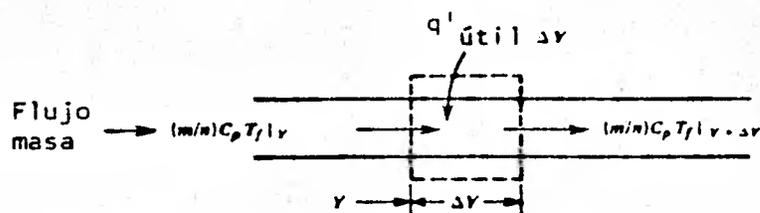


Figura II.1.6,1 balance de energía sobre un elemento del fluido.

### II.1.7, FACTOR DE EXTRACCIÓN DE CALOR DEL COLECTOR.

Es conveniente definir una cantidad que relacione la ganancia de energía útil de un colector a la ganancia útil si toda la superficie del colector estuviera a la temperatura de entrada del fluido. Esta cantidad es llamada, factor de extracción de calor,  $F_r$ , y matemáticamente está dado por:

$$F_r = \frac{\dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi})}{A_c \{S - U_L(T_{fi} - T_a)\}} \quad \text{II.1.7,1}$$

El factor de extracción de calor puede ser expresado también como:

$$F_r = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left\{ \frac{T_{fo} - T_{fi}}{S/U_L - (T_{fi} - T_a)} \right\}$$

$$= \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left\{ \frac{(T_{fo} - T_a - S/U_L) - (T_{fi} - T_a - S/U_L)}{S/U_L - (T_{fi} - T_a)} \right\} \quad \text{II.1.7,2}$$

$$F_r = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left\{ 1 - \frac{S/U_L - (T_{fo} - T_a)}{S/U_L - (T_{fi} - T_a)} \right\} \quad \text{II.1.7,3}$$

El cual de la ecuación II.1.6,4 puede ser expresado como:

$$F_r = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left\{ 1 - e^{-(A_c U_L F' / \dot{m}C_p)} \right\} \quad \text{II.1.7,4}$$

Para representar la ecuación II.1.7,4 gráficamente, es conveniente definir un factor de flujo del colector  $F''$ , como la relación de  $F_r$  a  $F'$ , así:

$$F'' = \frac{F_r}{F'} = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L F'} \left\{ 1 - e^{-(A_c U_L F' / \dot{m}C_p)} \right\} \quad \text{II.1.7,5}$$

La cantidad  $F_r$  es equivalente a un factor convencional de efectividad de intercambio de calor, el cual es definido como el cociente de la transferencia de calor real a la transferencia de calor - - máxima posible. La ganancia de energía útil máxima posible en un colector solar ocurre cuando todo el colector está a la temperatura -- del fluido a la entrada, las pérdidas de calor hacia los alrededores son entonces mínimas. El factor de extracción de calor por esta ganancia de energía máxima posible, es igual a la ganancia de energía - útil real,  $Q_u$ :

$$Q_u = A_c F_r' \{ S - U_L (T_{fi} - T_a) \} \quad \text{II.1.7,6}$$

Esta es una ecuación extremadamente útil y se aplica a la mayoría de los colectores planos.

Con ella la ganancia de energía útil es calculada como una función de la temperatura del fluido a la entrada del colector. La ecuación II.1.7,6 es una representación conveniente de la ganancia de energía útil en el análisis de sistemas de energía solar ya que la temperatura del fluido a la entrada es generalmente conocida. Sin embargo, las pérdidas basadas en la temperatura del fluido a la entrada son mas pequeñas de lo que en realidad son, pues no se considera que las pérdidas ocurren a lo largo del colector desde la placa, y la placa siempre tiene un incremento de temperatura en la dirección de flujo.

El efecto del factor  $F_r$ , es reducir la ganancia de energía útil que tendría el colector, si toda la placa absorbidora estuviera a la temperatura de fluido a la entrada, hasta, la ganancia de energía útil real.

Como el gasto de masa se incrementa, la temperatura a través del colector disminuye. Esto causa pérdidas mas bajas ya que la temperatura promedio del colector es menor y existe un incremento correspondiente en la ganancia de energía útil. Este incremento está reflejado por un incremento en el factor de extracción de calor,  $F_r$ , así como un incremento del gasto de masa.

#### II.1.8, TEMPERATURA MEDIA DEL FLUIDO Y DE LA PLACA.

Para evaluar el rendimiento del colector, es necesario conocer el coeficiente total de pérdidas y los coeficientes de transferencia de calor del fluido dentro del tubo.

Sin embargo  $U_L$  y  $h_{fj}$  están en función de la temperatura. La temperatura media del fluido puede ser encontrada integrando la

ecuación II.1.6,3 de 0 a L :

$$T_{fm} = \frac{1}{L} \int_0^L T_f Y dY \quad \text{II.1.8,1}$$

Llevando a cabo esta integración y sustituyendo  $F_r$  de la ecuación II.1.7,4 y  $Q_u$  de la ecuación II.1.7,6 la temperatura media de fluido fué mostrada por Klein (1974) como:

$$T_{fm} = T_{fi} + \frac{Q_u/A_c}{U_L F_r} (1 - F_r) \quad \text{II.1.8,2}$$

Esta es la temperatura adecuada para evaluar las propiedades del fluido.

La temperatura media de la placa será siempre más grande que la temperatura del fluido debido a la resistencia a la transferencia de calor entre la superficie absorbadora y el fluido. Esta diferencia de temperatura es generalmente pequeña para sistemas que emplean líquidos.

La temperatura media de la placa puede ser usada para calcular la ganancia útil de un colector como:

$$Q_u = A_c \{ S - U_L (T_{pm} - T_a) \} \quad \text{II.1.8,3}$$

Si igualamos la ecuación II.1.8,3 con la ecuación II.1.7,6 y resolvemos para la temperatura media de la placa, tendremos:

$$T_{pm} = T_{fi} + \frac{Q_u/A_c}{U_L F_r} (1 - F_r) \quad \text{II.1.8,4}$$

La ecuación II.1.8,4 puede ser resuelta de una manera iterativa con la ecuación II.1.4,8. Primero se hace una estimación --

para la temperatura media de la placa a partir de la cual se calcula  $U_L$ . Con valores aproximados de  $F_r$ ,  $F''$  y  $Q_u$ , es obtenido un nuevo valor de la temperatura media de la placa a partir de la ecuación II.1.8,4 que es usado para encontrar un nuevo valor del coeficiente de pérdidas en la tapa. El nuevo valor de  $U_L$  es usado para corregir  $F_r$  y  $F''$  y el proceso se repite, hasta que los valores de  $T_{pm}$  convergen.

#### II.1.9 PRODUCTO EFECTIVO TRANSMITANCIA-ABSORTANCIA.

En la sección I.3.5 se analizó el producto de la transmitancia de la cubierta por la absorptancia de la placa absorbadora. En la sección II.1.4 se obtuvo la expresión para  $U_L$ , donde se supuso que la cubierta del sistema no absorbe la radiación solar. Con el fin de conservar la simplicidad de la ecuación II.1.7,6 y explicar las pérdidas debidas a la absorción de la radiación solar por el vidrio, será introducido un producto efectivo de la transmitancia-absortancia,  $(\tau\alpha)_e$ , se demostrará que  $(\tau\alpha)_e$  es ligeramente mas grande que  $(\tau\alpha)$ .

Toda la radiación solar que es absorbida por el sistema de cubiertas no se pierde, entonces esta energía absorbida tiende a incrementar la temperatura de la cubierta y consecuentemente reduce las pérdidas desde la placa absorbadora.

Consideremos una red térmica para un sistema de una sola cubierta como la mostrada en la figura II.1.9,1. La energía solar absorbida por la cubierta es  $(I_T - \tau_a)$  donde  $\tau_a$  es la transmitancia considerando solo la absorción, de la ecuación I.3.2,2 e  $I_T$  es la radiación incidente horaria. Las pérdidas para (a), sin ab.

sorción, son  $U_{p-c}(T_p - T_c)$  y las pérdidas para (b); con absorción, son  $U_{p-c}(T_p - T'_c)$ . Aquí suponemos que la pequeña cantidad de absorción en la cubierta y el consecuente incremento de temperatura de la cubierta no cambia las magnitudes de  $U_{p-c}$  y  $U_{c-a}$ . La diferencia,  $D$ , es términos de las pérdidas es:

$$D = U_{p-c} \{ (T_p - T_c) - (T_p - T'_c) \} \quad \text{II.1.9,1}$$

La diferencia de temperatura  $(T_p - T_c)$  puede ser expresada como:

$$(T_p - T_c) = \frac{(T_p - T_a) U_t}{U_{p-c}} \quad \text{II.1.9,2}$$

Donde  $U_t$  es el coeficiente de pérdidas en la tapa y es igual a:  $(U_{p-c} \times U_{c-a}) / (U_{p-c} + U_{c-a})$ .

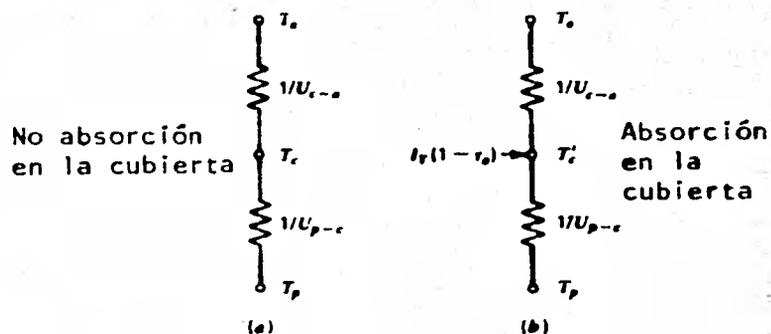


Figura II.1.9,1 Red térmica para pérdidas por la tapa en un colector de una sola cubierta con y sin absorción en la cubierta.

La diferencia de temperatura ( $T_p - T'_c$ ) puede ser expresada como:

$$(T_p - T'_c) = \frac{U_{c-a}(T_p - T_a) - I_T(1-\tau_a)}{U_{p-c} + U_{c-a}} \quad \text{II.1.9,3}$$

Por consiguiente;

$$D = (T_p - T_a)U_t - \frac{U_{p-c} U_{c-a}(T_p - T_a)}{U_{p-c} + U_{c-a}} + \frac{I_T(1-\tau_a)U_{p-c}}{U_{p-c} + U_{c-a}} \quad \text{II.1.9,4}$$

$$D = I_T(1-\tau_a) U_t / U_{c-a} \quad \text{II.1.9.5}$$

La cantidad  $D$  representa la reducción de las pérdidas en el colector debido a la absorción en la cubierta, entonces puede ser considerada como una entrada adicional de energía en el colector, la ganancia útil de un colector es entonces:

$$q_u = F_r \{ S + I_T(1-\tau_a) \frac{U_t}{U_{c-a}} - U_L(T_i - T_a) \} \quad \text{II.1.9,6}$$

La cantidad  $I_T$  tiene como vimos, tres componentes, la directa, la difusa del cielo, y la radiación reflejada del suelo. Cada una de estas componentes es multiplicada por separado por  $(\tau_a)$  para determinar  $S$ . Es decir por  $(\tau_a)_b$ ,  $(\tau_a)_d$ ,  $(\tau_a)_g$ , según los mostrados en la sección I.3.7.

Podemos dividir la radiación absorbida en la cubierta en estos mismos tres términos.

Por definición la cantidad  $(\tau_a) - (1-\tau_a) U_t / U_{c-a}$  es el producto efectivo transmitancia-absortancia. Para este sistema de una sola cubierta:

$$(\tau\alpha)_e = (\tau\alpha) - (1-\tau_a) U_t/U_{c-a} \quad \text{II.1.9,7}$$

Para la evaluación de S debe ser usado un valor aproximado de  $(\tau\alpha)_e$  en lugar de  $(\tau\alpha)$ .

Aunque el valor de  $(\tau\alpha)_e$  puede ser calculado con un método aproximadamente exacto,  $(\tau\alpha)_e$  es generalmente del orden de 1% a 2% más grande que  $(\tau\alpha)$ . Se ha visto que  $(\tau\alpha)$  es aproximadamente 1% más grande que el producto de  $\tau$  por  $\alpha$

$$(\tau\alpha) = 1.01 \tau\alpha \quad \text{II.1.9,8}$$

Ya que las propiedades de radiación de la superficie son -- rara vez conocidos dentro del 1%, el equivalente del producto -- efectivo transmitancia-absortancia puede ser aproximado por:

$$(\tau\alpha)_e = 1.02 \tau\alpha \quad \text{II.1.9,9}$$

### II.1.10 EFECTOS DE POLVO Y SOMBREADO.

Los efectos de polvo y sombreado son difíciles de generalizar. Los datos de Dietz (1963) muestran que a ángulos de interés (0 a 50) la influencia de la mugre puede ser tan alta como del 5%. De experimentos a largo plazo en el área de Boston, Hottel y Woertz (1942) establecen el funcionamiento del colector disminuye cerca del 1% debido a la suciedad del vidrio. En un reciente experimento de 30 días sin lluvia en la India, Garg (1974) estableció que el polvo reduce la transmitancia en un promedio del 8% para un vidrio inclinado a 45°.

Para propósitos de diseño sin pruebas extensivas se sugiere que la radiación absorbida por la placa sea reducida por un factor  $r$ , donde  $r$  es 0.98 debido al polvo.

Los efectos de sombra pueden también ser significantes. -- siempre que el ángulo de incidencia no sea normal, algo de la estructura interceptará la radiación solar, algo de esta radiación será reflejada hacia la placa absorbidora si las paredes son de material reflejante. Hottel y Woertz recomendaron que la radiación absorbida por la placa sea reducida por un 3% a cuenta de los -- efectos de sombra, si el área neta del vidrio no obstruida, es -- usada en todos los cálculos. Esto es debido a que el área de absorción se reduce por la sombra que origina el marco o soporte, -- sobre la placa absorbidora.

### II.1.11 EFECTOS DE CAPACIDAD DE CALOR EN EL RENDIMIENTO DE COLECTORES PLANOS.

La operación de la mayoría de los sistemas de energía solar es inherentemente transitoria; no hay ningún elemento en estos sistemas que se comporte de manera estable (estado permanente), cuando se -- considera la naturaleza transitoria de la radiación solar, temperatura ambiente, y otros parámetros.

Los efectos de capacidad de calor pueden ser considerados en dos partes; la primera es debido al calentamiento del colector desde su temperatura en la mañana (antes de empezar a funcionar) hasta su temperatura normal de operación.

La segunda parte es debido al comportamiento intermitente durante el día, de la radiación solar, temperatura ambiente, etc.

Klein demostró que la reducción de calor útil debido al calentamiento del colector por la mañana, es despreciable en muchas situaciones. También demostró que los efectos por la variación de radiación solar, temperatura ambiente, velocidad del viento, fueron siempre insignificantes para un colector de construcción normal.

En el análisis horario del comportamiento del colector durante un día, generalmente se desprecian algunos períodos de radiación en la mañana y en la tarde (poco antes de las 8:00 A.M. y poco después de las 4:00 P.M.); por lo tanto podríamos considerar que estos períodos de radiación compensan la reducción (pequeña) en el calor útil del colector debido a los efectos de capacidad de calor.

Para una información sobre la evaluación de estos efectos, consultar Ref. (2).

### II.1.12 CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA EL COLECTOR.

Para el diseño del colector hacemos las siguientes observaciones:

1) El flujo a través de un colector puede ser en serie o en paralelo. Difieren en la distribución de la temperatura y gradientes de presión.

Si todos los tubos son soldados a la misma placa, la configuración en serie sigue un patron no uniforme de calentamiento, ya que el flujo es calentado como si avanzara a lo largo de la primera trayectoria y luego es enfriado según los pasos que estén cerca de la región de entrada a la placa.

En la disposición en serie se requiere de una larga trayectoria del fluido. Teniendo el mismo gasto de masa a la entrada y un diámetro equivalente del tubo en ambas configuraciones, la trayectoria en serie tiene una gran velocidad de fluido, y por tanto una mayor pérdida de presión a través del colector.

En la disposición en paralelo, por contraste aumenta continuamente la temperatura del fluido como resultado de la trayectoria paralela. En resumen la disposición en paralelo es más ventajosa porque la variación de flujo en las trayectorias es autoajustable por el efecto de termosifón.

2) La separación entre cubiertas (vidrios) y la separación entre la placa absorbedora y la primera cubierta son de 0.025 m, ya que se ha visto es la que produce una baja transferencia de calor (entre placas paralelas) un incremento en esta distancia no disminuye la transferencia de calor en forma apreciable Ref. (3).

3) El material de los tubos del colector y la placa absorbedora, deberán seleccionarse en base a su costo, propiedades físicas,

disponibilidad y facilidad de manejo. Nosotros sugerimos utilizar cobre para los tubos y la placa (hacer tratamiento para superficies selectiva).

4) El material del bastidor (marco) del colector se seleccionará en base al costo y durabilidad.

Otra manera de instalar el colector es usando el techo de la casa como el bastidor del colector, es decir hacer una cavidad en el techo, para instalar los tubos del colector, aislamiento y cubiertas del colector. Esto no siempre es posible ya que depende del diseño de la casa y su ubicación.

En nuestro caso utilizamos el techo de la casa como bastidor del colector.

5) El ensamble de la cubierta y de la placa absorbadora requieren de soporte (idealmente) la placa absorbadora debe ser soportada independientemente de cualquier conductor térmico del bastidor, para limitar pérdidas de calor por conducción y tomar en cuenta la expansión térmica.

Si se usan varios vidrios, el vidrio interior debe ser también soportado independientemente ya que su temperatura subirá, pero la cubierta exterior puede estar soportada por el bastidor, ya que está en contacto con el medio ambiente.

6) Se recomienda usar un material desecante entre las cubiertas y entre la cubierta y la placa absorbadora, para evitar la formación de vapor de agua entre ellos.

7) Debe orientarse el colector hacia el sur con una inclinación igual a la latitud de lugar. Ya que es la posición intermedia del sol entre el invierno y el verano.

8) Por su disponibilidad y propiedades físicas se recomienda lana de vidrio como aislante.

9) Se recomienda soldar los tubos al cabezal, en lugar de utilizar conexiones "T", con el fin de reducir las pérdidas por fricción debido a accesorios y reducir el costo del colector.

10) La relación de diámetros entre los tubos del colector y cabezal es de 1 a 4 para reducir las pérdidas por fricción Ref. (9).

## II.2 SUPERFICIES SELECTIVAS

Un método útil para la reducción de pérdidas de calor de una superficie empleada para la colección de energía solar, es tratar el absorbedor de tal manera que absorba fuertemente la radiación solar y al mismo tiempo que sea un pobre emisor de radiación térmica. Tal superficie es conocida como un negro espectralmente selectivo.

En general, para hacer más eficiente el uso de la energía solar, ésta debe absorberse hasta obtener la más alta temperatura posible. La temperatura de equilibrio de una superficie irradiada por radiación solar, depende fundamentalmente de dos factores:

a) De la cantidad de radiación solar incidente absorbida, -- siendo esta proporcional a la absortancia  $\alpha$ .

b) De la cantidad de energía radiante emitida por la superficie, esta depende de su emitancia  $\epsilon_p$ .

La energía emitida por los colectores solares, a temperaturas ordinarias de operación, está en el rango de longitudes de onda más grandes que el de la luz solar; esto aumenta la posibilidad de tener una superficie selectiva con mayor absorción de la radiación solar y una débil emisión de radiaciones térmicas.

Se han logrado importantes adelantos en el estudio y preparación de superficies selectivas desarrollando depósitos de películas delgadas, generalmente óxidos sobre metales pulidos; estos recubrimientos pueden ser obtenidos con simples baños sobre placas de metal a determinadas condiciones o bien pueden ser depósitos electrolíticos; de esta forma se obtienen superficies negras cuyas propiedades ópticas aumentan el rendimiento de captación y permi-

ten alcanzar temperaturas más elevadas.

La eficiencia de las superficies selectivas depende fundamentalmente de tres factores:

1) La naturaleza específica del recubrimiento (capa depositada sobre el metal base).

2) El espesor del recubrimiento debe ser del mismo orden que la longitud de onda de la radiación que absorbe.

3) Débil emisividad térmica que resulta de la alta reflectividad del metal base.

También es muy importante la estabilidad química y térmica del recubrimiento y del metal base, ya que es necesario que la superficie conserve su selectividad a altas temperaturas y en condiciones prácticas.

En un estudio hecho en el CIM Ref. (12) se obtuvieron buenos resultados empleando Cobre como metal base (material que utiliza remos) recubierto de una capa de Cromo negro, depositada electrofóticamente.

Los resultados obtenidos con esta superficie fueron los siguientes:

$$\alpha = 0.915 \quad \epsilon_p = 0.079$$

Este tipo de superficie es la que se utilizará en el diseño del colector.

Estas propiedades corresponden a una muestra de Cobre con Cromo negro depositado con las siguientes condiciones:

Densidad de corriente = 7 Amp/ohm<sup>2</sup>

Tiempo de deposición = 10 min.

Para una información detallada, consultar Ref. (12).

## II.3. ALMACENAMIENTO DE ENERGIA

### II.3.1. ALMACENAMIENTO DE AGUA

Para muchos sistemas solares el agua es el elemento ideal para almacenar calor útil. El agua es el medio de almacenamiento, y un tanque, bien aislado para evitar la pérdida de energía colectada, es la unidad de almacenamiento. En este sistema de almacenamiento de energía, la energía es añadida y extraída por transporte propio del medio de almacenamiento, eliminando así, la caída de temperatura entre el fluido y el medio de almacenamiento.

En nuestro caso el medio de almacenamiento es empleado directamente para satisfacer la demanda de energía, es decir, el agua calentada en el colector se almacena durante un período normal de un día y se emplea directamente como agua caliente de servicio.

### II.3.2. CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA

La capacidad de almacenamiento de energía de una unidad de almacenamiento mediante agua (u otro líquido), a temperatura uniforme, operando a una diferencia finita de temperatura, está dado por:

$$Q_s = (mc_p)_s \Delta T_s \quad \text{II.3.2,1}$$

donde  $Q_s$  es la capacidad total de calor para un ciclo (en nuestro caso una hora), operando a través del rango de temperatura  $T_s$ , con "m" kilogramos de agua en la unidad de almacenamiento. El rango de temperatura sobre el cual una unidad de almacenamiento puede operar, está limitado al extremo más bajo, para la mayoría de las

aplicaciones, por los requerimientos del proceso; y al límite más alto, por la presión de vapor del líquido, la pérdida de calor en el colector, y obviamente por las características del proceso.

Para un tanque no estratificado, como el mostrado en la figura II.3.2,1, un balance de energía sobre el tanque dá:

$$(mc_p)_t \frac{dT_t}{dt} = Q_u - L - (UA)_t (T_t - T_a) \quad \text{II.3.2,2}$$

$Q_u$  y  $L$  son variaciones de adición y extracción de energía respectivamente, en cada ciclo.

Reescribiendo la ecuación II.3.2,2 en la forma de diferencias finitas, y resolviendo para la temperatura del tanque después de un instante de tiempo  $\Delta t$ , tenemos:

$$T_t^+ = T_t + \frac{\Delta t}{(mc)_t} (Q_u - L - (UA)_t (T_t - T_a)) \quad \text{II.3.2,3}$$

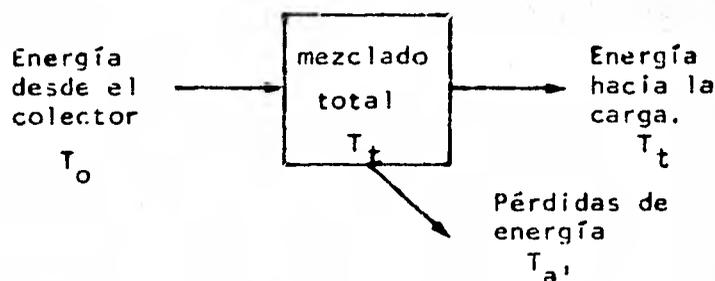


Figura II.3.2,1 Tanque de almacenamiento, con una masa "m" - de agua, no estratificado, operando con respecto al tiempo a una temperatura  $T_t$  en una temperatura ambiente  $T_a$ .

NOTA: Se anota  $T_a$ , para diferenciar el caso en que el tanque no se encuentre a la intemperie.

En realidad el tanque está estratificado, pero para una simulación hora a hora, la ecuación II.3.2,2 es satisfactoria. Además teniendo en cuenta que aproximadamente 2/3 del período de simulación (24 Hrs.), es decir, cuando no hay radiación solar, el sistema permanece estático, y el tanque tiende a desestratificarse - - debido a la difusión, y a la conducción de calor en la pared interior del tanque.

### II.3.3 CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA EL TERMOTANQUE

Se mencionarán algunas recomendaciones para el buen diseño del termotanque:

1) El material en el interior, deberá ser antioxidante pues el termotanque es cerrado y por lo tanto el mantenimiento debe -- ser casi nulo (cuando mucho una vez al año). Los materiales pueden ser fibra de vidrio, plástico, asbesto, acero inoxidable etc. - - Obviamente se elegirá, entre los disponibles, el más económico.

2) Deberá utilizarse un buen material aislante, realizando el trabajo de aislamiento cuidadosamente, evitando fugas de calor.

3) Deberá ser hermético, de tal manera que no existan fugas de agua. Si existen fugas de agua el aislamiento se impregnará de ésta y aumentará mucho la conductividad del aislamiento a tal -- grado que ya no se tendrá un termotanque.

Si es empleado en sistema de circulación natural:

4) Su construcción debe ser alargada en sentido vertical para

lograr una buena estratificación de temperaturas y por consiguientemente una diferencia de densidades, la cual determinará la cantidad de flujo de masa en el sistema.

5) Se recomienda que el forro exterior, si se encuentra a la intemperie, sea material de material reflejante para evitar la -- absorción de calor durante el día, y así mantener una buena estratificación.

6) Los orificios de entrada y salida de masa en el tanque se recomienda que sean redondeados para tener menos pérdidas por fricción, lo cual es muy importante en este tipo de sistemas.

7) El tanque deberá instalarse lo mas cerca posible del colector, para evitar el aumento de la caída de presión en la tubería de conexión.

8) La entrada de agua al tanque proveniente del colector, es a las  $2/3$  partes de la altura del tanque, para provocar una buena estratificación en éste. Se ha encontrado que para tener una mejor circulación en sistemas termosifónicos, la altura de entrada del agua caliente del colector al tanque es la mencionada anteriormente. La altura del tanque con respecto al colector es de 0.6 m, -- según la Ref. (17).

## II.4 SISTEMAS DE CIRCULACION NATURAL

### II.4.1 CIRCULACION NATURAL EN EL SISTEMA COLECTOR TERMO TANQUE

La circulación natural en colectores solares, ocurre cuando la placa absorbadora se calienta lo suficiente para establecer una diferencia de densidades en el fluido. La densidad está en función de la diferencia de temperaturas, y el flujo de masa ( $\dot{m}$ ) está en función de la ganancia útil del colector, la cual produce la diferencia de temperaturas.

Bajo estas circunstancias, estos sistemas son auto ajustables.

Ha sido observado por varios investigadores como Close Ref. (7), que bajo un amplio rango de condiciones el incremento de la temperatura del agua fluyendo en sistemas de circulación natural es aproximadamente de  $10^{\circ}\text{C}$ . Close desarrolló un análisis de la circulación en estos sistemas comparando las temperaturas de entrada y salida experimentales con las calculadas. Sus resultados, algunos de los cuales se muestran en la figura II.4.1,1 confirman que la observación anterior es representativa de estos sistemas si están bien diseñados sin serias restricciones de flujo.

Observamos de la figura II.4.1,1 que la diferencia de la temperatura entre la entrada y la salida del colector no es constante, pero es aceptable considerar un valor de  $10^{\circ}\text{C}$  como promedio entre la salida y la entrada del colector.

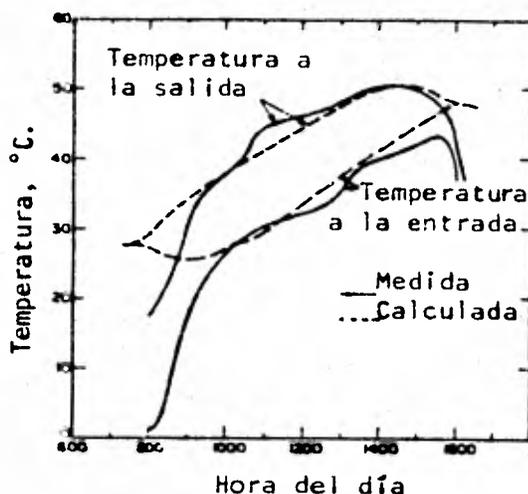


Figura II.4.1 Temperaturas del agua a la entrada y salida del colector, para un calentador de circulación natural.

#### II.4.2 FLUJO DE MASA

Hay dos métodos alternativos para determinar el flujo de masa en un sistema de circulación natural:

##### Primer método:

Se hace un análisis de las distribuciones de temperatura y densidad, y gasto de masa resultante, basadas sobre cálculos de caída de presión como lo indicado por Close.

El trabajo desarrollado por Close ha sido perfeccionado por otros investigadores; K.S. ONG Ref. (8) desarrolló un método de diferencias finitas para evaluar el rendimiento térmico de un calentador de agua solar de circulación natural basado en el modelo matemático hecho por Close.

Consideraciones para el análisis:

(Con referencia a las figuras II.4.2.1 y II.4.2.2).

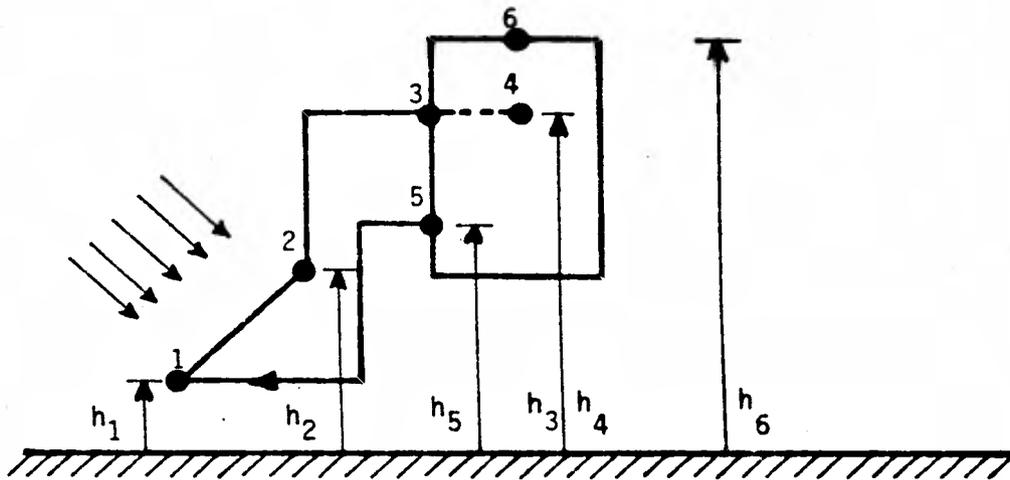


Figura II .4.2,1 trazado esquemático de un calentador solar de agua típico

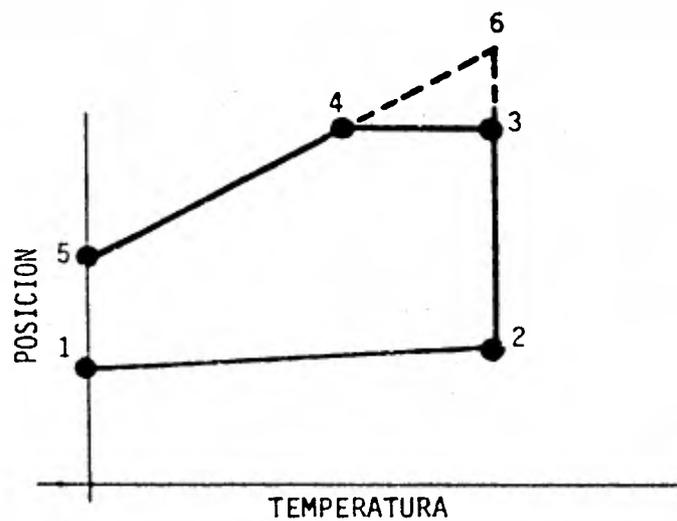


Figura II .4.2,2 distribución hipotética de la temperatura en el sistema.

- a) La diferencia de temperaturas entre los puntos 2 y 3, y entre los puntos 1 y 5, son pequeñas e insignificantes. La tubería de conexión (entre el tanque y el colector) se considera bien aislada para disminuir el intercambio de calor entre la tubería y el medio ambiente.
- b) La temperatura media de los tubos y placa del colector del tanque de almacenamiento, y tubería de conexión, es igual a la temperatura del agua almacenada dentro de ellos respectivamente.
- c) La temperatura media del agua en los tubos del colector, termo-tanque y tubería de conexión, es igual y es representada por una temperatura media del sistema  $T_m$ .
- d) La distribución de la temperatura del agua en los tubos del colector y en el termo-tanque es lineal.

Nótese, que la temperatura  $T_4$  está implícitamente determinada por la altura relativa de  $h_6$  y  $h_5$ . Sin embargo los experimentos muestran que el valor de  $T_4$  es aproximadamente igual a  $T_3$ .

Para el tanque de almacenamiento tenemos que:

$$\dot{m}C_p(T_3 - T_5) = W_t \left( \frac{dT_m}{dt} \right) + (UA)_t (T_m - T_a) \quad \text{II.4.2,1}$$

calor colectado = calor almacenado + pérdida de calor.

donde:

$W_t$  es la capacidad térmica del tanque de almacenamiento y es igual a  $W_t = \rho VC$  ( $V$  = volumen del material del termotanque).

$(UA)_t$  es el producto del coeficiente total de transferencia de calor por el área del tanque.

Se considera que la densidad del agua varía con la tempera-

tura de acuerdo con la ecuación:

$$\rho = AT_m^2 + BT_m + C \quad \text{II.4.2,2}$$

donde:

$$A = 1.25 \times 10^{-6}, \quad B = 5.83 \times 10^{-5}, \quad C = 0.99967$$

La carga de termosifón que origina el flujo, es equivalente al área bajo la curva de la figura II.4.2,2 y esta dada por:

$$h_f = 0.5(T_5 - T_3)(2AT_m + B)f(s) \quad \text{II.4.2,3}$$

donde:

$$f(s) = 2(h_3 - h_1) - (h_2 - h_1) - \left( \frac{h_3 - h_5}{h_6 - h_5} \right)^2 \quad \text{II.4.2,4}$$

Esta carga de termosifón es balanceada por la carga de presión en oposición al flujo debido a la fricción y otras pérdidas en la tubería.

Considerando que las pérdidas por fricción en los tubos del colector, tubería de conexión, cabezal y codos son los factores dominantes, la carga por fricción puede ser representada por la ecuación:

$$h_f = (f'l/d + K)(u^2/2g) \quad \text{II.4.2,5}$$

donde:

K es el coeficiente equivalente de pérdidas menores debido al flujo pasando a través de accesorios tales como codos, 'T' y restricciones u es la velocidad del fluido a través de un tubo de diámetro interno 'd' y longitud 'l', y para flujo laminar, - (número de Reynolds menor que 2000), el factor de fricción es:

$$f' = 64/R_e \quad \text{II.4.2,6}$$

Para un circuito con flujo a través de una serie de tubos,

cabezales y tuberías de conexión, la carga total de pérdidas - por fricción podría representarse por la expresión:

$$h_f = \{(h_f)_{\text{tubos del colector}} + (h_f)_{\text{cabezales}} + (h_f)_{\text{tubería de conexión}}\} \quad \text{II.4.2,7}$$

Las ecuaciones II.4,2,6 y II.4.2,7 combinadas pueden ser - reescritas como:

$$h_f = 8\dot{m}^2 (f_e \ell_1 / d_1 + K_e) / (\pi^2 g_0 \rho^2 d_1^4 N^2) \quad \text{II.4.2,8}$$

donde el factor equivalente de fricción es:

$$f_e = f_1 + f_2 d_1 N^2 (\ell_2 / \ell_1) (d_1 / d_2)^5 + f_3 d_1 N^2 (\ell_3 / \ell_1) (d_1 / d_3)^5 \quad \text{II.4.2,9}$$

y el coeficiente equivalente de pérdidas:

$$K_e = K_1 + K_2 N^2 (d_1 / d_2)^4 + K_3 N^2 (d_1 / d_3)^4 \quad \text{II.4.2,10}$$

Los subíndices 1,2 y 3 representan un banco de N tubos para - lelos en la placa del colector cada uno de longitud  $\ell_1$  y diáme - tro interno  $d_1$ , dos cabezales de longitud total  $\ell_2$  y diámetro - interno  $d_2$ , y dos tuberías de conexión de longitud total  $\ell_3$  y - diámetro interno  $d_3$ , respectivamente.

Eliminando  $(T_3 - T_5)$  entre las ecuaciones II.4.2,1 y - - - II.4.2,3, obtenemos una expresión para la carga de termosifón:

$$hf = -f(s)(2AT_m + B) \times \{W_t \left(\frac{dT_m}{dt}\right) + (UA)_t (T_m - T_a)\} / (2\dot{m}C_p) \quad \text{II.4.2,11}$$

igualando las ecuaciones II.4.2,8 y II.4,2,11, obtenemos la ecuación del gasto de masa:

$$\dot{m}^3 = -f(s)(2AT_m + B) \times \left\{ W_t \left( \frac{dT_m}{dt} \right) + (UA)_t (T_m - T_a) \right\} / (PC_p) \quad \text{II.4.2,12}$$

donde:

$$P = 16(f_e L / d_i + K_e) / (\pi^2 g_o \rho^2 d_i^4 N^2) \quad \text{II.4.2,13}$$

donde:

L es la longitud de los tubos del colector

d<sub>i</sub> es el diámetro interior de los tubos del colector

g<sub>o</sub> es la constante gravitacional

La ecuación II.4.2,12 puede ser presentada en la forma de diferencias finitas:

$$\dot{m}^3 = -f(s)(2AT_m + B) \left\{ W_t \left( \frac{T'_m - T_m}{\Delta t} \right) + (UA)_t (T_m - T_a) \right\} / (PC_p) \quad \text{II.4.2,14}$$

donde T'<sub>m</sub> es la temperatura media del sistema después de un pequeño incremento finito de tiempo Δt.

G.L. Morrison y D.B.J. Ranatunga Ref. (9) encontraron que el estudio hecho por Ong incurria en un error del 30% del comportamiento analizado al comportamiento real. Ellos atribuyen esta inexactitud debido a lo siguiente:

- 1) La medición del gasto por el método de inyección de tinta (empleado por Ong) introduce una pérdida por fricción adicional significativa.
- 2) La carga de fricción es evaluada para un flujo laminar - completamente desarrollado, lo cual no siempre se efectúa por ser los tubos del colector relativamente cortos, con esto el efecto de la fricción es mayor para el flujo en transición.

Para obtener un valor más aproximado del comportamiento del colector, Morrison y Ranatunga sugieren las siguientes correcciones:

a) Corrección para flujo en desarrollo:

De un análisis detallado de flujo en desarrollo (transición) en tubos rectos se obtuvo que:

$$M = 1.0 + \frac{0.038}{(L/d Re_d)^{0.96}} \quad \text{II.4.2,15}$$

Donde M es la relación de la caída de presión de flujo en desarrollo comparado con la caída de presión para una longitud igual de flujo completamente desarrollado al mismo número de Reynolds.

b) Corrección para pérdidas menores:

En la mayoría de los trabajos publicados ha sido incluido el efecto de pérdidas menores en accesorios; sin embargo los factores de pérdidas que han sido utilizados estuvieron basados en datos para flujo turbulento. En flujo laminar el factor de corrección para la energía cinética es del orden del 100%, así los coeficientes de pérdidas son el doble del valor usado en flujo turbulento. Esto puede ser demostrado integrando a través de un perfil de flujo laminar para obtener la energía cinética exacta del flujo:

$$\int \frac{u^2}{2g} dQ = \int_0^R \frac{u^3 \pi r}{g} dr = \frac{2(\bar{u})^2}{2g} Q \quad \text{II.4.2,16}$$

### Segundo Método

Este método consiste en considerar un incremento constante de la temperatura del agua fluyendo a través del colector y -- calcular el flujo de masa al cual producirá esta diferencia de temperaturas a una ganancia del colector estimada.

Las ecuaciones básicas del colector son:

$$Q_u = A_c F_R \{ S - U_L (T_i - T_a) \} \quad \text{II.4.2,17}$$

y

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_o - T_i) = \dot{m} C_p \Delta T_t \quad \text{II.4.2,18}$$

Resolviendo para el flujo de masa:

$$\dot{m} = \frac{A_c F_R \{ S - U_L (T_i - T_a) \}}{C_p \Delta T_t} \quad \text{II.4.2,19}$$

Esta ecuación puede ser resuelta para  $\dot{m}$ , si es considerado que  $F'$  es independiente del gasto. Sustituyendo la ecuación -- II.1.7,4 para  $F_R$  dentro de la ecuación II.4.2,19 y reagrupando, tenemos:

$$\dot{m} = - \frac{U_L F' A_c}{C_p L_n \{ 1 - \frac{U_L (T_o - T_i)}{S - U_L (T_i - T_a)} \}} \quad \text{II.4.2,20}$$

Para calcular  $\dot{m}$  consideramos que  $F'$  es conocida (la que resultó con una  $T_{p,m}$  supuesta). Al obtener el valor de  $\dot{m}$ , chequeamos el valor de  $F'$  para ver si es necesario una interacción.

Este método es bueno para cálculos a una determinada hora -- del día, con el fin de evaluar parámetros que permanecen casi -- constantes para un diseño específico de colector.

Como  $\Delta T_t$  no es constante durante todo el día, este método -- no es el adecuado para una simulación del comportamiento del --

sistema hora a hora durante el día. Para este caso, se recomienda el método uno, descrito anteriormente.

## II. 5. DISEÑO Y SIMULACION DEL COLECTOR-TERMOTANQUE

Para obtener el diseño óptimo del colector es necesario lograr la máxima eficiencia del mismo, sin dejar de tomar en cuenta la -- disponibilidad y costo de los materiales.

Con los datos proporcionados por el Instituto de Investigación en materiales (IIM) departamento de energía solar, obtenemos la ra diación global media diaria mensual en términos de la insolación - efectiva. Estos datos se muestran en la siguiente tabla, para la - localidad de San Pedro Mártir, la cual se encuentra cerca de la - Rumorosa con condiciones climatológicas semejantes.

enero	-	14.22	MJ/m <sup>2</sup>	Dfa
febrero	-	16.92	"	"
marzo	-	23.25	"	"
abril	-	24.37	"	"
mayo	-	28.72	"	"
junio	-	29.59	"	"
Julio	-	27.97	"	"
agosto	-	24.98	"	"
septiembre	-	24.69	"	"
octubre	-	19.72	"	"
noviembre	-	15.84	"	"
diciembre	-	13.93	"	"
anual	-	21.99	"	"

### CALCULO DEL AREA DEL COLECTOR:

Para determinar el área del colector, calcularemos la cantidad de calor necesario para el baño diario de los ocupantes (cuatro per sonas) de la vivienda.

Consideramos que los baños son en la mañana o en la noche, de tal manera, el agua fría no es calentada a su paso por el colector durante el baño.

Utilizamos para almacenar el agua caliente un tanque de 1000 litros a una temperatura de 60°C. Esto es con el fin de tener una reserva de agua caliente durante los días de baja insolación.

El gasto de agua promedio para el baño de una personal es de 100 litros (10 minutos de baño), y a una temperatura de 40°C.

Estimamos una temperatura del agua de servicio (fría) de 15°C.

Balance de energía por baño:

$$+ m_3 C_p \Delta T_3 = m_1 C_p \Delta T_1 + m_2 C_p \Delta T_2 \quad \text{II.5.1.}$$

$$m_3 = m_1 + m_2 \quad \text{II.5.2.}$$

donde:

$m_3$  es el gasto de agua por baño en litros.

$m_2$  es el gasto de agua fría en litros.

$m_1$  es el gasto de agua caliente (del termotanque) en litros.

$T_3$  temperatura correspondiente para  $m_3$  en °C.

$T_2$  temperatura correspondiente para  $m_2$  en °C.

$T_1$  temperatura correspondiente para  $m_1$  en °C.

Despejando  $m_1$  de la ecuación II.5.2. y sustituyéndola en la ecuación II.5.1. tenemos:

$$m_3 T_3 = (m_3 - m_2) T_1 + m_2 T_2 \quad \text{II.5.3.}$$

Sustituyendo valores en la ecuación II.5.3. para el primer baño tenemos:

+ Considerando  $C_{p1,2,3}$  constante y  $\Delta T_{1,2,3}$  referidos a cero °C.

$$100 (40) = (100 - m_2)60 + 15m_2$$

$$4000 = 6000 - 60m_2 + 15m_2$$

$$2000 = 45m_2$$

$$\therefore m_2 = 44.44 \text{ litros}$$

$$m_1 = m_3 - m_2$$

$$m_1 = 55.55 \text{ litros}$$

La temperatura del agua en el termotanque después del primer baño es:

$$1000 - 55.55 = 944.45 \text{ litros a } 60^\circ\text{C}$$

$\therefore$  entran 55.55 litros de agua de suministro a  $15^\circ\text{C}$  al termotanque, entonces:

$$T_{\text{tanque}} = \frac{944.45 \times 60 + 55.55 \times 15}{1000}$$

$$T_{\text{tanque}} = 57.5^\circ\text{C}$$

Para el segundo baño sustituyendo valores en la ecuación - -

II.5.3. tenemos:

$$100 (40) = (100 - m_2)57.5 + 15m_2$$

$$4000 = 5750 - 57.5m_2 + 15m_2$$

$$1750 = 42.5m_2$$

$$\therefore m_2 = 41.17 \text{ litros}$$

$$m_1 = 58.83 \text{ litros}$$

La temperatura del agua en el termotanque después del segundo baño es:

$$1000 - 58.83 = 941.17 \text{ litros a } 57.5^\circ\text{C}$$

$\therefore$  entran 58.83 litros a  $15^\circ\text{C}$  al termotanque

$$T_{\text{tanque}} = \frac{944.45 \times 60 + 58.83 \times 15}{1000}$$

$$T_{\text{tanque}} = 54.99^{\circ}\text{C}$$

Para el tercer baño sustituyendo valores en la ecuación - -

II.5.3. tenemos:

$$100 (40) = (100 - m_2)54.99 + 15m_2$$

$$4000 = 5499 - 54.99m_2 + 15m_2$$

$$1499 = 39.99m_2$$

$$\therefore m_2 = 37.48 \text{ litros}$$

$$m_1 = 62.51 \text{ litros}$$

La temperatura del agua en el termotanque después del tercer baño es:

$$1000 - 62.51 = 937.49 \text{ litros a } 54.99^{\circ}\text{C}$$

$\therefore$  entran 62.51 litros a  $15^{\circ}\text{C}$  al termotanque

$$T_{\text{tanque}} = \frac{937.49 \times 54.99 + 62.51 \times 15}{1000}$$

$$T_{\text{tanque}} = 52.49^{\circ}\text{C}$$

Para el cuarto baño sustituyendo valores en la ecuación - -

II.5.3. tenemos:

$$100 (40) = (100 - m_2) 52.49 + 15m_2$$

$$4000 = 5249 - 52.49m_2 + 15m_2$$

$$1249 = 37.49m_2$$

$$\therefore m_2 = 33.31 \text{ litros}$$

$$m_1 = 66.69 \text{ litros}$$

La temperatura del agua en el termotanque después del cuarto

baño es:

$$1000 - 66.69 = 933.31 \text{ litros a } 52.49^{\circ}\text{C}$$

∴ entran 66.69 litros a 15°C al termotanque

$$T_{\text{tanque}} = \frac{933.31 \times 52.49 + 66.69 \times 15}{1000}$$

$$T_{\text{tanque}} = 49.98^{\circ}\text{C}$$

La cantidad de energía que debe suministrar el colector para satisfacer la demanda de calor es:

$$Q = mC_p \Delta T \quad \text{II.5.4.}$$

Donde  $\Delta T$  es el decremento de temperatura del termotanque después cuarto baño hasta 60°C sustituyendo en la ecuación II.5.4. - tenemos:

$$Q = 1000 (0.00419) (60 - 49.98)$$

$$Q = 41.98 \text{ MJ}$$

De la ecuación II.1.2,2 despejando el área del colector para un periodo de un día

$$A_c = \frac{Q_u}{nH_t} \quad \text{II.5.5.}$$

Suponiendo una eficiencia del 50% y la radiación global media diaria de la tabla anterior para el mes de diciembre y sustituyendo en la ecuación II.5.5. tenemos:

$$A_c = \frac{41.98}{0.5 \times 13.93}$$

$$A_c = 6 \text{ m}^2$$

Entonces las dimensiones del colector serán de 2m x 3m.

### SELECCION DEL DIAMETRO DE TUBO DEL COLECTOR:

El diametro de tubo del colector, el cual es muy comunmente usado es 0.0127 m (1/2" nominal) debido a que:

1) Un diámetro menor incrementa la resistencia al flujo, elevando la caída de presión, lo cual debe evitarse, pues la circulación (del fluido de trabajo) es por convección libre (termosifón).

2) Un diámetro más grande disminuye la resistencia del flujo, pero la transferencia de calor del tubo al fluido hacia el centro del mismo será mas deficiente (la temperatura dentro de un cilindro hueco es una función logarítmica del radio).

Entonces, el diámetro de 0.0127 m según experimentos efectuados, está dentro de un equilibrio tomando en cuenta las condiciones anteriores (dentro de los diámetros comerciales).

De la tabla II.1.5.1 escogemos la distancia entre tubos - -  $W = 0.125$  m, el espesor de la placa  $\delta = 0.0003$  m, ambos de cobre.

### CALCULO DEL NUMERO DE TUBOS DEL COLECTOR:

$$\text{número de tubos} = \frac{\text{largo del colector}}{\text{distancia entre tubos}}$$

$$\text{número de tubos} = \frac{3}{0.125} = 24 \text{ tubos}$$

Los cabezales (dos) del colector son de 0.0508 m (2" nominal) para reducir las pérdidas por fricción, ya que en ellos no se produce una gran transferencia de calor debido a su pequeña área con respecto del área del colector, y por lo tanto es más importante - las pérdidas por fricción, que la transferencia de calor.

A la placa absorbadora (placa y 24 tubos) se le hace un tratamiento para obtener una superficie selectiva (ver sección II.2).

#### CALCULO DEL ESPESOR DE AISLAMIENTO EN LA BASE Y EL BORDE:

Para determinar el espesor óptimo del aislamiento usamos el programa solar III (ver apéndice A), manteniendo constantes todos los parametros (dimensiones y propiedades) excepto el espesor del aislamiento, hasta lograr la más alta eficiencia del colector en función del espesor de aislamiento. Se determinó que el más adecuado es de 0.05 m (un espesor mayor no produce un aumento significativo en la eficiencia del colector), el material es lana de vidrio y tiene una conductividad térmica  $K = 0.045 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  a una temperatura media de  $90^\circ\text{C}$  y una densidad de  $49.03 \text{ Kg/m}^3$ .

#### DETERMINACION DEL NUMERO DE CUBIERTAS:

En un proceso similar para el cálculo del aislamiento se determina el número de cubiertas más adecuado. Resultó en nuestro caso ser de dos cubiertas.

La separación entre cubiertas para reducir la transferencia de calor es de 0.025 m y entre la primera cubierta y la placa absorbadora de 0.025 m (ver sección II.1.12).

La figura II.5.1. muestra las dimensiones del colector.

Acotación: m

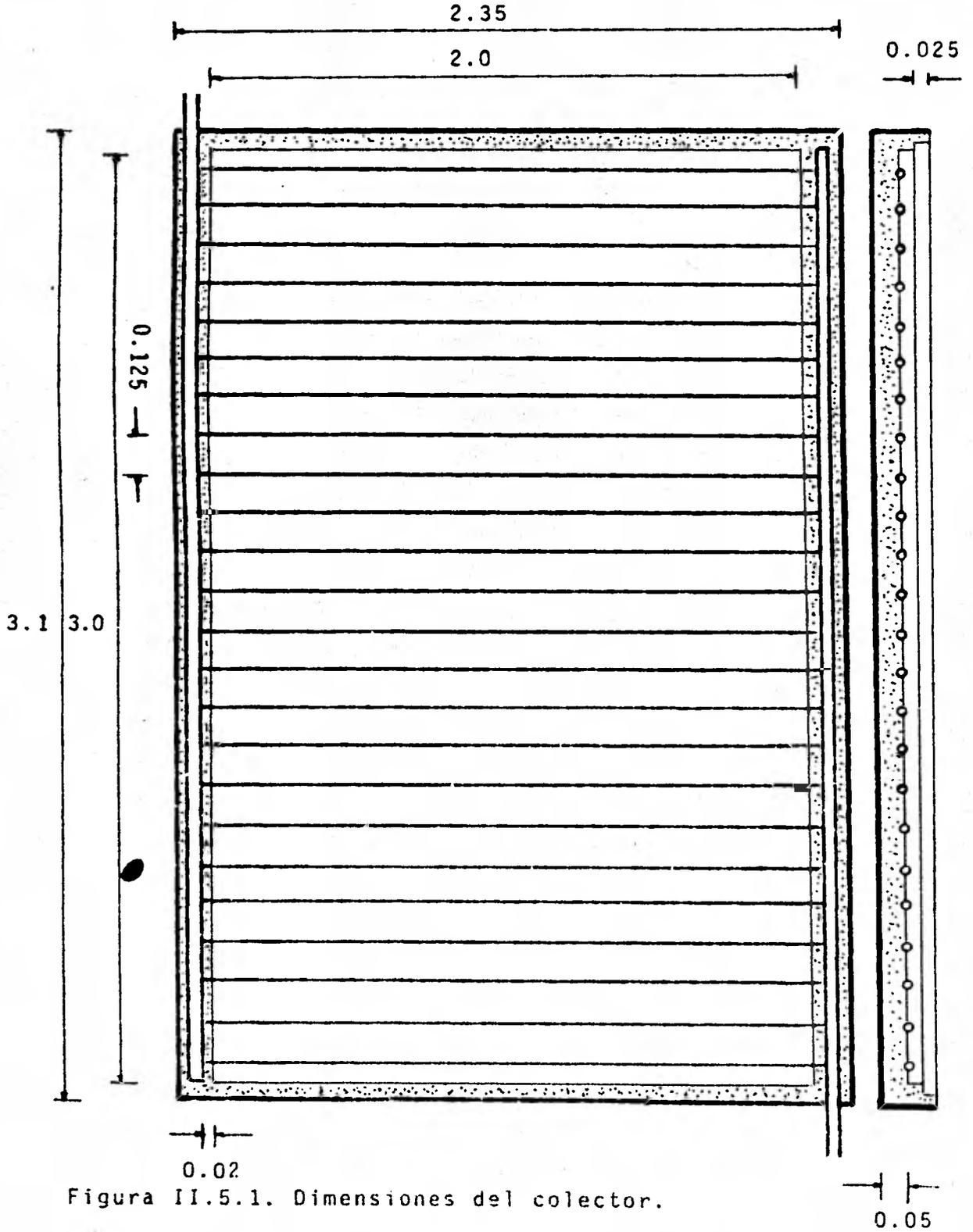


Figura II.5.1. Dimensiones del colector.

## SELECCION DEL TERMO-TANQUE:

El tanque tiene una capacidad de 1000 litros, el material del cual está hecho de asbesto, y tiene las siguientes dimensiones:

Radio interior ( $r_1$ )	0.432 m
Radio exterior ( $r_2$ )	0.457 m
Altura (L)	1.7 m

La entrada de agua al tanque proveniente del colector, es a las 2/3 partes de la altura del tanque, para provocar una buena -- estratificación en este<sup>†</sup>. Esta suposición será ratificada, determinando si existe un flujo de masa en el sistema considerando las -- pérdidas por fricción y la carga de termosifón.

La salida por la parte inferior lateral del tanque y la extracción del agua caliente (baño) es por la parte superior.

## CALCULO DEL AISLAMIENTO DEL TERMO-TANQUE:

Como la mayor pérdida de calor en el tanque es primordialmente en la noche, éste por difusión y conducción en la pared interior -- tenderá a desestratificarse y en consecuencia no habrá movimiento -- del fluido, debido a esto consideramos que el coeficiente de transferencia de calor por convección,  $h_i$ , es despreciable.

De la ecuación II.1.4.9 obtenemos el coeficiente de transferen

† Se ha encontrado que para tener una mejor circulación en sistemas termosifónicos la altura de entrada del agua caliente proveniente del colector al tanque es a las 2/3 partes del tanque y la altura del tanque con respecto del colector es de 0.6 m según D. Chinnery (Ref. 16).

cia de calor por convección debido al viento, el cual se considera que actúa de igual forma sobre el tanque y el colector.

Tomando las dimensiones de la casa y del apéndice B la velocidad del viento tenemos:

$$h_w = \frac{8.6 (5)^{0.6}}{(5.919)^{0.4}}$$

$$h_w = 11.09 \text{ W/m}^2\text{°C.}$$

El flujo de calor radial a través del termotanque, considerando como cilindros concéntricos (ver figura II.5.2. ) se encuentra usando la ecuación II.5.6.

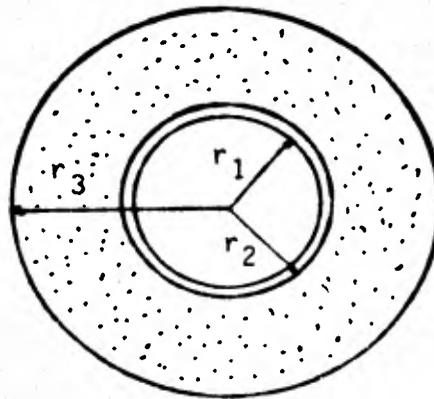


Figura II. 5.2. corte transversal del termotanque

$$q_{\text{tanque}} = \frac{T_i - T_a}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi K_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi K_2 L} + \frac{1}{2\pi r_3 L h_w}} \quad \text{II.5.6.}$$

$k_1$  es la conductividad térmica del tanque,  $k_2$  la conductividad térmica del aislante,  $r_3$  es el radio exterior del termotanque considerando el aislamiento ( $r_3$  menos  $r_2$  es el espesor del aislamiento),  $L$  la altura del termotanque,  $T_i$  la temperatura del agua en el termotanque y  $T_a$  la temperatura ambiente.

Para obtener el espesor óptimo de aislamiento evaluamos la ecuación II.5.6. variando el valor de  $r_3$  tal que produzca un bajo flujo de calor. Sustituyendo valores en la ecuación II.5.6. y dejándola en función de  $r_3$  para obtener la gráfica mostrada en la figura II.5.3. tenemos:

$$q_{\text{tanque}} = \frac{60 - 0}{\frac{\ln(0.457/0.432)}{2\pi(0.319)(1.7)} + \frac{\ln(r_3/0.457)}{2\pi(0.045)(1.7)} + \frac{1}{2\pi(1.7)(11.09)r_3}}$$

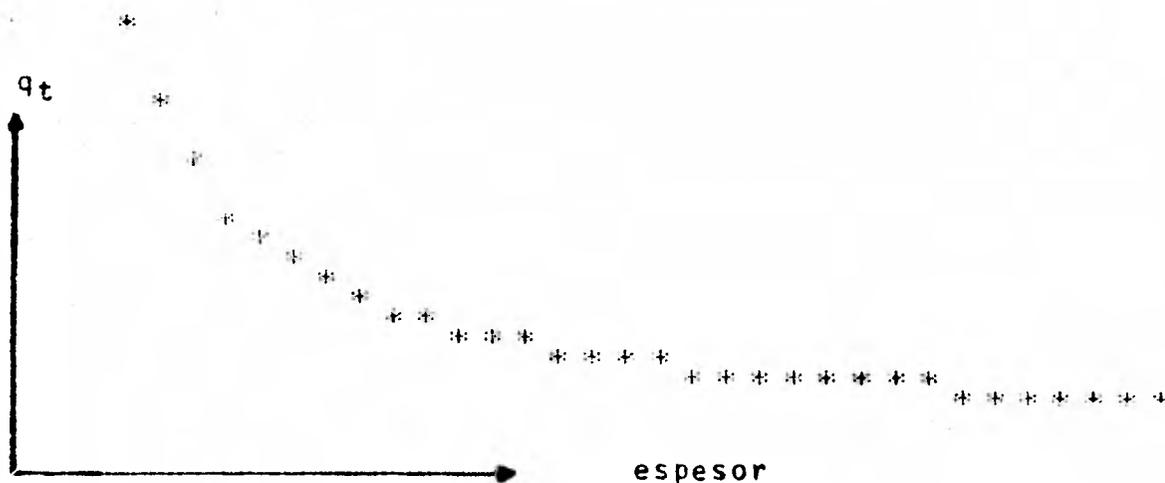


Figura II.5.3. variación del flujo de calor en el termotanque contra el espesor de aislamiento.

Como puede observarse de la figura II.5.3. el espesor de 0.10 m es el más adecuado, un valor más grande no produce una disminución significativa en el flujo de calor.

#### CALCULO DE (UA) DEL TERMOTANQUE:

El coeficiente total de transferencia de calor para el termotanque es:

$$U_{\text{tanque}} = \frac{1}{\frac{r_3 \ln(r_2/r_1)}{K_1} + \frac{r_3 \ln(r_3/r_2)}{K_2} + \frac{1}{h_w}} \quad \text{II.5.7.}$$

Sustituyendo valores en la ecuación II.5.7. y con el espesor de 0.10 m de aislante tenemos:

$$U_{\text{tanque}} = \frac{1}{\frac{0.557 \ln(0.457/0.432)}{0.319} + \frac{0.557 \ln(0.557/0.457)}{0.045} + \frac{1}{11.09}}$$

$$U_{\text{tanque}} = 0.3791 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

El área exterior del termotanque es:

$$A_{\text{tanque}} = A_{\text{pared}} + 2A_{\text{tapa}}$$

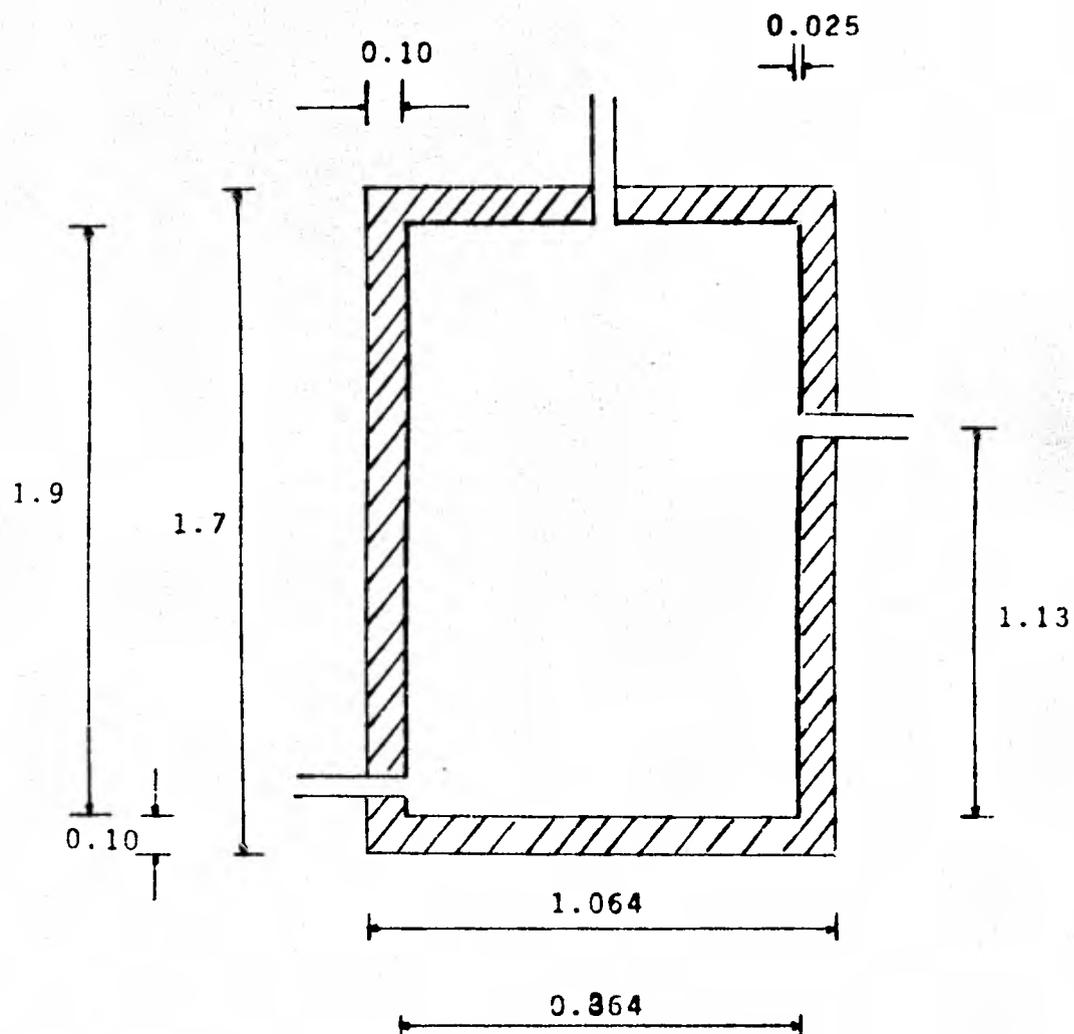
$$A_{\text{tanque}} = 2\pi(0.557)(1.7+2(0.10)+2(0.0254))+2\pi(0.557)^2$$

$$A_{\text{tanque}} = 8.7766 \text{ m}^2$$

Entonces:

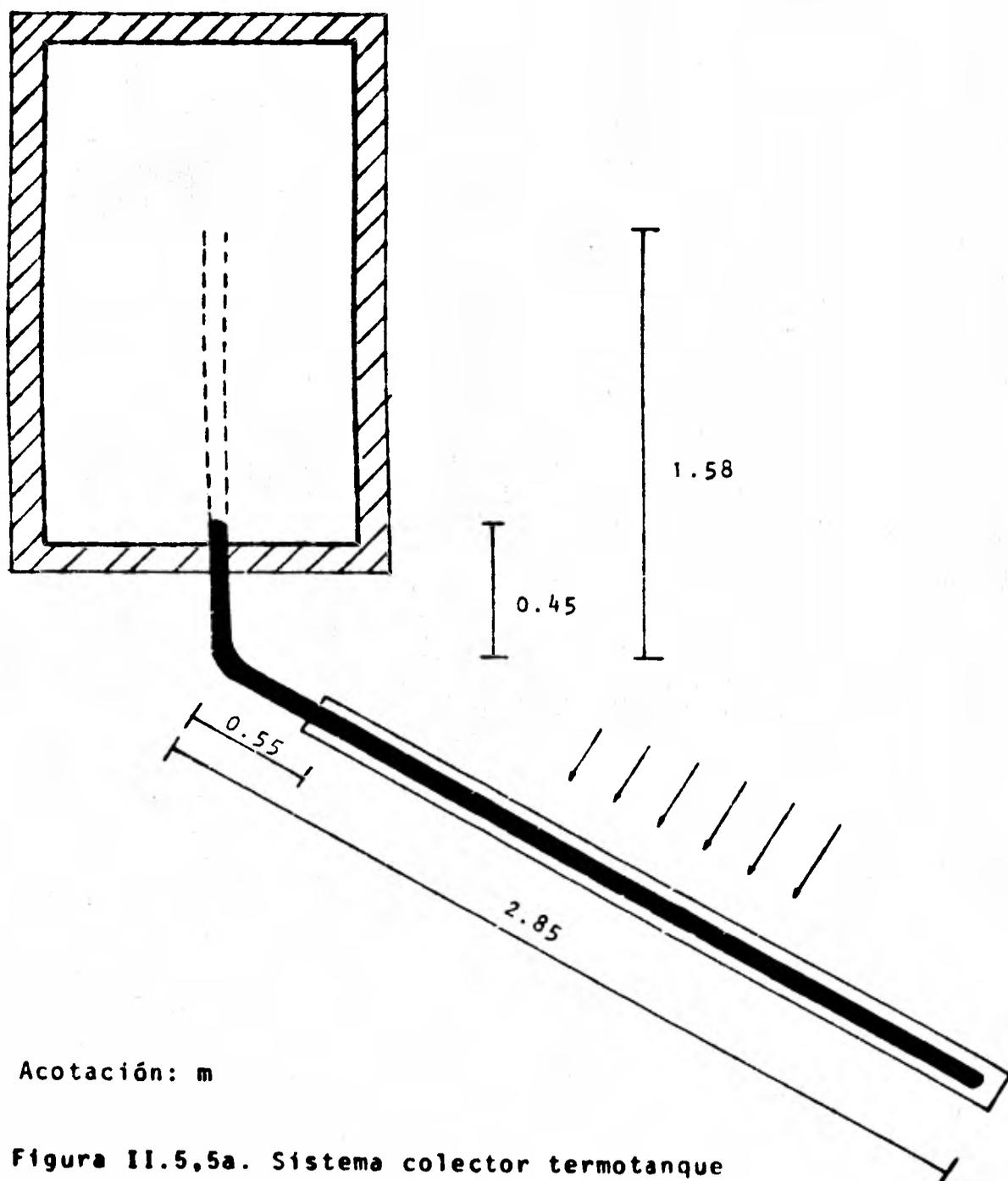
$$(UA)_{\text{tanque}} = (0.3791)(8.7766) = 3.327 \text{ W/°C}$$

Para un período de una hora  $(UA)_{\text{tanque}} = 1.197 \times 10^{-2} \text{ MJ}$



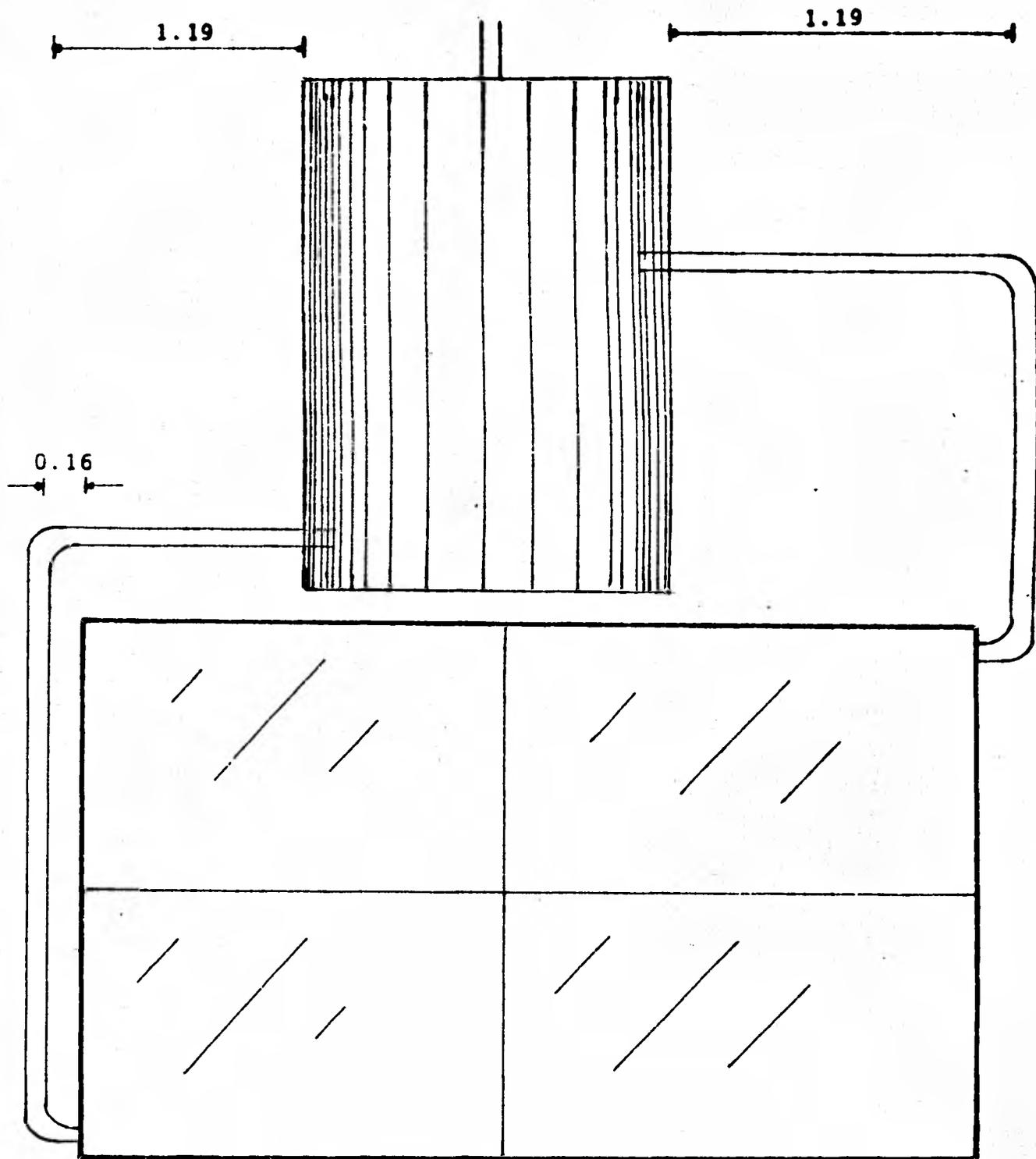
Acotación: m

Figura II.5.4. Dimensiones del termotanque.



Acotación: m

Figura II.5.5a. Sistema colector termotanque



Acotación: m

Figura II.5.5b. Sistema colector termotanque.

### CALCULO DEL AISLAMIENTO DE LA TUBERIA DE CONEXION:

Para este cálculo necesitamos conocer el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el fluido y las paredes del tubo,  $h_{fi}$ , el cual para flujo laminar esta entre 50 a 300  $W/m^2 \cdot ^\circ C$  - Ref.(2).

Usaremos un valor promedio de 150  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ , ya que la variación de  $h_{fi}$  en el rango anterior no modifica el comportamiento del sistema en forma apreciable y en consecuencia lo consideramos constante a este valor.

La tubería de conexión es de cobre de 0.05397 m de diámetro - (2" nominal), la longitud equivalente de la misma se obtiene de la figura II.5.5. El flujo de calor radial se obtiene de:

$$q_{\text{tubería}} = \frac{T_i - T_a}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_{fi}} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi K_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi K_2 L} + \frac{1}{2\pi r_3 L h_w}}$$

II.5.8.

Donde L es la longitud equivalente de la tubería,  $r_3$  es el radio exterior de la tubería considerando el aislamiento,  $r_2$  y  $r_1$  son el radio exterior e interior de la tubería respectivamente,  $K_1$  la conductividad térmica del tubo y  $K_2$  la conductividad térmica del aislante. Para obtener el espesor óptimo usamos el mismo método que para el cálculo del espesor de aislamiento del termotanque, sustituyendo valores en la ecuación II.5.8. tenemos:

$$q_{\text{tubería}} = \frac{60 - 0}{\frac{1}{2\pi(0.0255 \times 3.48 \times 150)} + \frac{\ln\left(\frac{0.0269}{0.0255}\right)}{2\pi(385 \times 3.48)} + \frac{\ln(r_3/0.0269)}{2\pi(0.045 \times 3.48)} + \frac{1}{2\pi(3.48 \times 11.0)}}$$

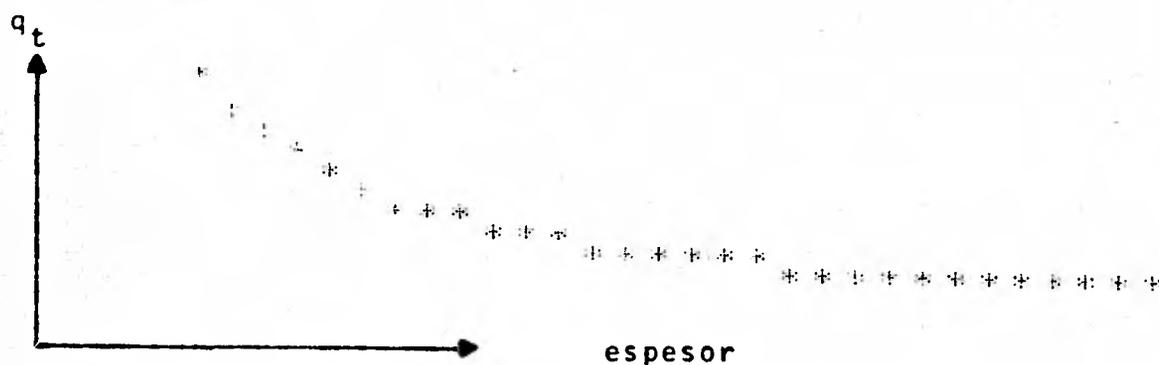


Figura II.5.6. variación del flujo de calor en la tubería --  
contra el espesor de aislamiento.

De la figura II.5.6. observamos que para un espesor de 0.05 m las pérdidas de calor tienden a ser constantes, por lo tanto es el valor óptimo del espesor de aislamiento.

La otra sección de tubería entre la salida del termotanque y el colector es más larga, pero transporta agua a menor temperatura y por lo tanto las pérdidas de calor son menores, entonces el espesor del aislamiento es también de 0.05 m.

### SIMULACION DEL SISTEMA COLECTOR TERMOTANQUE:

En el diseño específico de un sistema colector termotanque el cual funciona normalmente, se consideran constantes los siguientes parámetros:

- 1) Factor de eficiencia de la aleta
- 2) Factor de eficiencia del colector
- 3) Coeficientes y factores de fricción (en la tubería del colector y tuberías de fricción)

Debido a que su variación es muy pequeña.

Para el análisis del comportamiento del sistema (simulación) es muy útil tomar en cuenta las consideraciones anteriores, pues disminuye considerablemente el tiempo de cálculo sin arrojar errores significativos.

Con el solar III (emplea el segundo método para el cálculo de  $\dot{m}$ ) para el día 23 de diciembre (podría ser cualquier otro día, pues este cálculo solamente es para determinar  $F$  y  $F'$  y los factores y coeficientes de fricción los cuales se consideran siempre constantes), -- tenemos:

$$F = 0.9732, \quad F' = 0.9273, \quad \dot{m} = 0.0728 \text{ Kg/seg.}$$

Con  $\dot{m}$  y de la sección II.4.2 (primer método para el cálculo de flujo de masa), evaluamos los coeficientes y factores de fricción.

Para los tubos del colector la longitud y diámetro de los tubos son iguales por lo tanto tenemos que:

$$\dot{m}_{\text{tubo}} = \frac{\dot{m}_{\text{total}}}{\text{número de tubos del colector}} = \frac{0.0728}{24}$$

$$\dot{m}_{\text{tubo}} = 0.00303 \text{ Kg/seg.}$$

Las propiedades del agua a una temperatura de 80°C son:

$$\rho = 974 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 3.55 \times 10^{-4} \text{ Kg/m seg.}$$

$$C_p = 4196 \text{ J/Kg } ^\circ\text{K}$$

$$\text{Y con } d_1 = 0.01445 \text{ m}$$

Tenemos que el número de Reynolds es:

$$R_{e_1} = \frac{4 (0.00303)}{\pi (0.01445) (3.55 \times 10^{-4})}$$

$$R_{e_1} = 752 \Rightarrow \text{flujo laminar}$$

Con  $\alpha_1$  y con la ecuación II.4.2,15 tenemos que:

$$M = 1.0 + \frac{0.038}{\left( \frac{2.04}{0.01445 (752)} \right)^{0.96}}$$

$$M = 1.19$$

CALCULO DE  $f_1$ :

Si  $f'_{cd_1}$  es el coeficiente de pérdidas para flujo laminar completamente desarrollado, entonces  $f_1$  es:

$$f_1 = M' f_{cd_1}$$

Y de la ecuación II.4.2,6:

$$f_1 = M \left( \frac{64}{R_e} \right) = 1.19 \left( \frac{64}{752} \right)$$

$$f_1 = 0.101$$

+ Subíndice "1" se refiere a los tubos del colector.

### CALCULO DE $K_1$ :

En los tubos del colector existe un ensanchamiento y una reducción brusca en cada tubo.

Haciendo la corrección para pérdidas menores, y de la ecuación II.4.2.16 tenemos:

$$K_1 = (K_t^* \text{contracción} + K_t \text{expansión}) \times 2 \quad \text{II.5.9.}$$

Con  $\frac{d_1}{d_2} = 0.283$  y de la Ref. (13) obtenemos:

$$K_t \text{contracción} = 0.43$$

$$K_t \text{expansión} = 0.845$$

Con estos valores sustituyéndolos en la ecuación II.5.9. tenemos:

$$K_1 = (0.43 + 0.845) \times 2$$

$$K_1 = 2.55$$

### PARA LOS CABEZALES:

$$z_2^+ = 3.10 \times 2 = 6.2 \text{ m}$$

$$d_2 = 0.05103 \text{ m}$$

Suponiendo que la masa que fluye por el cabezal es la total - (aunque no es así va aumentando en dirección del flujo, desde  $\dot{m}_{total}/24$  hasta  $\dot{m}_{total}$  en el cabezal superior), el número de Reynolds para el cabezal es entonces:

$$Re_2 = \frac{4 (0.0728)}{(0.05103)(3.55 \times 10^{-4})}$$

+ El subíndice "2" se refiere a los cabezales

\* El subíndice "t" se refiere al flujo turbulento.

$$R_{e_2} = 5116 \Rightarrow \text{flujo turbulento.}$$

NOTA: el flujo empieza hacer turbulento aproximadamente a partir del décimo tubo del colector, por lo tanto podemos considerarlo turbulento en toda la extensión del cabezal.

Del diagrama de Moody Ref. (13) obtenemos:

$$f_2 = 0.037$$

$$K_2 = 0 \text{ (no hay accesorios)}$$

PARA LA TUBERIA DE CONEXION:

El número de de Reynolds es:

$$R_{e_3}^+ = \frac{4 (0.0728)}{\pi(0.05103)(3.55 \times 10^{-4})}$$

$$R_{e_3} = 5116 \Rightarrow \text{flujo turbulento}$$

Del diagrama de Moody Ref. (13) obtenemos:

$$f_3 = 0.037$$

De la sección II.3.3. consideración de diseño número 8 y de la figura II.5.5. (a) y (b) obtenemos la longitud total de la tubería de conexión y es:

$$L_3 = 2 (1.19) + 2 (0.16) + 2.85 + 0.55 + 0.45 + 1.58$$

$$L_3 = 8.13 \text{ m}$$

+ El subíndice "3" se refiere a la tubería de conexión.

## ACCESORIOS EN LA TUBERIA DE CONEXION:

ACCESORIO	K
Orificio de salida de agua del tanque	0.5
6 codos de 90°	0.9x6
Orificio de entrada de agua al tanque	1.0
T o t a l	<u>6.9</u>

Entonces:

$$K_3 = 6.9$$

Sustituyendo valores en la ecuación II.4.2.9 tenemos:

$$f_e = 0.101 + 0.037 (0.01445) (24)^2 \left(\frac{6.2}{2.04}\right) \left(\frac{0.01445}{0.05103}\right)^5 +$$

$$(0.037)(0.01445) (24)^2 \left(\frac{8.13}{2.04}\right) \left(\frac{0.01445}{0.05103}\right)^5$$

$$f_e = 0.1049$$

Sustituyendo valores en la ecuación II. 4.2,10 tenemos:

$$K_e = 2.55 + 6.9 (24)^2 \left(\frac{0.01445}{0.05103}\right)^4$$

$$K_e = 28.1$$

Para los tubos del colector tenemos que:

$$L = 2.04 \text{ m}$$

$$d_i = 0.01445 \text{ m}$$

$$N = 24$$

$$g_o = 9.81 \text{ m/seg.}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación II.4.2,13 tenemos:

$$P = 16 \left( 0.1049 \left( \frac{2.04}{0.01445} \right) + 28.1 \right) / (\pi^2 \times 9.81(974)^2 (0.01445)^4 \times (24)^2)$$

$$P = 0.2976 \frac{\text{m} \cdot \text{seg.}^2}{\text{kg}^2}$$

Evaluando las alturas (ver figura II.4.2.1)

$$h_1 = 3.92 \text{ m}$$

$$h_2 = 4.9 \text{ m}$$

$$h_3 = 6.63 \text{ m}$$

$$h_5 = 5.52 \text{ m}$$

$$h_6 = 7.17 \text{ m}$$

Y sustituyendo estos valores en la ecuación II.4.2,4 tenemos:

$$f(s) = 2(6.63 - 3.92) - (4.9 - 3.92) - \frac{(6.63 - 5.52)^2}{(7.17 - 5.52)}$$

$$f(s) = 3.693 \text{ m}$$

#### CALCULO DE LA CAPACIDAD TERMICA DEL TERMOTANQUE:

Considerando la capacidad térmica del termotanque igual a la capacidad térmica del tanque de asbesto más la capacidad térmica -- del aislante tenemos:

$$W_t = \rho_a V_a C_a + \rho_t V_t C_t \quad \text{II.5.10}$$

Donde el subíndice "a" se refiere al aislante (lana de vidrio) y el subíndice "t" se refiere al tanque (asbesto).

Volumen del tanque de asbesto:

Calcularemos el volumen entre dos cilindros, ver figura II.5.6.

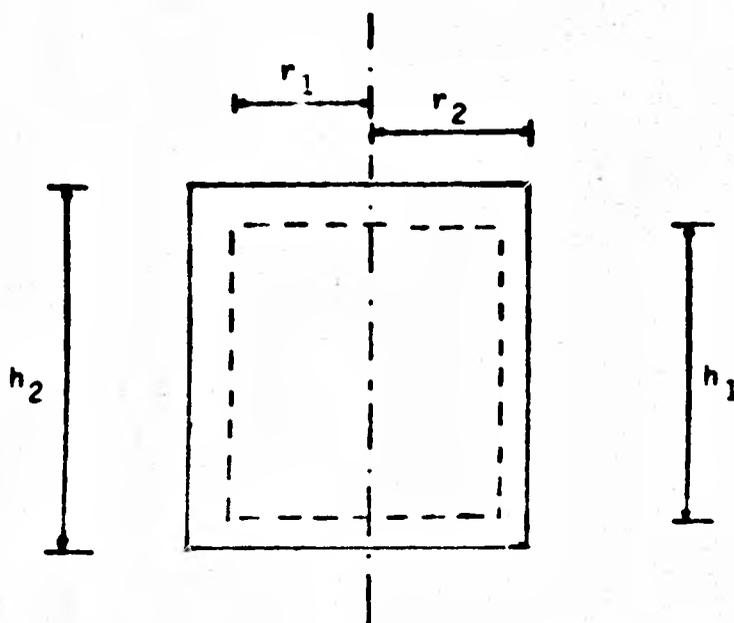


Figura II.5.6 cilindro hueco.

Para el tanque de asbesto de 1000 litros tenemos:

$$h_1 = 1.7 - 2(\text{espesor de las tapas})$$

$$= 1.7 - 2(0.025)$$

$$h_1 = 1.65 \text{ m}$$

$$h_2 = 1.7 \text{ m}$$

$$r_1 = 0.432 \text{ m}$$

$$r_2 = 0.457 \text{ m}$$

El volumen de asbesto, es la diferencia de los volúmenes de los cilindros 1 y 2 es decir:

$$V_t = \pi r_2^2 h_2 - \pi r_1^2 h_1$$

$$= \pi \{ (0.457)^2 (1.7) - (0.432)^2 (1.65) \}$$

$$V_t = 0.148 \text{ m}^3$$

Del mismo modo se calcula el volumen de aislamiento  $V_a$ . Con 0.10 m de espesor de aislamiento ( que se obtuvo anteriormente ) tenemos:

$$h_3 = h_2 + 2(\text{espesor de las tapas})$$

$$h_3 = h_2 + 2(0.2)$$

$$h_3 = 1.9 \text{ m}$$

y con  $r_3 = 0.557 \text{ m}$  tenemos:

$$\begin{aligned} V_a &= \pi r_3^2 h_3 - \pi r_2^2 h_2 \\ &= \pi \{ (0.557)^2 (1.9) - (0.457)^2 (1.7) \} \end{aligned}$$

$$V_a = 0.736 \text{ m}^3$$

Con los valores de:

$$V_t = 0.148 \text{ m}^3$$

$$V_a = 0.736 \text{ m}^3$$

$$C_t = 0.25 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

$$C_a = 0.157 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

$$\rho_t = 2402 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_a = 52.05 \text{ Kg/m}^3$$

Y substituyéndolos en la ecuación II.5.10 nos da:

$$W_t = 52.05 \times 0.736 \times 0.157 + 2402 \times 0.148 \times 0.25$$

$$W_t = 94.88 \text{ Kcal/}^\circ\text{C} = 3.97 \times 10^5 \text{ J/}^\circ\text{C}$$

CALCULO DEL TERMINO  $\left(\frac{\Delta t}{mc}\right)_t$

Con los valores de:

$$m = 1000 \text{ Kg}$$

$$C_{\text{H}_2\text{O}} = 4190 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = 1 \text{ hora}$$

Sustituyéndolos en la ecuación II.3.2,3 nos da que:

$$\left(\frac{\Delta t}{mc}\right)_t = \frac{1}{1000 \times 4190}$$

$$= 0.2386 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C/J}$$

$$\left(\frac{\Delta t}{mc}\right)_t = 0.2386 \text{ } ^\circ\text{C/MJ}$$

Con los valores obtenidos en esta sección y con el programa solar IV (apéndice A) se realizó la simulación del sistema para los días 22, 23 y 24 de diciembre (únicos días con que contamos con datos horarios de temperaturas).

A continuación se muestran los resultados:



## SOLAR II

DICIEMBRE 22

8-9		13-14	
.7143639808	TAUB	.7671273254	TAUB
.7115406383	TAUD	.7115406383	TAUD
0.447979759	TAUG	0.447979759	TAUG
1.132067354	'S'	2.234267287	'S'
9-10		14-15	
0.75627584	TAUB	0.75627584	TAUB
.7115406383	TAUD	.7115406383	TAUD
0.447979759	TAUG	0.447979759	TAUG
1.749724198	'S'	1.749724198	'S'
10-11		15-16	
.7671273254	TAUB	.7143639808	TAUB
.7115406383	TAUD	.7115406383	TAUD
0.447979759	TAUG	0.447979759	TAUG
2.234267287	'S'	1.132067354	'S'
11-12		16-17	
.7697914583	TAUB	.5547400181	TAUB
.7115406383	TAUD	.7115406383	TAUD
0.447979759	TAUG	0.447979759	TAUG
2.500081995	'S'	.4527649566	'S'
12-13			
.7697914583	TAUB		
.7115406383	TAUD		
0.447979759	TAUG		
2.500081995	'S'		

10-11

71.90683596	TP, M
9.790546464	'QU'
135.6535543	'M'

TEMPERATURA TANQUE  
54.70783159

\* %EF. DEL SISTEMA \*  
53.64095148

SOLAR IV

SIMULACION SISTEMA  
COLECTOR-TERMOTANQUE

DICIEMBRE 22

8-9

59.45481214	TP, M
3.915656794	'QU'
95.04130923	'M'

TEMPERATURA TANQUE  
50.94345358

\* %EF. DEL SISTEMA \*  
40.1605825

9-10

66.09776568	TP, M
7.17405109	'QU'
119.3491905	'M'

TEMPERATURA TANQUE  
52.4625223

\* %EF. DEL SISTEMA \*  
49.59250028

11-12

75.57874502	TP, M
10.87982336	'QU'
143.9505943	'M'

TEMPERATURA TANQUE  
57.19891833

\* %EF. DEL SISTEMA \*  
53.44249612

12-13

77.56996674	TP, M
10.73617441	'QU'
146.8513088	'M'

TEMPERATURA TANQUE  
59.649187

\* %EF. DEL SISTEMA \*  
52.73688186

13-14

77.2982795	TP, M
9.294564008	'QU'
142.8765775	'M'

TEMPERATURA TANQUE  
61.75363023

\* %EF. DEL SISTEMA \*  
50.92353719

14-15  
 74.86831482 TP.M  
 6.446436095 'QU'  
 127.4864595 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
 63.16678767

\* %EF. DEL SISTEMA \*  
 44.56267175

15-16  
 70.08246232 TP.M  
 2.901378404 'QU'  
 94.60402707 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
 63.72377503

\* %EF. DEL SISTEMA \*  
 29.75772722

16-17

TEMPERATURA TANQUE  
 63.57747778

17-18

TEMPERATURA TANQUE  
 63.42274463

18-19

TEMPERATURA TANQUE  
 63.26331252

19-20

TEMPERATURA TANQUE  
 63.10433576

20-21

TEMPERATURA TANQUE  
 62.93496003

21-22

TEMPERATURA TANQUE  
 62.76007047

22-23

TEMPERATURA TANQUE  
 62.58082507

23-24

TEMPERATURA TANQUE  
 62.39637953

24-1

TEMPERATURA TANQUE  
 62.20674868

1-2

TEMPERATURA TANQUE  
 62.0222909

2-3

TEMPERATURA TANQUE  
61.845091

3-4

TEMPERATURA TANQUE  
61.67702695

4-5

TEMPERATURA TANQUE  
61.51572619

5-6

TEMPERATURA TANQUE  
61.36345423

6-7

TEMPERATURA TANQUE  
61.21647168

7-8

TEMPERATURA TANQUE  
61.08304253

'CUATRO DUCHAS'

TEMPERATURA TANQUE  
50.93157217



## SOLAR II

## DICIEMBRE 23

8-9	.7143815995	TAUB	13-14	.7671314916	TAUB
	.7115406383	TAUD		.7115406383	TAUD
	0.447979759	TAUG		0.447979759	TAUG
	1.121618799	'S'		2.234278164	'S'
9-10	.7562855701	TAUB	14-15	.7562855701	TAUB
	.7115406383	TAUD		.7115406383	TAUD
	0.447979759	TAUG		0.447979759	TAUG
	1.749744495	'S'		1.749744495	'S'
10-11	.7671314916	TAUB	15-16	.7143815995	TAUB
	.7115406383	TAUD		.7115406383	TAUD
	0.447979759	TAUG		0.447979759	TAUG
	2.234278164	'S'		1.121618799	'S'
11-12	0.769794269	TAUB	16-17	.3547802465	TAUB
	.7115406383	TAUD		.7115406383	TAUD
	0.447979759	TAUG		0.447979759	TAUG
	2.498725749	'S'		.4520917015	'S'
12-13	0.769794269	TAUB			
	.7115406383	TAUD			
	0.447979759	TAUG			
	2.498725749	'S'			

---

SOLAR IV

SIMULACION SISTEMA  
COLECTOR-TERMOTANQUE

DICIEMBRE 23

8-9  
59.97727456 TP, M  
3.738599794 'QU'  
94.19452613 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
51.72497846

\* XEF. DEL SISTEMA \*  
38.34461328

9-10  
66.79066054 TP, M  
7.118979982 'QU'  
120.2199444 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
53.32838955

\* XEF. DEL SISTEMA \*  
49.23222671

10-11  
72.3009279 TP, M  
9.573092549 'QU'  
135.7217242 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
55.51220127

\* XEF. DEL SISTEMA \*  
52.46680121

11-12  
76.2953306 TP, M  
10.88303422 'QU'  
145.1956323 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
58.00461286

\* XEF. DEL SISTEMA \*  
53.47402818

12-13  
76.16972304 TP, M  
10.66015327 'QU'  
147.5820554 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
60.43367057

\* XEF. DEL SISTEMA \*  
52.37889773

13-14

77.90681988 TP, M  
 9.230070487 'QU'  
 143.4848955 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
 62.52011395

\* REF. DEL SISTEMA \*  
 50.58681622

14-15

75.53014497 TP, M  
 6.473919254 'QU'  
 128.5610378 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
 63.94097098

\* REF. DEL SISTEMA \*  
 44.76845957

15-16

70.7489131 TP, M  
 2.95947466 'QU'  
 94.50358237 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
 64.48560441

\* REF. DEL SISTEMA \*  
 29.297176

16-17

TEMPERATURA TANQUE  
 64.34312902

17-18

TEMPERATURA TANQUE  
 64.19591968

18-19

TEMPERATURA TANQUE  
 64.04484672

19-20

TEMPERATURA TANQUE  
 63.88877874

20-21

TEMPERATURA TANQUE  
 63.72544518

21-22

TEMPERATURA TANQUE  
 63.55772285

22-23

TEMPERATURA TANQUE  
63.38648107

4-5

TEMPERATURA TANQUE  
62.32532524

23-24

TEMPERATURA TANQUE  
63.2111587

5-6

TEMPERATURA TANQUE  
62.16445774

24-1

TEMPERATURA TANQUE  
63.03062498

6-7

TEMPERATURA TANQUE  
62.01061859

1-2

TEMPERATURA TANQUE  
62.84775082

7-8

TEMPERATURA TANQUE  
61.96778518

2-3

TEMPERATURA TANQUE  
62.66025501

'CUATRO DUCHAS'

TEMPERATURA TANQUE  
51.70893367

3-4

TEMPERATURA TANQUE  
62.49295478

## SOLAR I

DICIEMBRE 24		12-13	
-23.41331063	DECL	25.02855512	TETA
		9.862357705	LD
		1.637345671	RB
		.1659015926	RT
		.3931917516	ID
		1.828230574	IB
		3.390645136	IT
8-9		13-14	
56.29356235	TETA	32.42462621	TETA
9.862357705	LD	9.862357705	LD
2.156644663	RB	1.684424586	RB
.0620987034	RT	.1450582307	RT
.1471757899	ID	.3437923584	ID
0.684325848	IB	1.59853735	IB
1.624523702	IT	3.039912392	IT
9-10		14-15	
43.58738344	TETA	43.58738344	TETA
9.862357705	LD	9.862357705	LD
1.810210167	RB	1.810210167	RB
.1078477317	RT	.1078477317	RT
.2556023595	ID	.2556023595	ID
1.188478768	IB	1.188478768	IB
2.409604169	IT	2.409604169	IT
10-11		15-16	
32.42462621	TETA	56.29356235	TETA
9.862357705	LD	9.862357705	LD
1.684424586	RB	2.156644663	RB
.1450582307	RT	.0620987034	RT
.3437923584	ID	.1471757899	ID
1.59853735	IB	0.684325848	IB
3.039912392	IT	1.624523702	IT
11-12		16-17	
25.02855512	TETA	69.66652739	TETA
9.862357705	LD	9.862357705	LD
1.637345671	RB	4.216978896	RB
.1659015926	RT	0.017040435	RT
.3931917516	ID	.0403863421	ID
1.828230574	IB	.1877850622	IB
3.390645136	IT	.8326837456	IT

## SOLAR II

DICIEMBRE 24

8-9			
.7144168207	TAUB	13-14	
.7115406383	TAUD	.7671387748	TAUB
0.447979759	TAUG	.7115406383	TAUD
1.120721596	'S'	0.447979759	TAUG
		2.233108558	'S'
9-10		14-15	
.7563001542	TAUB	.7563001542	TAUB
.7115406383	TAUD	.7115406383	TAUD
0.447979759	TAUG	0.447979759	TAUG
1.748903748	'S'	1.748903748	'S'
10-11		15-16	
.7671387748	TAUB	.7144168207	TAUB
.7115406383	TAUD	.7115406383	TAUD
0.447979759	TAUG	0.447979759	TAUG
2.233108558	'S'	1.120721596	'S'
11-12		16-17	
.7697984778	TAUB	0.554840578	TAUB
.7115406383	TAUD	.7115406383	TAUD
0.447979759	TAUG	0.447979759	TAUG
2.498737961	'S'	.4511319196	'S'
12-13			
.7697984778	TAUB		
.7115406383	TAUD		
0.447979759	TAUG		
2.498737961	'S'		

## SOLAR IV

SIMULACION SISTEMA  
COLECTOR-TERMOTANQUE

DICIEMBRE 24

8-9  
60.91304309 TP, M  
3.84901123 'QU'  
96.31413479 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
52.53388966

\* NEF. DEL SISTEMA \*  
39.50134678

9-10  
67.63146383 TP, M  
7.179021152 'QU'  
121.7817593 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
54.15445716

\* NEF. DEL SISTEMA \*  
49.66805834

10-11  
73.2273717 TP, M  
9.685472905 'QU'  
137.6190788 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
56.37014927

\* NEF. DEL SISTEMA \*  
53.11765331

11-12  
77.76394629 TP, M  
11.29499627 'QU'  
148.709082 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
58.97839695

\* NEF. DEL SISTEMA \*  
55.53095513

12-13  
79.72331184 TP, M  
11.0794104 'QU'  
151.326206 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
61.52575736

\* NEF. DEL SISTEMA \*  
54.47104423

13-14  
 79.23154798 TP, M  
 9.288047922 'QU'  
 145.2677998 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
 63.62899837

\* REF. DEL SISTEMA \*  
 50.93807131

14-15  
 76.60069581 TP, M  
 6.433078973 'QU'  
 129.4231531 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
 65.03875355

\* REF. DEL SISTEMA \*  
 44.50725732

15-16  
 71.84915163 TP, M  
 2.880395866 'QU'  
 95.7623118 'M'

TEMPERATURA TANQUE  
 65.59052893

\* REF. DEL SISTEMA \*  
 29.56071291

16-17

TEMPERATURA TANQUE  
 65.45175234

17-18

TEMPERATURA TANQUE  
 65.30480398

18-19

TEMPERATURA TANQUE  
 65.15056399

19-20

TEMPERATURA TANQUE  
 64.98791079

20-21

TEMPERATURA TANQUE  
 64.81886763

21-22

TEMPERATURA TANQUE  
 64.64259595

22-23

TEMPERATURA TANQUE  
 64.46197244

23-24

TEMPERATURA TANQUE  
 64.28072238

24-1

TEMPERATURA TANQUE  
64.09570592

7-8

TEMPERATURA TANQUE  
62.95188318

1-2

TEMPERATURA TANQUE  
63.90693381

'CUATRO DUCHAS'

TEMPERATURA TANQUE  
52.80078742

2-3

TEMPERATURA TANQUE  
63.73441292

3-4

TEMPERATURA TANQUE  
63.55026628

4-5

TEMPERATURA TANQUE  
63.39031975

5-6

TEMPERATURA TANQUE  
63.23469311

6-7

TEMPERATURA TANQUE  
63.08693666

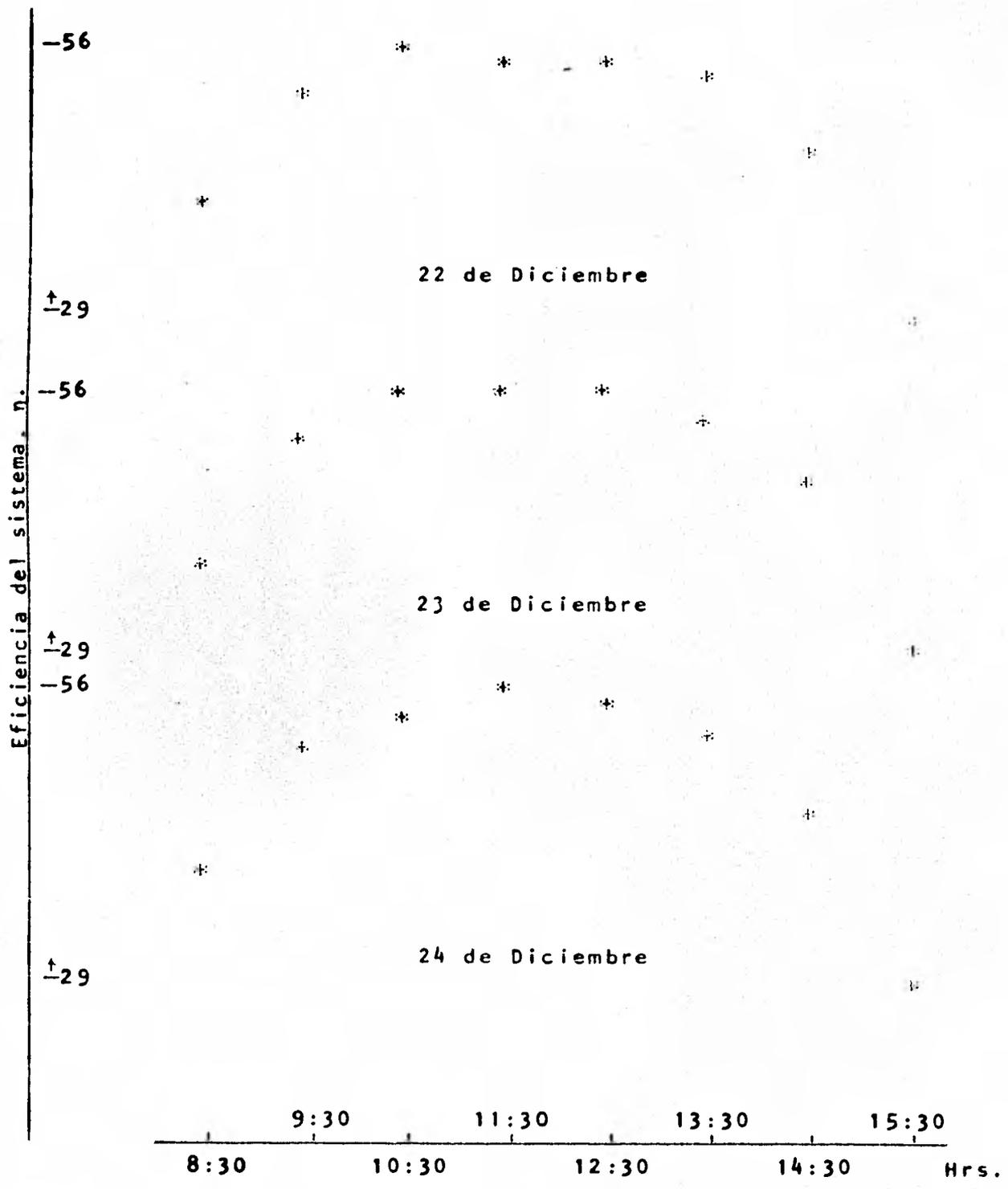


Figura "Eficiencia del sistema" (%).

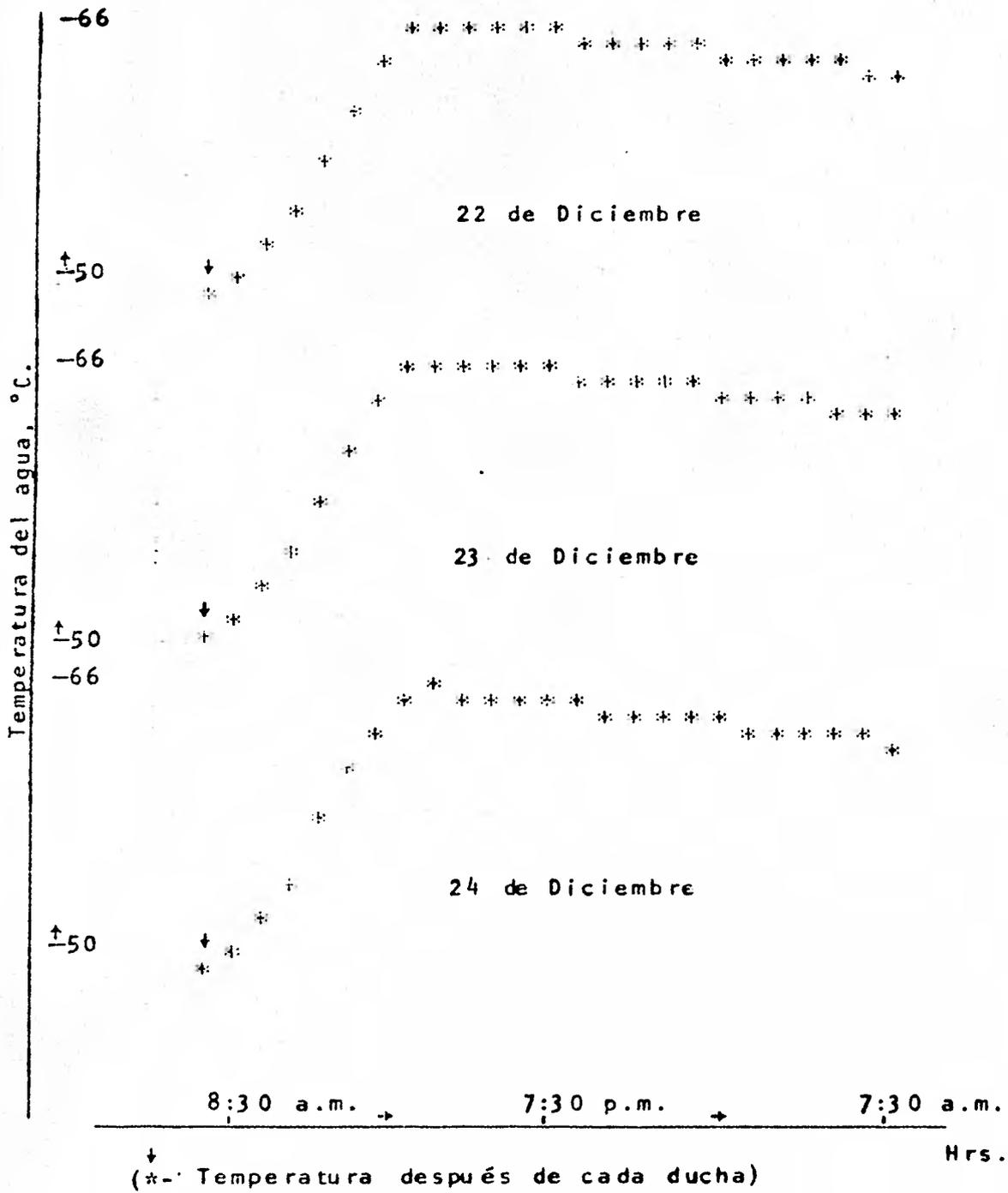
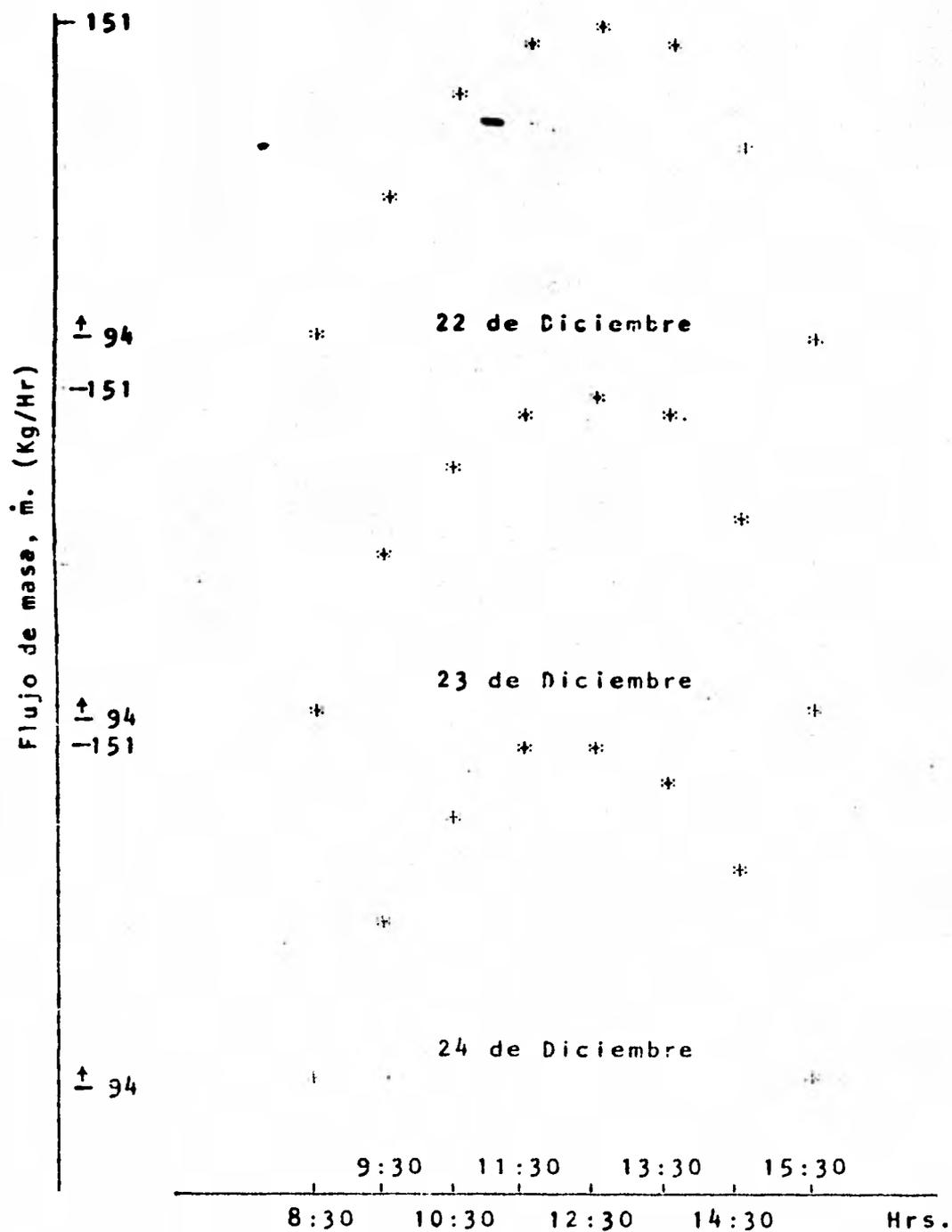


Figura "Temperatura del agua en el tanque"



Figura

"Flujo de masa en el sistema" (m).

## II.6 SISTEMAS PASIVOS DE CLIMATIZACION SOLAR

Los sistemas pasivos de climatización solar utilizan la estructura misma de la vivienda tanto como para coleccionar como para almacenar energía calorífica. Los de calentamiento usan elementos de la construcción para almacenar y distribuir energía. Los de enfriamiento también usan elementos de la construcción para almacenar y distribuir energía y, cuando las condiciones prevaletientes son favorables, descargan calor a las partes frías del medio ambiente (tierra, atmósfera, espacio exterior). En ambos casos la transferencia de energía la construcción, de la construcción al exterior, y dentro de la construcción, se realiza exclusivamente mediante fenómenos naturales; es decir, por conducción, convección y radiación (no emplean ningún dispositivo electro mecánico que consuma energía).

Puesto que en los sistemas pasivos la colección, descarga, almacenamiento, y distribución de energía es generalmente realizada por los elementos arquitectónicos componentes de la construcción, no son fácilmente distinguibles del resto de la estructura, sin embargo, son tres los elementos principales que los constituyen, estos son:

- 1) Un espacio para ser calentado o enfriado
- 2) Un colector donde la radiación solar sea admitida dentro del sistema y convertida a calor por un absorbedor.
- 3) Un almacenador térmico.

En nuestro diseño de acuerdo a las necesidades emplearemos un sistema pasivo de calentamiento solar.

### II.6.1 SISTEMAS PASIVOS DE CALENTAMIENTO SOLAR.

Dos de los conceptos más comunes para calentamiento solar pasivo, los cuales proporcionan una base útil de discusión de los principios y funciones del sistema pasivo son:

#### Ganancia directa y muro colector-almacenador

**Ganancia directa.**- La energía a través de las ventanas puede formar parte del calor necesario para la calefacción de la vivienda. La ventana actúa como un colector y los materiales de construcción de la vivienda almacenan una parte de la energía que incide por las ventanas. Se emplean artificios arquitectónicos, tales como sobresalientes, para sombrear las ventanas cuando el calentamiento no sea requerido. También es necesario, aislar las ventanas (en climas fríos) durante períodos de baja radiación solar para evitar las pérdidas excesivas de calor.

**Muro colector-almacenador.**- En este sistema se combinan las funciones de receptor y almacén de energía en una sola unidad que es parte de la estructura de la vivienda.

Este colector consta de un muro almacenador de material de mampostería ó un tanque de agua, y una ó dos cubiertas para evitar las pérdidas de calor hacia el medio ambiente.

El calor almacenado es transferido desde la superficie interior (lado del muro que da al espacio ó habitación por calentar) hasta la habitación, por radiación y convección; y por convección natural del aire que pasa a través del espacio que existe entre la sup. exterior (lado del muro que da al exterior de la vivienda) y la cubierta de vidrio, (ver figura II.6.1,1).

El aire de la habitación puede entrar el espacio entre el muro

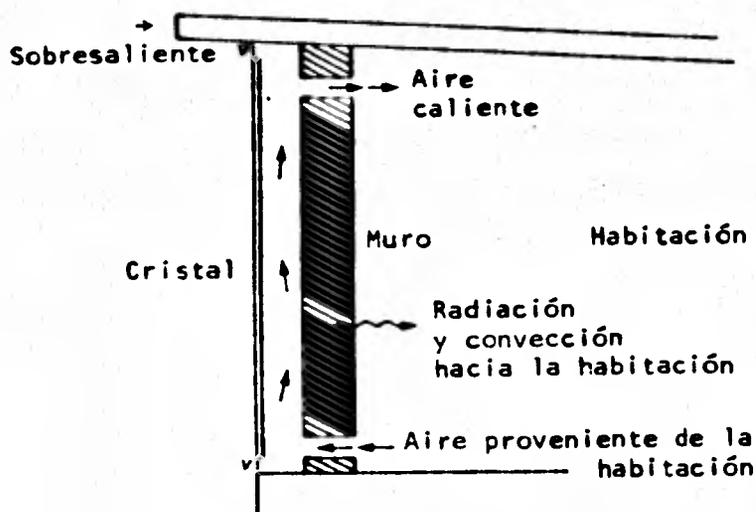


Figura II.6.1,1 Sección de un muro colector almacenador, mostrando dos medios de transferencia de calor hacia la habitación. Son empleadas ventilas para provocar el flujo de aire entre el vidrio y el muro, debido a la convección natural.

y el vidrio, por la abertura situada en la base del muro, y regresar a la habitación a través de la abertura de la parte superior.

Las pérdidas durante los períodos de no insolación pueden ser un factor importante en el rendimiento a largo plazo del muro colector, y por lo tanto quizás sea necesario aislarlo durante este período.

## II.6.2 SELECCION DEL SISTEMA PASIVO DE CALENTAMIENTO SOLAR.

Siguiendo la metodología surgida en la Ref. (5) para la selección de un SPCS, la cual se resume a:

- 1) Análisis climatológico del lugar donde se pretende constar

un SPCS.

- 2) Selección del SPCS que satisfaga las condiciones de confort en la vivienda.

y tomando en cuenta los datos climatológicos y características de la localidad ilustradas en el apéndice B, evaluamos las características que deberá tener el SPCS:

- 1) Proporcionar una carga de calefacción proporcional los 360 días grado (ver sección) en el mes de enero.
- 2) Almacenar calor durante el día y retardar el flujo de calor hacia la vivienda, para satisfacer las necesidades de calefacción por la noche; esto es el día y la noche.
- 3) Atenuar la fluctuación de temperatura<sup>†</sup>, para obtener una mejor condición de confort en el interior de la vivienda.
- 4) De preferencia deberá ser una fachada vertical. Debido a la latitud del lugar  $32.53^\circ$ , en invierno la inclinación -- de los rayos del sol es más pronunciada; en consecuencia -- esta fachada capta los rayos casi perpendicularmente aumentando así la intensidad de radiación por unidad de superficie.

De los cuatro puntos anteriores, el sistema de calentamiento pasivo por ganancia directa podría satisfacer solamente el punto 4 pues no tiene un medio efectivo para almacenar energía y menos para atenuar la fluctuaciones de temperatura.

<sup>†</sup> esta fluctuación también depende del material de construcción y aislamiento de la vivienda.

El sistema de calentamiento pasivo por colector-almacén satisface las cuatro condiciones anteriores, debido a que el muro almacena energía, retarda (según su espesor) el flujo de calor hacia el interior de la vivienda, y atenúa las fluctuaciones de temperatura.

Tomando en cuenta lo anterior, obviamente, seleccionamos el sistema colector-almacén.

Un SPSC para calentamiento del tipo colector-almacén que ha sido estudiado y resulta económico, es el muro Trombe, el cual seleccionamos como el SPCS que satisfará las necesidades de confort de la vivienda en cuestión.

### II.6.3 MURO TROMBE.

La característica principal que diferencia al muro Trombe de otros muros colectores-almacenadores, es que el material del muro es de concreto. Tiene la misma representación esquemática de la figura II.6,1.1.

Este es un colector de alta capacitancia térmica, acoplado directamente a los espacios que han de ser calentados. El mecanismo de transferencia de calor es el mismo que el mencionado en la sección II.6.1 para muros colectores-almacenadores. La circulación del aire por convección natural puede ser controlada por compuertas en las aberturas del muro.

El muro trombe además de almacén forma parte de la estructura de la vivienda, existen gradientes de temperatura a través del muro (variables con el tiempo), los cuales pueden ser determinados considerando a la pared como un conjunto de nodos conectados por una -

red térmica, cada uno con una temperatura y una capacitancia. La red de la figura II.6.3.1 puede representar este modelo. Este ha sido usado por varios investigadores. La red se muestra dividida en "n" nodos situados en la parte media de cada material que forma la pared, (si el muro tiene otros materiales de mampostería que lo formen). Las pérdidas de calor por las cubiertas están basadas en la temperatura de la cubierta interior. El calor es transferido por convección hacia el aire que fluye a través de la abertura que existe entre la superficie absorbadora y el vidrio interior. (El vidrio está frecuentemente más frío que el aire, cuando sucede esto hay entonces una transferencia de calor convectiva del aire al vidrio).

Si no hay flujo de aire, la transferencia de calor a través de la abertura será por convección y radiación.

Monsen (1979) usó modelos detallados de simulación, para un estudio del fenómeno térmico que ocurre en los colectores de muro.

De estas simulaciones se lograron dos observaciones muy útiles. La primera, es que la cantidad de aire que fluye a través de la abertura entre la superficie absorbadora y el vidrio, tiene un pequeño efecto sobre la cantidad total de calor requerida por la habitación. (Esto también fué observado por varios investigadores). Incrementado el flujo de aire, tiene a incrementarse la transferencia de calor por convección, pero también existe un decremento de temperatura en la superficie absorbadora (o exterior) del muro, y por lo tanto disminuye el calor transferido por conducción a través del muro hacia la habitación. El mecanismo y tiempo de transferencia de calor hacia la habitación (ó espacio por calentar) varía,

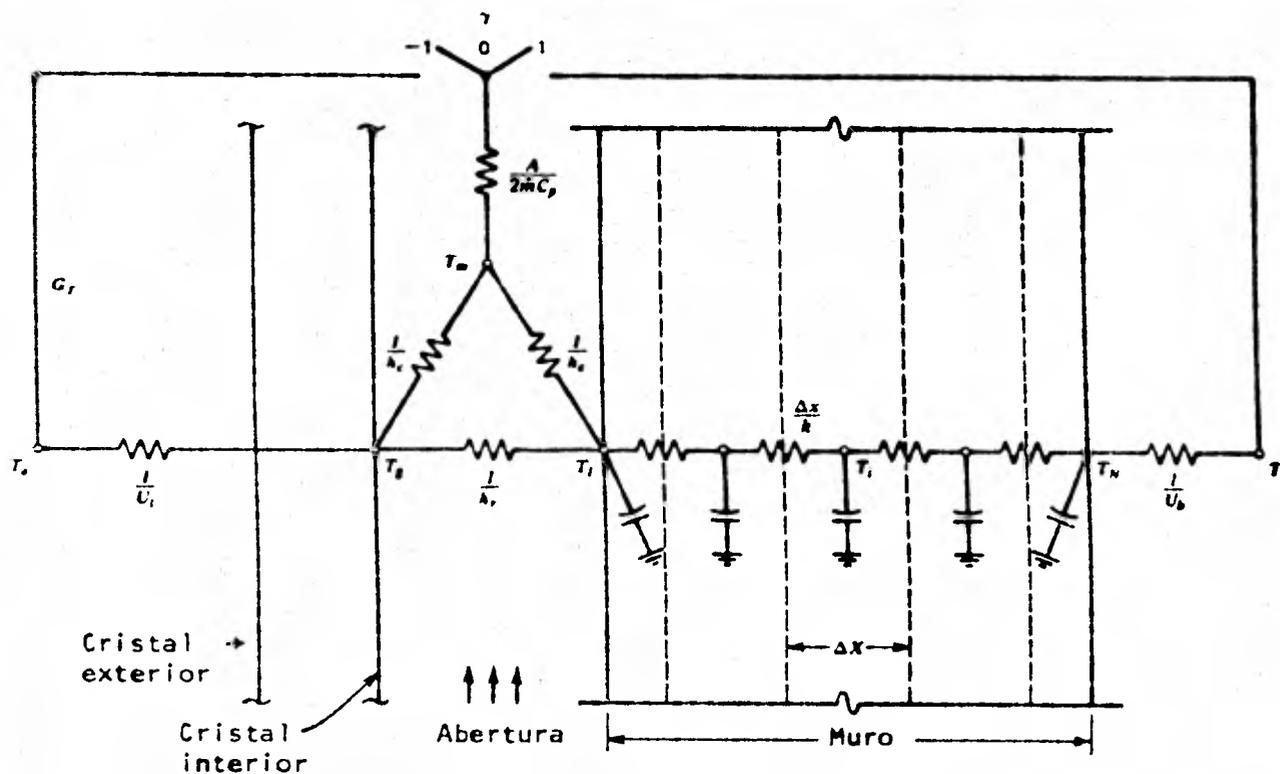


Figura II.6.3,1 Diagrama del circuito térmico que representa a un muro colector - almacenador.

pero en un mes, la energía que incide al espacio calentado, no es sensitiva a las variaciones del flujo de aire.

La segunda observación es que el perfil de temperaturas promedio mensual a través del muro da almacenamiento, es lineal. En la figura II.6.3,2; para un amplio rango de diseños de muros, fueron encontrados resultados similares. Así, para cálculos promedio mensual, la red térmica representativa del muro puede ser reemplazada

con una sola resistencia que está dada por el cociente del espesor entre la conductividad.

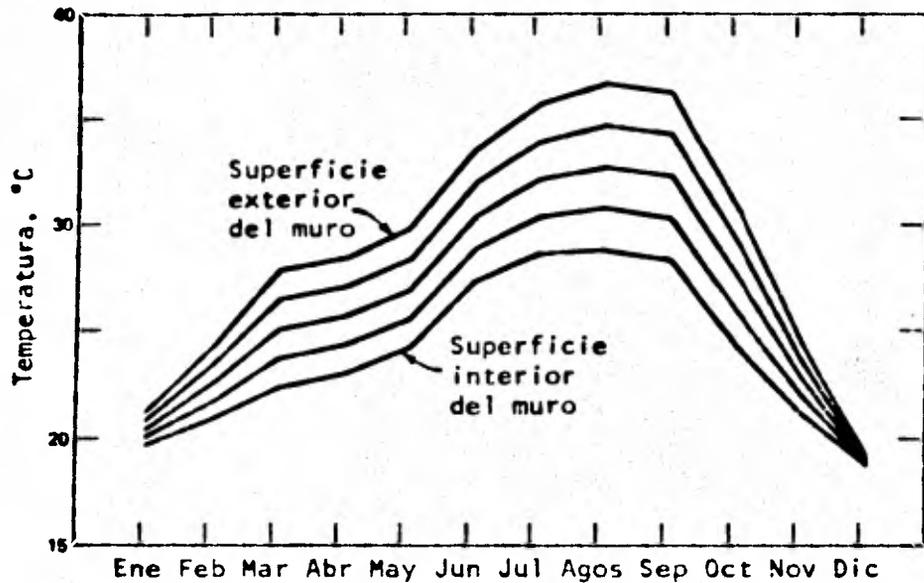


Figura II.6.3,2 Un ejemplo de perfiles de temperatura del muro calculadas bajo un promedio mensual. Los perfiles están en posiciones igualmente espaciadas en el muro.

Con estas observaciones y del hecho de que para un mes, la energía neta almacenada en un muro es pequeña relativa a la carga del edificio, la red térmica de la figura II.6.3,1 se reduce a una red muy sencilla mostrada en la figura II.6.3,3. Bajo una base mensual, la energía solar absorbida por el muro,  $\bar{S}$ , está distribuida en pérdidas hacia el ambiente, y ganancia de energía de la habitación,  $Q_i$ . En forma de ecuación:

$$\bar{S} = U_L (\bar{T}_{w,o} - \bar{T}_a) \Delta t + Q_i \quad \text{II.6.3,1}$$

donde  $\Delta t$  es el número de segundos en un día y  $U_L$  es el coeficiente de pérdidas promedio mensual ( en  $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ ) entre la superficie exterior a  $\bar{T}_{w,o}$  y la temperatura ambiente  $\bar{T}_a$ , y puede encontrarse de la ecuación II.1.4,8. La energía hacia la habitación se obtiene de:

$$Q_i = \frac{U_i k}{k + eU_i} (\bar{T}_{w,o} - \bar{T}_h) \Delta t \quad \text{II.6.3,2}$$

donde  $U_i$  es el coeficiente de transferencia de calor entre la superficie interior del muro y el espacio calentado, "e" es el espesor del muro, y  $\bar{T}_h$  es la temperatura promedio de la habitación.

Cuando se emplea aislamiento nocturno, el producto  $U_L \Delta t$  es --reemplazado por:

$$U_L \Delta t = U_{L,d} (\Delta t - \Delta t_n) + U_{L,n} \Delta t_n \quad \text{II.6.3,3}$$

donde  $\Delta t_n$  es el número de segundos durante el cual de aislamiento está en su lugar. Y  $U_{L,n}$  coeficiente de pérdidas durante este período.

Las ecuaciones II.6.3,2 , II.6.3,3 y II.1.4,8 puede ser resueltas simultáneamente para  $Q_i$ ; energía promedio entrando al espacio - calentado a través del colector muro-almacenador (muro Trombe).

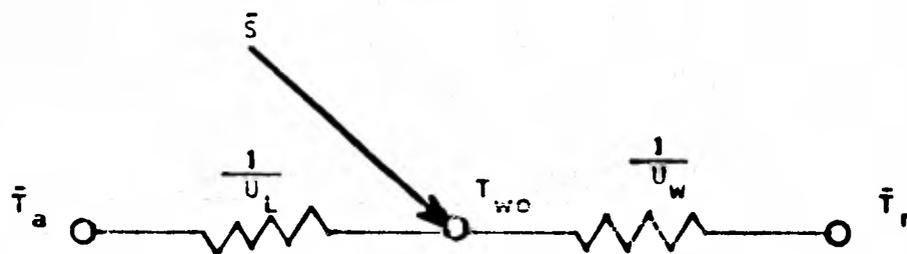


Figura II.6.3,3 Modelo de una red lineal simple de un muro colector.

\* K = Conductividad térmica del material de muro.

#### II.5.4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA EL MURO TROMBE

Para diseñar el muro Trombe es conveniente tomar en cuenta lo siguiente:

1) El espesor del muro deberá ser el necesario para retardar el flujo de calor hacia la vivienda (un tiempo aproximado de 10 horas ya que en la noche es cuando las temperaturas son más bajas y debe suministrarse calor para estar en la zona de confort.

2) La superficie exterior del muro debe ser de color oscuro para absorber la mayor cantidad de energía radiante y tener una baja emisión de calor (pintura selectiva si es posible).

La superficie interior de la vivienda debe ser de color clara para tener el efecto contrario al anterior.

3) Para reducir las pérdidas de calor por el muro se usa aislamiento nocturno, que puede ser, una persiana corrediza entre las dos cubiertas de vidrio, o aislamiento por la parte exterior de las cubiertas.

4) Las aberturas por las cuales circula el aire se deben diseñar de tal manera, que reduzcan la caída de presión del aire circulante.

5) Usar un material desecante entre las cubiertas y el muro para evitar la formación de vapor.

## II.7 DETERMINACION DE LA CARGA DE CALEFACCION Y CRITERIOS DE CONFORT.

Para sistemas convencionales de calefacción, es ordinariamente suficiente estimar la carga de calentamiento de diseño (ej: la carga máxima posible) a fin de evaluar el equipo de calentamiento, pero esto provoca que se tenga equipos demasiado grandes.

Para diseñar sistemas de calentamiento solar es necesario estimar la carga de calor promedio mensual, basada en datos climatológicos de varios años (mas de 4 años).

Una variedad de factores influyen en la carga de calor tales - como: la localización geográfica de la vivienda, su diseño arquitectónico, orientación y calidad de los materiales de construcción, y el particular estilo de vida de los ocupantes.

Muchos metodos diferentes de cálculo de cargas de calor han sido desarrollados, desde al mas simple hasta simulaciones computadas usando datos climatológicos horarios.

### II.7.1 METODO DIA-GRADO

El método día-grado (D.G) para el calculo de cargas de calefacción es adecuado para estimar las cargas de calor promedio mensual necesarias para diseñar el sistema pasivo de calentamiento solar. - Ya que esta basado en el principio de que la energía requerida para calentar un espacio (vivienda) depende principalmente de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior.

El número de día-grado (D.G) en un solo día es la diferencia - entre 18.3 °C y la temperatura media diaria (calculada como un promedio de la máxima y mínima diaria). Se toma el valor de 18.3 °C co

mo referencia, y no el valor de la temperatura de confort de 24°C, porque la generación de energía dentro de la vivienda, tal como luces, estufa, aparatos eléctricos, gentes, etc. y la energía solar ganada a través de las ventanas, son suficientes para elevar la temperatura de 18.3 °C hasta la temperatura de confort.

Para conocer el número de días-grado en un mes se hace la suma de los días-grado diarios. La carga de calor de la vivienda en un mes, mantenida a una temperatura de 24°C, es proporcional al número de días-grado y es:

$$L_m = (UA)_v(D.G) \quad \text{II.7.1,1}$$

donde  $L_m$  es la carga mensual de calor y  $(UA)_v$  es el producto del coeficiente total de transmisión de calor por el área de la vivienda (una metodología de cálculo para  $(UA)_v$  esta dada en la Ref. (14) --

#### II.7.2 CRITERIOS DE CONFORT.

Para construcciones residenciales, hay límites en la variación de las condiciones climáticas interiores (temperatura y humedad), consideradas confortables para la mayoría de la gente.

Los límites no están bien definidos en sí a un grado subjetivo. Estos dependen de la actividad de los individuos en la vivienda y su ropa. El aire en movimiento es también importante, como lo son las temperaturas de las superficies interiores con las cuales un ocupante intercambia radiación.

La figura II.7.2,1 muestra la nueva escala de temperatura efectiva, la zona de confort, en una carta psicométrica, dada por Ref.(14).

Al climatizar la vivienda es deseable que las condiciones climáticas (temperatura y humedad) estén dentro de la zona de confort -

(mostrada en la fig. II.7.2,1).

El calentamiento necesario calculado con el método día-grado, para que las condiciones climáticas dentro de la vivienda estén en la zona de confort, deberá ser suministrado por el sistema pasivo de calentamiento solar.

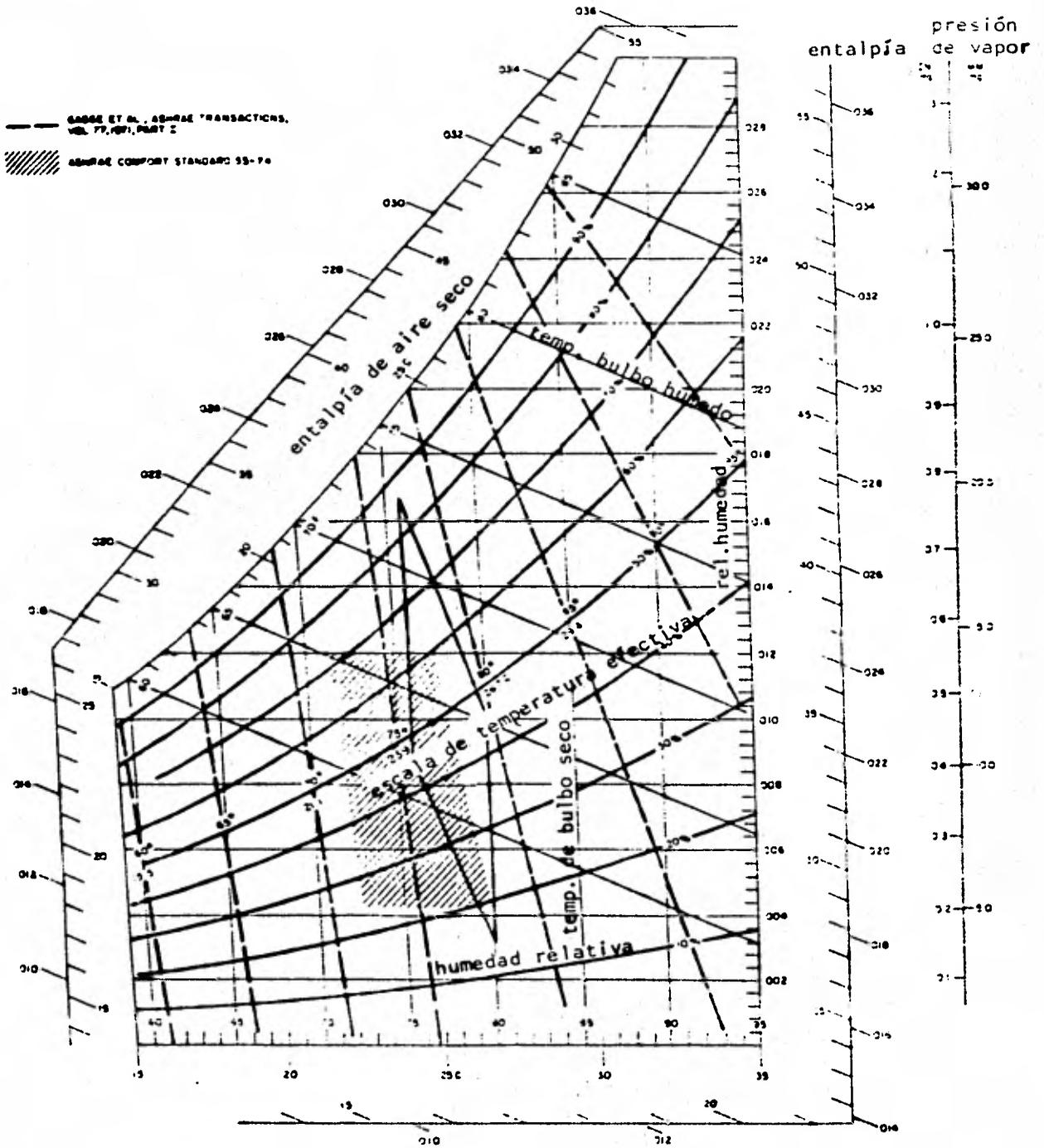


Figura II.7.2,1 Zona de confort y escala de temperatura efectiva.

## II.8 PROPIEDADES Y EFECTOS DE LOS MATERIALES

### II.8.1 BALANCE DE TEMPERATURA EN EL INTERIOR DE LA CONSTRUCCION

Todos los impactos externos de calor, tienen que pasar a través de la pared de la construcción antes de afectar las condiciones internas de temperatura. El proceso de flujo de calor hacia el interior del material de la pared, es comparable a la absorción de humedad por un material poroso. Las capas sucesivas de la estructura llegan a "saturarse" de calor hasta que finalmente el efecto es filtrado hacia la superficie interior de la pared. La fluctuación diaria de temperatura (carga), más o menos sinusoidal, llega a ser deformada en amplitud y retardada en tiempo. Ambas funciones del material pueden ser utilizadas favorablemente para balancear las condiciones en el interior de la estructura.

Por ejemplo, en construcciones gruesas tal como las construcciones antiguas, en un día caliente de verano, se experimenta una frescura confortable. En tales estructuras la gran masa de material de mampostería absorbe y refleja fresco de la noche anterior, como resultado de un retraso de la temperatura.

Bajo muchas condiciones, las estructuras delgadas son bastante indeseables, estando a merced de agentes externos.

El objeto de esta sección es definir los requerimientos de material para una pared opaca, la cual por distribución y amortiguamiento, balanceará los impactos térmicos externos. Estas cualidades del material pueden ser determinadas, investigando sus propiedades, comparando brevemente los problemas referentes a la

humedad y deterioro y examinando en detalle, los factores de transmisión de calor y las características del período de retraso.

### II.8.2 CALOR ENTRANTE SOBRE LA SUPERFICIE EXTERIOR DEL MATERIAL

Las fuerzas o impactos térmicos que actúan sobre la parte exterior de una estructura son combinaciones de impactos convectivos y radiativos. La componente de radiación consiste de la radiación solar incidente y del intercambio de calor radiante, con el exterior circundante y con el cielo. El impacto de calor convectivo es una función del intercambio con la temperatura del aire circundante, y puede ser acelerado por el movimiento del aire. La cantidad de energía radiante absorbida por la superficie exterior, depende de la absorptividad, reflectividad y emisividad del material; la reflectividad de radiación de onda larga de los materiales, depende de la densidad y de la composición molecular del mismo.

El comportamiento altamente selectivo de materiales con respecto a la radiación térmica y solar, puede ser utilizado favorablemente según las circunstancias climáticas existentes. (Ref.18).

En áreas donde el calentamiento es alternado con períodos fríos, la reflectividad y absorptividad son deseables a tiempos diferentes. Arquitectónicamente esto se puede resolver, mediante el conocimiento del curso del sol en las diferentes estaciones; los rayos débiles de invierno llegan a ser depositados en superficies absorbentes (color oscuro), y los rayos de verano de gran elevación pueden ser interceptados por elementos de la construcción de

gran reflectividad.

### II.8.3 EFECTOS DE HUMEDAD

Los materiales absorben humedad de acuerdo a su calidad higroscópica. En general, las substancias orgánicas tienen más propiedades absorbentes que los materiales inorgánicos. Con el contenido de humedad aumentado, los materiales muestran más alta -- transmitancia de calor a causa de la alta conductividad térmica del agua.

Un problema de humedad, el cual no está referido al rendimiento térmico, es la condensación. El aire con un alto contenido de vapor de agua, penetra a través de los materiales de la estructura, hacia las áreas de baja presión de vapor. Generalmente la dirección del flujo de humedad es desde el lado más caliente hacia el lado más frío. Teóricamente la condensación debe llevarse a cabo, donde el aire saturado llega a su temperatura de rocío, dentro de la estructura:

Métodos de eliminación de condensación en la estructura.

- a) Por reducción de la cantidad de humedad contenida en el interior.
- b) Por el abastecimiento de una superficie resistente al vapor (barrera), sobre el lado caliente de la zona de punto de rocío.
- c) Por ventilación del lado frío hacia el aire exterior.
- d) Por utilización de materiales, sobre el lado frío, que son por lo menos cinco veces más porosos (al vapor), - que los montados sobre el lado caliente.

En general, la importancia del control de vapor aumenta en -

las zonas frías.

#### II.8.4 DETERIORO DE MATERIALES

Todas las zonas climatológicas tienen sus agentes (atmosféricos) destructivos específicos. Aquí se hará una breve mención de los principales problemas, los cuales, inconsecuentes al comportamiento térmico, son una parte esencial de la descripción total.

El proceso de deterioro químico depende principalmente, de la presencia de agua, lluvia, y alta humedad relativa. Esto, a temperaturas de helada, en zonas frías, causa escarcha; en zonas calientes y con altas temperaturas se producen rocíos. La diferencia de temperaturas, afecta principalmente a los materiales de una manera física. Es decir, causa movimientos dimensionales que contribuyen a la rotura. Efectos secundarios importantes son originados por reacciones químicas y otros fenómenos son acelerados logarítmicamente a un incremento de temperatura. La radiación causa deterioro sobre las superficies expuestas, debido al aumento de temperatura y a la acción fotoquímica de los rayos solares. Agentes biológicos (algas, moho, hongos) requieren de humedad para su existencia; si la humedad relativa es menor del 70%, el deterioro es muy pequeño. Existen tipos subterráneos de termitas en ciertas regiones, algunas de ellas son más destructivas que otras. Estas originan daños en productos de celulosa sin protección adecuada.

## II.8.5 TRANSMISION DE CALOR EN LOS MATERIALES

La característica más importante para el control térmico de los materiales, en su comportamiento a la transmisión de calor. La variación diaria de la carga de calor, origina una oscilación de temperaturas dentro de la estructura, pero con dos diferencias:

- 1) El ciclo en el interior será amortiguado, esto es, las variaciones de temperatura serán más pequeñas. (disminución en amplitud).
- 2) El ciclo en el interior, será retrasado con respecto al ciclo (u oscilación) exterior, (defasamiento).

El primer efecto es causado por el valor de aislamiento del material, caracterizado por el factor "U" (coeficiente global de transferencia de calor), el cual reduce el flujo de calor, y es comúnmente referido como aislamiento de resistencia.

El segundo efecto, depende del valor de almacenamiento de calor del material, caracterizado por el calor específico volumétrico. ( $\rho c$ , densidad por calor específico). A un valor más grande de almacenamiento de calor, existe un mayor retraso de la temperatura propagada a través del material. A esta demora, se le llama tiempo de retraso de la construcción, y da una oportunidad de almacenar las cargas "pico" y librarlas durante períodos de bajas temperaturas en el interior. Este efecto es generalmente llamado aislamiento de capacidad (o de capacitancia).

Ambas características dependen de la difusividad térmica del material.

En diseño, el uso apropiado de los efectos de aislamiento y retraso, son eminentemente importante para el balance de calor en el interior.

## II.9 DISEÑO DEL MURO TROMBE

Para determinar el área del muro es necesario conocer la carga de calefacción y el producto  $(UA)_v$ .

### CALCULO DE $(UA)_v$

Usando los principio de transferencia de calor, es posible calcular el coeficiente total con el método de la resistencia.

La resistencia total para el flujo de calor, a través de un ciclo plano, piso o pared, es numéricamente igual a la suma de las resistencias en serie.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_N$$

donde  $R_1, R_2, R_3$  son las resistencias individuales de los componentes de la pared,  $R_T$  es la resistencia total.

Para una pared de dos materiales diferentes homogéneos de conductividad térmica  $K$  y espesor  $L$  con coeficientes de superficie  $h_i$  y  $h_o$  tenemos:

$$R_T = \frac{1}{h_i} + \frac{L}{K_1} + \frac{L}{K_2} + \frac{1}{h_o} \quad \text{II.9.1}$$

entonces:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \text{II.9.2}$$

Para obtener un valor promedio del coeficiente total de transferencia de calor de la vivienda hacemos:

$$U = \frac{U_{\text{pared}} A_{\text{pared}} + U_{\text{ventana}} A_{\text{ventana}} + U_{\text{techo}} A_{\text{techo}}}{A_o} \quad \text{II.9.3}$$

donde  $A_0$  es el área total de la vivienda.

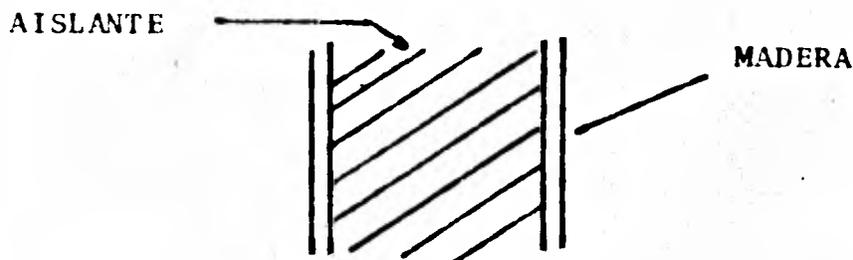


Figura II.9.1 Corte de la pared de la vivienda

De la Ref. (14) obtenemos:

$K_{\text{aislante}}$	=	0.0245	$\text{W/m}^\circ\text{K}$
$K_{\text{madera}}$	=	0.1586	$\text{W/m}^\circ\text{K}$
$*h_i$	=	8.35	$\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{K}$
$*h_o$	=	33.40	$\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{K}$

\* estos valores no se calculan, debido a que interviene en diversos factores que no se conocen.

Del apéndice C obtenemos el área de pared y el área de ventana, área de techo, y son:

$A_{\text{pared}}$	=	62.04 $\text{m}^2$	(excepto pared norte)
$A_{\text{ventana}}$	=	23.23 $\text{m}^2$	
$A_{\text{techo}}$	=	27.2 $\text{m}^2$	
$A_{\text{pared norte}}$	=	29.55 $\text{m}^2$	
$A_0$	=	153.62 $\text{m}^2$	

Nota: Se hace una suposición del área de muro trombe para determinar las pérdidas de calor de la vivienda y así po-

der determinar el área adecuada del muro.

$$A_{\text{muro}} = 11.7 \text{ m}^2$$

El espesor de aislamiento en la pared es de 0.15 m y en el techo y pared norte de 0.20 m.

Para la pared, de la ecuación II.9.1 y sustiuyendo tenemos:

$$R_T = \frac{1}{8.35} + 2\left(\frac{0.0127}{0.1588}\right) + \frac{0.15}{0.0245} + \frac{1}{33.4}$$

$$R_T = 6.4322 \text{ m}^2\text{°K/W}$$

de la ecuación II.9.2 sustituyendo:

$$U_{\text{pared}} = 0.15546 \text{ W/m}^2\text{°K}$$

Para la pared norte y el techo de la ecuación 11.91. y sustiuyendo, tenemos:

$$R_T = \frac{1}{8.35} + 2\left(\frac{0.0127}{0.1586}\right) + \frac{0.20}{0.0245} + \frac{1}{33.4}$$

$$R_T = 8.47304 \text{ m}^2\text{°K/W}$$

de la ecuación II.9.2 sustituyendo:

$$U_{\text{techo}} = 0.11802 \text{ W/m}^2\text{°K}$$

$$U_{\text{pared norte}} = 0.11802 \text{ W/m}^2\text{°K}$$

Usando doble vidrio de 6 mm de espesor y con una separación de 12 mm para las ventanas, el coeficiente de transferencia de calor de la Ref. (14) es:

$$U_{\text{ventana}} = 2.782 \text{ W/m}^2\text{°K}$$

Para muro trombe con un espesor de 0.457 m de espesor con doble cristal y aislamiento nocturno, el coeficiente de transferencia de calor de la Ref. (2) es:

$$U_{\text{muro}} = 0.68 \text{ W/m}^2\text{°K}$$

sustituyendo valores en la ecuación II.9.3 tenemos:

$$U = \frac{0.15546(62.04) + 0.11802(29.55) + 0.11802(27.2) + 0.68(11.7)}{153.62} + \frac{2.782(23.13)}{153.62}$$

$$U = 0.577 \text{ W/m}^2\text{°K}$$

entonces:

$$(UA)_v = 0.557 (153.62)$$

$$(UA)_v = 88.638 \text{ W/°K}$$

Para un periodo de una hora:

$$(UA)_v = 0.3190 \text{ MJ/°K}$$

#### DETERMINACION DEL AREA DEL MURO:

La máxima carga de calefacción ocurre en el mes de enero, (ver días-grado en el apéndice B) por lo tanto el área se debe de calcular para las condiciones medias de este mes.

La radiación absorbida "S" diaria promedio mensual, se calcula del mismo modo que el descrito en el capítulo 1, esto es válido, - porque partimos de valores de radiación promedio mensual.

$\bar{S}$  es la suma de S (horario) para un día. Este día se recomienda que sea el día medio del mes, según Ref. (2) el día medio del -

mes de enero es el 17.

Del programa Solar I (apéndice A) y con  $H = 14.22 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{ dfa}}$  (radiación total promedio mensual sobre una superficie horizontal para el mes de enero).

Se obtienen los valores horarios de  $\tau$ ,  $R_b$ ,  $I_b$ , e  $I_d$ , con estos y el Solar II, se obtienen los valores horarios de  $S$ , cuya suma es:

$$S = 15.266 \text{ MJ/m}^2$$

Para un período de una hora, se determinó anteriormente, - que:

$$(UA)_v = 0.3190 \frac{\text{MJ}}{\text{K}}$$
 , de donde para un período de un día es:

$$(UA)_v \text{ dfa} = 0.3190 \times 24 = 7.656$$

Los días grado en enero son: 360

Con estos valores la carga mensual de calefacción es:

$$L = (UA)_v \text{ dfa (D.G.)} = 7.656 (360)$$

$$L = 2756.16 \text{ MJ}$$

Esta carga es la que debe suministrar el muro hacia el espacio calentado .

Con el solar V (en el cual se sigue el método de Monsen), se obtiene  $T_{wo}$  y  $Q_i$  y son:

$$T_{wo} = 47.15^\circ\text{C}$$

$$Q_i = 7.07 \text{ MJ/m}^2 \text{ (dfa)}$$

El calor mensual suministrado por el muro es:

$$A_m Q_i n = Q_m \text{ (mensual)}$$

Donde:  $A_m$  es el área del muro y  $n$  es el número de días al mes.

$Q_m$  debe ser cuando menos igual a  $L$  por lo tanto:

$$A_m Q_i n = 2756.16$$

$$\therefore A_m = \frac{2756.16}{(7.07)(31)}$$

$$A_m = 12.57m^2$$

Redondeando  $A_m = 13m^2$

Dimensiones del muro.

Altura 3.90 m

Por lo tanto:

$$\text{Ancho} = 13/3.90$$

$$\text{Ancho} = 3.33 \text{ m}$$

## CONVERSION DIRECTA DE LUZ SOLAR EN ENERGIA ELECTRICA

---

### III.1.1. EL EFECTO FOTOVOLTAICO.

El término "fotovoltaico" se adoptó para diferenciar entre el efecto fotovoltaico mismo y el efecto fotoconductor, ya que ambos son efectos que ocurren en todo material semiconductor.

En el efecto fotoconductor, las cargas eléctricas libres son generadas por los fotones de la luz incidente, lo que ocurre por la fotoionización de los átomos ó iones que constituyen el material semiconductor; las nuevas cargas móviles incrementan la conductividad eléctrica de la sustancia, pero este efecto no genera potencia eléctrica.

El efecto fotovoltaico por otra parte, puede ocurrir solamente cuando existe una barrera de potencial en un semiconductor no iluminado, encontrándose dicha barrera por ejemplo en la interfase entre dos áreas con diferente "dopado", esto es, donde se han introducido diferentes tipos de impurezas en concentraciones menores al 1%. Si este material se ilumina, las cargas eléctricas generadas por la luz a través del efecto fotoconductor serán separadas por la barrera de potencial en cargas positivas por un lado y en negativas por el otro, constituyéndose así el efecto fotovoltaico propiamente dicho, que es un proceso de generación de potencia eléctrica.

La física del efecto fotovoltaico está estrechamente relacionada con la teoría de semiconductores, constituida a su vez por la formación de cristales semiconductores, su "dopado" y las "unio-

nes" entre ellos. Es necesario por lo tanto, tomar en cuenta algunos elementos de dicha teoría para lograr una mejor comprensión de la física del efecto fotovoltaico.

### III.1.2. BANDAS DE ENERGIA.

Las bandas de energía son una herramienta básica para describir los fenómenos en la materia sólida, y su teoría está basada en los conceptos de los niveles de energía ó energéticos y los estados cuánticos de los electrones en los átomos, partiendo del modelo atómico de Bohr.

Como es bien sabido, dicho modelo establece que alrededor de un núcleo de carga positiva, formado por protones y neutrones, giran los electrones de carga negativa. Por su parte, la mecánica cuántica establece que las órbitas en las que giran dichos electrones están dispuestas en capas, designadas con las letras K, L, M, N, ... y que el número máximo de electrones en las diferentes capas es 2, 8, 18, 32.

Esto proviene de la solución de la ecuación de onda de Schrödinger, desarrollada para describir el comportamiento del electrón en un campo de potencial  $U(x,y,z)$ . Dicha solución para el átomo de hidrógeno o cualquier átomo multielectrónico requiere de tres números cuánticos, designados por " $n$ ", " $l$ " y " $m_l$ ", y que están restringidos a los valores:

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

$$l = 0, 1, 2, 3, \dots, (n-1)$$

$$m_l = 0, 1, 2, \dots, l$$

Para especificar por completo una solución de la ecuación de

onda, es necesario definir un cuarto número cuántico, el "espín" ( $m_s$ ), que puede tomar solamente los valores de  $+\frac{1}{2}$  ó  $-\frac{1}{2}$  de acuerdo a la energía respectiva.

Todos los electrones en un átomo que tienen los mismos valores de "n" pertenecen a la misma capa electrónica; a su vez, una capa se divide en subcapas que corresponden a valores diferentes de l y se identifican con las letras "s", "p", "d", "f",... para  $l = 0, 1, 2, 3, \dots$ , respectivamente. Tomando en cuenta el principio de exclusión de Pauli, que establece que dos electrones no pueden tener el mismo conjunto de cuatro números n, l,  $m_l$  y  $m_s$  (es decir, dos electrones no pueden ocupar el mismo estado cuántico) se determina la distribución de los electrones entre las capas y las subcapas, lo que explica la distribución de los elementos en la tabla periódica.

Si el átomo tiene en su última capa, llamada de "valencia", el número máximo de electrones que le corresponde, es muy estable, muy poco activo químicamente, y recibe el nombre de "gas noble".

Cuando los átomos se combinan químicamente ó cuando forman estructuras cristalinas, tratan de quedar con la última capa llena, para lo cual ceden o comparten electrones. En general, los elementos localizados justo después de un gas noble en la tabla periódica (que tienen muy pocos electrones en la capa de valencia) tienden a "ceder" electrones; los que están poco antes (por tener la capa de valencia casi llena de electrones) tienden a "aceptar" electrones, mientras que los elementos que están más ó menos al centro, entre un gas noble y otro en la tabla periódica, ceden -

en algunos casos y aceptan en otros.

Los electrones situados en la capa de valencia están débilmente unidos al átomo, requiriéndose de una cantidad pequeña de energía para separarlos del mismo. Cuando dichos electrones se separan del átomo, se convierten en "electrones libres", y en ausencia de un campo eléctrico están animados de un movimiento aleatorio; bajo la presencia de un campo eléctrico, aunque el movimiento de estos electrones continúa siendo aleatorio, ahora adquiere una componente resultante de velocidad en la dirección del campo y proporcional a la intensidad del mismo. Los electrones en la capa de valencia - determinan las propiedades químicas y eléctricas de los elementos.

Los electrones, en sus diferentes órbitas alrededor del núcleo tienen diferentes cantidades ó niveles discretos de energía (no continuos) cuyo valor depende de la distancia de los electrones al núcleo: cuanto más cercanos estén, mayor será la energía requerida - para separarlos del átomo (ver figura III.1.2,1).

Energía (eV)		n	E+13.6
0	Nivel de ionización	$\infty$	13.60
-0.56		5	13.04
-0.87		4	12.73
-1.53		3	12.07
-3.41		2	10.19
-13.60	Estado normal	1	0

Figura III.2,1 Niveles energéticos (Hidrógeno).

Ningún electrón en un átomo puede tener una cantidad de energía que se encuentre entre dos niveles energéticos. Para que un electrón cambie de un nivel energético a otro, debe absorber ó emitir energía. De los espectros de los niveles energéticos, se observa que la distancia (energía) entre dos niveles contiguos varía, y que decrece a medida que aumenta la energía: es decir, los niveles de energía se van acercando cada vez más a medida que la distancia de los electrones al núcleo aumenta.

En un sólido, los electrones son afectados por los campos eléctricos de los átomos vecinos así como por el del átomo al que pertenecen, por lo que los niveles de energía correspondientes a los átomos individuales se "enciman", dando lugar a las "bandas de energía" permitidas para los electrones. Estas bandas comprenden varios niveles de energía tan cercanos entre sí que prácticamente forman una banda continua.

La amplitud de estas bandas, así como la distancia entre ellas, varían dependiendo del material. Por ejemplo, un electrón que tiene un nivel de energía  $E_v$  cuando está en la "banda de valencia" (y por lo tanto todavía está unido al núcleo) tiene que incrementar su energía hasta  $E_c$  para pasar al siguiente nivel de energía, que es el de la "banda de conducción", donde el electrón ya es libre (es decir, ya está separado del átomo).

La diferencia de energía entre la banda de valencia y la de conducción varía de un material a otro. En los "conductores" ambas bandas se traslapan, y los electrones de valencia pasan libremente a la banda de conducción, mientras que en los "aisladores" dichas bandas están muy separadas y hay que aplicar mucha energía (por

ejemplo fuertes campos eléctricos) para lograr que los electrones de la banda de valencia pase a la de conducción. En los "semiconductores" por su parte, se presenta una situación intermedia. (Figura III.1.2,2).

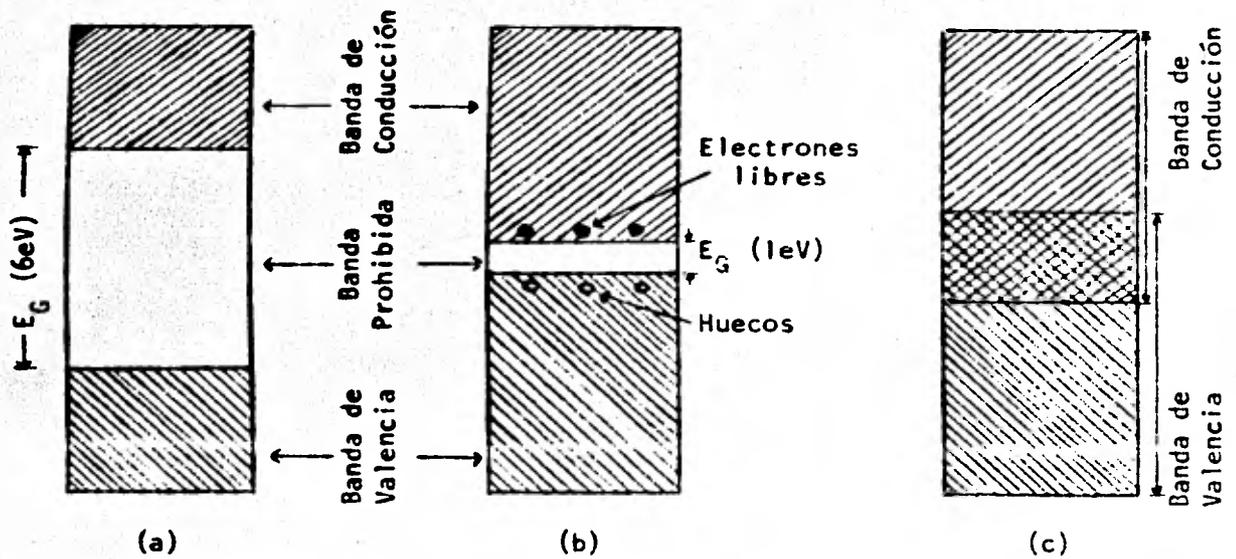


Figura III.1.2,2. Estructura de las bandas de energía de:

- un aislador
- un semiconductor
- un conductor

Las bandas están separadas entre sí por las llamadas "brechas de energía", que representan precisamente la energía requerida para mover un electrón de una banda a otra, siendo esta energía expresada generalmente en "electrón volts" ( $1\text{e.v.} = 1.6 \times 10^{-19}$  joules). La mecánica cuántica demuestra que sólo pueden existir electrones con niveles de energía que caigan dentro de las bandas de energía ó bandas "permitidas" y no con niveles en las brechas de energía ó

bandas "prohibidas".

### III.1.3. CRISTALES SEMICONDUCTORES.

Los rayos X y otros estudios han revelado que la mayoría de los metales y los semiconductores poseen estructura cristalina. Un cristal consiste de un arreglo espacial de átomos ó moléculas (iones estrictamente hablando) construido por una repetición regular tridimensional de alguna estructura unitaria fundamental.

Para un buen entendimiento de la formación de los cristales, se comenzará por recordar la distribución de los elementos en la tabla periódica. En ésta, los elementos cuyos átomos tienen un electrón en la cubierta exterior se enlistan en la primera columna, aquéllos con dos elementos en la segunda columna, y así hasta la octava columna; el silicio, que tiene cuatro electrones en su cubierta exterior, se enlista entonces en la cuarta columna.

Como regla general, los átomos tienden a rellenar sus cubiertas más exteriores hasta que alcanzan el número máximo de ocho -- electrones, combinándose con otros elementos y/ó formando cristales. El hidrógeno y el helio son excepciones: los átomos de estos dos gases no pueden aceptar más de dos electrones en sus cubiertas exteriores. Por su parte, los elementos de la octava columna son inertes y no forman cristales porque cada átomo ya está saturado con electrones.

En el caso de los átomos libres de silicio, que necesitan cuatro electrones extras para completar ocho, los electrones adicionales pueden obtenerse por la formación de un cristal. En un cristal de silicio las capas más externas están parcialmente cubiertas y - "comparten" sus electrones, lo que se llama ligadura de tipo "homo

polar". Esencialmente se implica a los electrones de las cubiertas más exteriores, es decir, los electrones de valencia.

El cristal entero permanece eléctricamente neutro porque - el número total de cargas de sus átomos constituyentes no ha cambiado: solamente lo ha hecho su arreglo. Es importante notar que todos los electrones en las cubiertas exteriores permanecen ligados; entonces, los cristales puros de este tipo son aisladores eléctricos.

Si un electrón obtiene la energía suficiente para abandonar su cubierta, se convierte en un "móvil" dentro del cristal; esto quiere decir que el cristal se convierte en conductor eléctrico. La cantidad de energía mínima necesaria para liberar un electrón es una constante del material, y como ya se dijo anteriormente equivale a la banda prohibida que separa a la banda de valencia de la de conducción.

Cuando un electrón abandona una cubierta, deja tras de sí un sitio desocupado llamado "hueco", que es equivalente a una carga positiva, ya que representa una carga negativa perdida. A diferencia de los electrones en las cubiertas completas, los huecos son móviles porque un electrón de otro átomo puede moverse hacia el sitio desocupado, desde las cubiertas vecinas en un cristal parcialmente completo; cuando un electrón se mueve, digamos, de un sitio B hacia un hueco en el sitio A, el hueco en el sitio A desaparece y se forma uno nuevo en el sitio B, y entonces se dice que el hueco se mueve de A hacia B.

En conclusión, en un cristal pueden existir dos tipos de cargas, una junto a la otra: primero, electrones libres con carga negativa que se mueven en la banda de conducción, y segundo, los hue

cos de carga positiva que se desplazan por las cubiertas incompletas formando la banda de valencia. En un cristal ideal, cada electrón liberado deja tras de sí un hueco móvil, de manera que hay un número igual de cargas portadoras: ésto es lo que se conoce como "régimen intrínseco".

### III. 1.4. DROGADO DE LOS CRISTALES.

El proceso de adición de impurezas a los cristales se conoce con el nombre de "drogado", con el resultado de que se consigue un exceso de cargas móviles positivas ó negativas, siendo entonces el drogado "tipo p" ó "tipo n", respectivamente.

Cuando a una temperatura dada, la concentración de huecos móviles excede a la concentración de electrones móviles, el cristal tiene un drogado tipo p, y las sustancias que lo efectuaron se llaman "aceptores". En el silicio, todos los elementos de la tercera columna de la tabla periódica pueden utilizarse como aceptores, nominalmente el boro (B), el aluminio (Al), el galio (Ga), el indio (In) y el talio (Tl).

Al agregar una impureza de este tipo a un semiconductor intrínseco, solamente se podrán llenar tres de las cuatro posibles -- ligaduras, por lo que la cuarta permanecerá vacante y en su lugar se tendrá un hueco. Estas impurezas se denominan "aceptoras" ó -- "tipo p" porque, al agregarse al cristal, hacen posible tener cargas positivas al crear huecos que pueden aceptar electrones.

La adición de estas impurezas produce un nivel discreto de -- energía permisible situado exactamente por encima de la banda de -- valencia, como se muestra en la figura III.1.4.1. Ya que se requiere una cantidad muy pequeña de energía para que un electrón deje --

la banda de valencia y ocupe el nivel de energía del aceptor, los huecos generados por estos electrones en la banda de valencia constituyen el número mayor de portadores de carga (ó "portadores mayoritarios") en el material semiconductor.

Los huecos contribuyen a la conductividad eléctrica " $\sigma_p$ " del cristal tipo p de acuerdo con la ecuación:

$$\sigma_p = e\mu_p P$$

III.1.4,1

donde P es la concentración de huecos,  $\mu_p$  su movilidad y e la carga eléctrica unitaria.

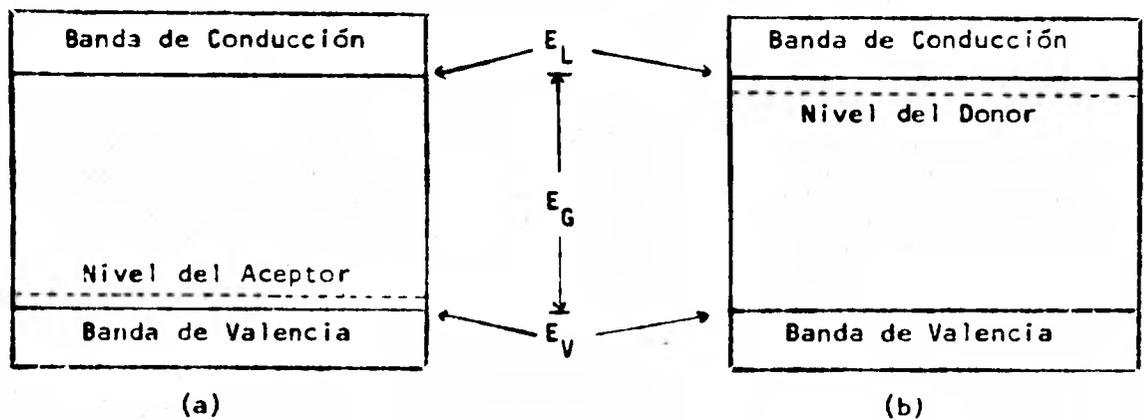


Figura III.1.4,1 Diagrama de bandas de  
 a) Semiconductor tipo p  
 b) Semiconductor tipo n

Similarmente, la conductividad eléctrica de la capa n de un cristal de silicio se debe a un drogado con "donores", es decir, elementos de la quinta columna que tienen cinco electrones en la cubierta exterior, un electrón más que los átomos del cristal anti-trión. Estos elementos son: el antimonio (Sb), el fósforo (P), el arsénico (As) y el bismuto (Bi).

Cuando se agregan al cristal estos átomos de impureza a algu

nos de la estructura cristalina, ocupan cuatro de los cinco electrones de valencia las ligaduras correspondientes mientras que el quinto permanecerá desligado, por lo que estará disponible como portador de corriente.

De manera análoga al caso anterior, cuando estas impurezas - "donoras" o "tipo n" se agregan al semiconductor, se introducen niveles de energía permisible que ahora se sitúan a una distancia muy pequeña por debajo de la banda de conducción, como se muestra en la figura III.1.4.1.

Estos nuevos niveles permisibles forman esencialmente un nivel discreto, ya que los átomos de impureza adicionados están muy apartados entre sí dentro de la estructura cristalina, por lo que su interacción es despreciable.

Dada la distancia tan pequeña a la que este nuevo nivel se sitúa por debajo de la banda de conducción, se tiene que, a la temperatura ambiente, prácticamente todos los electrones "sobrantes" del material donador son llevados hacia la banda de conducción, lo que ocasiona que la conductividad eléctrica se incremente de acuerdo con:

$$\sigma_n = e\mu_n N \quad \text{III.1.4,2}$$

donde  $\sigma_n$  es la movilidad de los electrones y  $N$  su concentración.

El material resultante de la adición de impurezas se llama "semiconductor extrínseco", aumentando la conductividad en forma radical por medio de este proceso. Por ejemplo, si a un semiconductor típico tal como el silicio ó el germanio, se le añade menos del 0.01% de impureza, la resistividad del material cambia en seis ó siete veces su magnitud.

En resumen: al agregar impurezas donoras se aumenta el número

ro de electrones libres en la banda de conducción, formándose un semiconductor tipo n, en el cual los electrones libres reciben el nombre de "cargas mayoritarias"; por otra parte, al agregar impurezas aceptoras se aumenta el número de huecos en la banda de conducción, formándose un semiconductor tipo p, siendo en este caso los huecos las cargas mayoritarias y los electrones las "cargas minoritarias". Sin embargo, al agregar una impureza a un semiconductor, éste sigue siendo neutro, ya que no se ha alterado su carga eléctrica neta.

### III.1.5. LA UNION p-n.

Si se ponen en contacto mecánico un material de tipo p y otro de tipo n de tal manera que se forme un cristal único y los materiales constituyan, por tanto, una juntura en la cual se conserva la continuidad cristalina, se tiene la llamada "unión o juntura p-n".

Debido a razones naturales, así como a las impurezas, un material de tipo p y otro de tipo n están a distintos niveles de carga por lo que al ponerse en contacto se tenderá a un estado de equilibrio mutuo, para lo cual se llevará a cabo un intercambio de energía, mediante un proceso fundamental llamado "difusión".

Los huecos del material tipo p y los electrones del material tipo n se mueven en forma aleatoria, y tienden a difundirse a través del plano de contacto; el proceso de difusión hace que las cargas se muevan de una región de alta concentración a otra de baja concentración, tendiendo a la postre a una distribución uniforme. Es decir, debido a este proceso, los huecos migran desde el material tipo p hacia el tipo n mientras que los electrones lo hacen en la dirección contraria.

La corriente de difusión  $i_n$  del lado n al p puede expresarse como:

$$i_n = eD_n dn/dx \quad \text{III.1.5.1}$$

siendo  $D_n$  la constante de difusión para los electrones y  $x$  la distancia en el cristal. A su vez  $D_n$  se relaciona con  $\mu_n$  por medio de la ecuación:

$$D_n = \mu_n kT/e \quad \text{III.1.5.2}$$

donde  $T$  es la temperatura del cristal y  $k$  la constante de Boltzman.

Análogamente, la corriente de difusión de huecos  $i_p$  que fluye en la dirección opuesta, puede expresarse mediante:

$$i_p = eD_p dp/dx \quad \text{III.1.5.3}$$

La figura III.1.5.1 muestra una unión p-n. Antes de iniciarse el proceso de difusión, ambas capas p y n son eléctricamente neutras; entonces, cuando se forma la unión, las cargas negativas se mueven hacia el material tipo p y dejan tras de ellas una deficiencia de carga negativa, mientras que en el lado opuesto los huecos se esparcen hacia el material tipo n, y el resultado de las dos corrientes es que el lado n de la interfase se vuelve cargado positivamente -- mientras que el lado p adquiere carga negativa.

Durante la difusión, las áreas excitadas ó ionizadas a cualquier lado de la juntura llegan a quedar relativamente vacías de -- portadores de carga debido a la "aniquilación" por recombinación de electrones y huecos, formando la denominada "zona de transición" ó "área vacía de portadores de carga". Asimismo, como consecuencia de los excesos de cargas debidos a la difusión, se forma un campo eléctrico "E" con dirección del semiconductor tipo n al tipo p, cuyo valor irá incrementándose a medida que avance el proceso de difusión;

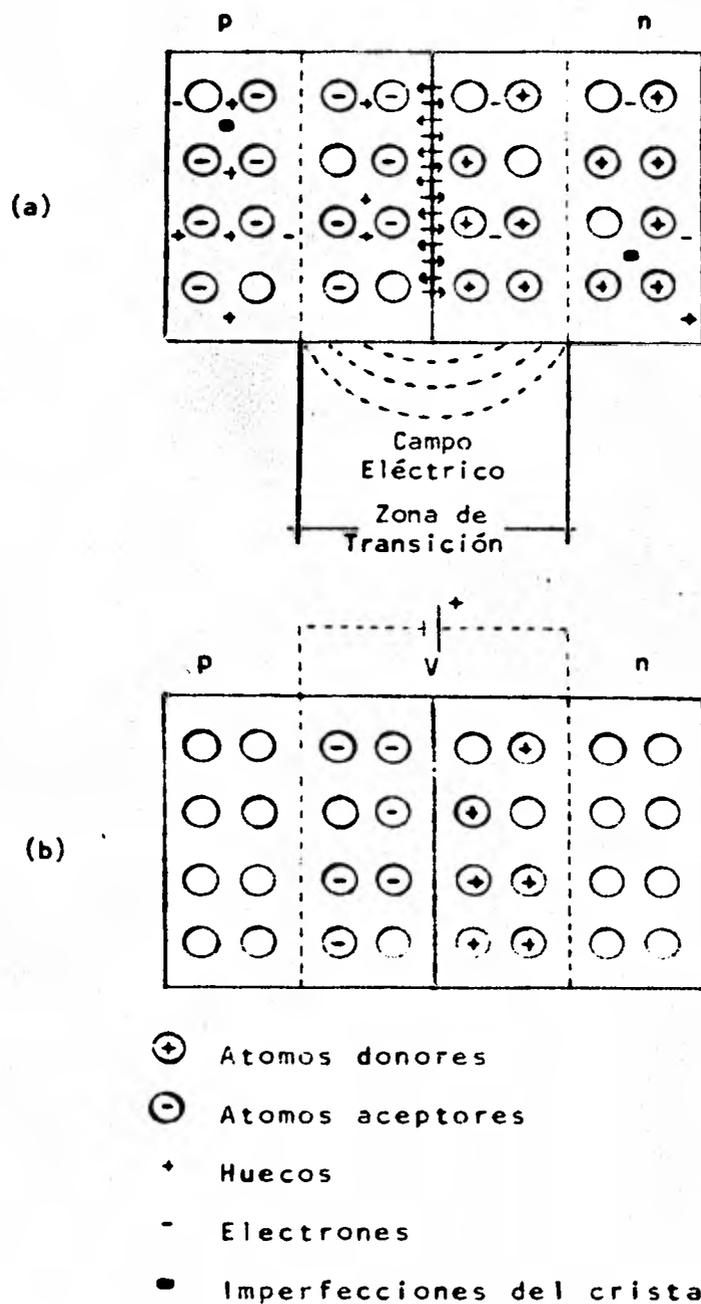


Figura III.1.5,1 Una juntura p-n: (a) las regiones ionizadas a cada lado de la juntura forman la zona de transición; (b) como consecuencia de la zona de transición se establece un potencial de contacto a través de la juntura (representado por  $V$ ).

sin embargo, como este campo se opone a la difusión, ésta continuará hasta que se haya establecido un campo suficientemente fuerte para impedirla.

En consecuencia, en la zona de transición se forma una diferencia de potencial, llamada "voltaje de barrera" ó "potencial de contacto", que inhibe todavía más la migración de electrones y huecos.

Es decir, en este análisis se muestra que en una unión p-n no iluminada queda establecida automáticamente una polarización eléctrica, mostrándose el efecto de difusión de los portadores eléctricos en la figura III.1.5.2. El campo eléctrico establecido a través de la interfase p-n entre las cargas negativas y las positivas multiplica a las corrientes de campo de electrones y de huecos respectivamente:

$$i_n = e\mu_n nE \quad \text{III.1.5.4}$$

$$i_p = e\mu_p pE \quad \text{III.1.5.5}$$

En el equilibrio, la corriente de campo de electrones compensa exactamente a la corriente de difusión que fluye en la dirección opuesta, mientras que, independientemente, las corrientes de campo y de difusión de huecos se compensan una a la otra; es decir, los electrones y los huecos que tratan de esparcirse pueden interpenetrar solamente una pequeña distancia y luego son contenidos por el campo eléctrico resultante. Por lo tanto, en el equilibrio no fluyen partículas a través de la interfase y las corrientes totales de electrones y huecos son nulas.

Las concentraciones de electrones y huecos que se tienen ahora en el equilibrio de estado estable, pueden expresarse como una función de la distancia dentro de la capa interfase por una expre-

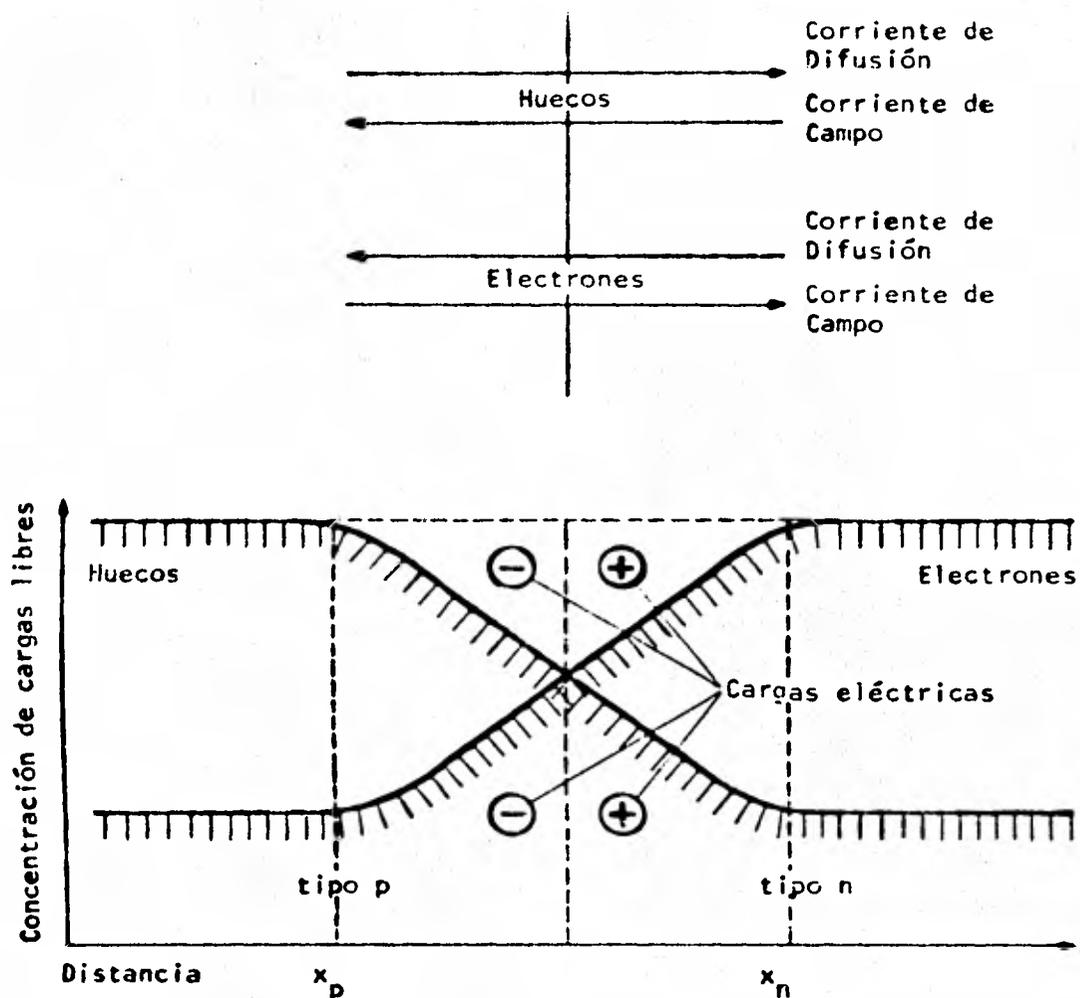


Figura III.1.5,2 Concentración de electrones y huecos en una interfase p-n en equilibrio térmico (Distribución de Boltzmann); asimismo, se muestra la dirección de las corrientes de la interfase.

sión denominada distribución de Boltzmann:

$$n(x) = n_n \exp\{+eV(x)/kT\} \quad \text{III.1.5,6}$$

$$p(x) = p_p \exp\{-eV(x)/kT\} \quad \text{III.1.5,7}$$

en donde  $n_n$  es la concentración de electrones en el equilibrio en la capa n,  $p_p$  es la concentración de huecos en el equilibrio en la

capa p y  $V(x)$  es el potencial eléctrico incorporado a la unión, - también llamado "voltaje de difusión  $V_D$ ", que generalmente es del orden de un volt.

Subsecuente al establecimiento de  $V_D$ , los electrones en ambos lados de la unión quedarán separados por una diferencia de energía  $eV_D$ , lo cual también es cierto para los huecos y, como resultado, las bandas de energía están curvadas en la región de transición -- p-n.

En un cristal homogéneamente drogado, todas las bandas son - independientes de la distancia  $x$  y entonces las bandas de energía  $E=E(x)$  son horizontales, pero esto no se cumple en una unión p-n - que multiplica a un voltaje de difusión en la interfase, ya que -- los electrones que han cruzado la barrera desde la capa n a la p - han ganado la energía  $eV_D$ ; entonces, la banda de conducción es más alta aumentada en dicha cantidad de energía,  $eV_D$ , en el lado p que en lado n. Análogamente, los huecos ganan la misma cantidad de energía cuando se mueven en la dirección opuesta, como se representa - en la figura III.1.5.3.

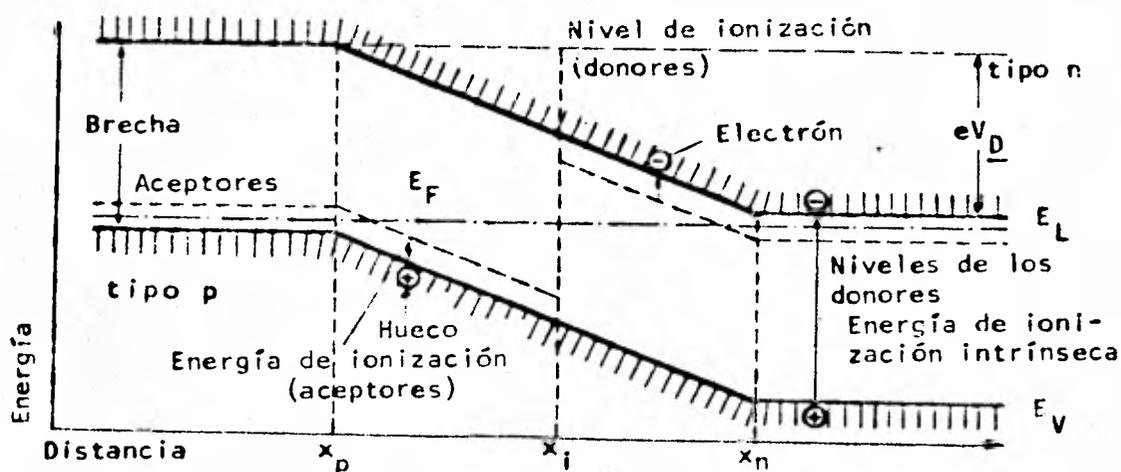


Figura III.5.1,3 Diagrama de bandas del cristal anterior.

Otra forma de describir el voltaje de difusión  $V_D$  y la energía relacionada  $eV_D$  es mediante el "nivel de Fermi  $E_F$ ", el cual se define como aquél cuya probabilidad de ocupación, a una temperatura diferente del cero absoluto, es de un medio.

A  $0^\circ$  K, todos los estados de energía bajo el nivel de Fermi están completos, y arriba de él, vacíos. Cuando la temperatura es mayor que cero, la agitación térmica causa que parte de los electrones pueda saltar a estados de energía mayor al nivel de Fermi, por lo que entonces algunos de los estados de energía menores que el Fermi resultarán desocupados.

Es decir, al aumentar la temperatura, se incrementa la concentración de portadores arriba del nivel de Fermi; lo mismo es cierto para los huecos, que llegan a ser más numerosos bajo el nivel de Fermi cuando la temperatura aumenta.

Así, para el caso de un material tipo n (en el que la concentración de electrones en la banda de conducción es más alta que en un material sin donores), el nivel de Fermi es más cercano a  $E_C$  que a  $E_V$ . Por lo que respecta al material tipo p (caracterizado por su baja concentración de electrones en la banda de conducción), el nivel de Fermi se sitúa más cercanamente a  $E_V$ , como se ve en la figura III.1.5.3

Debido a que, arriba de ciertas temperaturas, y como resultado de las transiciones intrínsecas, se llegan a ionizar más electrones de la banda de valencia a la de conducción que donores o aceptores en el cristal, el nivel de Fermi se desplaza hacia la mitad de la brecha tanto en la capa n como en la p.

Si la concentración de electrones fuese la misma en cualquier parte de la unión, ésta desaparecería, por lo que, al haber ilumi-

nación, no se tendría fotovoltaje. Sin embargo, en las celdas de silicio el fotovoltaje desaparece por completo solamente para temperaturas superiores a  $400^{\circ}\text{C}$ .

De la definición del nivel de Fermi, éste siempre cruza horizontalmente la unión p-n para condiciones de equilibrio térmico. Es obvio que, para estas condiciones, la tasa de ocupación con electrones de cualquier energía dada debe ser la misma a través del material, por lo que entonces el equilibrio térmico significa que el nivel de Fermi es homogéneo; sin embargo, un voltaje aplicado a la unión ó una iluminación incidente en ella alterarán dicho equilibrio.

### III.2. BANDAS DE ENERGIA EN CELDAS SOLARES.

Una celda solar común de silicio está hecha de material tipo p, el cual consiste de plaquetas monocristalinas drogadas con boro a una concentración de  $10^{-16}$   $\text{cms}^{-3}$  aproximadamente, y que tienen una resistividad de alrededor de  $1 \Omega\text{-cm}$ . La capa n se obtiene por la difusión de fósforo hacia la superficie, de tal forma que una concentración de aceptores de unos  $10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$  se extienda en una profundidad de una fracción de micra desde la superficie.

La figura III.2,1 muestra que el nivel de Fermi queda entonces a una distancia de alrededor de 0.2 eV de la banda de valencia en la capa p y es casi coincidente con la banda de conducción  $E_L$  en la capa n. Siendo la brecha de energía para el silicio de 1.12 eV a la temperatura ambiente, se puede determinar el valor del voltaje de difusión, que en este caso adquiere un valor de 0.9 volts; éste es un límite superior para el fotovoltaje.

Debe notarse que el voltaje interno  $V_D$  de la unión no puede medirse con un voltmetro de C.D. aplicado a la juntura; aunque dicho voltmetro sea de muy alta resistencia marcaría "cero", a pesar del hecho de que  $V_D$  existe. Esto es debido a que, para cualquier medida es necesario un mínimo de energía: en una unión en equilibrio térmico sin embargo, no se tiene energía porque solamente hay voltaje y no corriente.

Se analizarán ahora las corrientes de "sombra" que fluyen en una unión p-n no iluminada, al aplicarle un voltaje de C.D., tal como se muestra en la figura III.2,2.

Bajo polarización directa, se aplica un voltaje negativo a la capa n, por lo que  $V_D$  es progresivamente compensado reduciéndose --

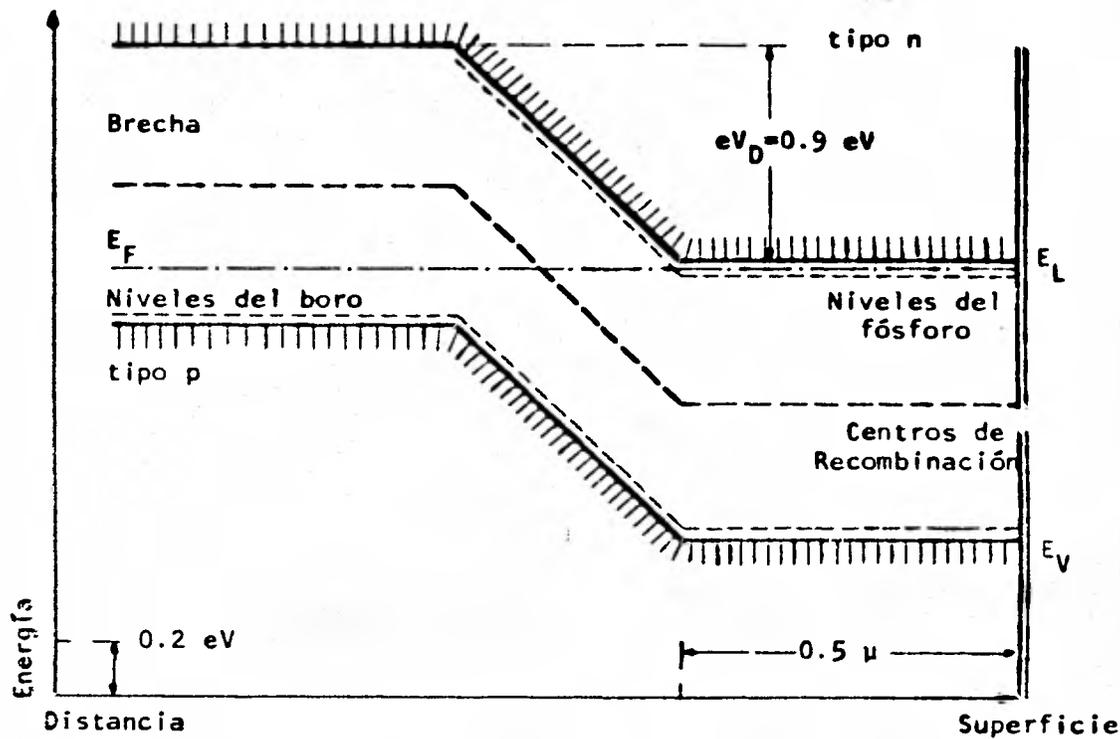


Figura III.2,1 Diagrama de bandas de una celda solar práctica de silicio. Condición de sombra.

entonces la barrera  $eV_D$ ; posteriormente se reducen las corrientes de campo que, en equilibrio, compensan a las corrientes de difusión debidas a los gradientes de electrones y huecos en la unión. Como resultado, se tendrá una corriente neta de difusión de huecos y de electrones respectivamente y, cuando el voltaje aplicado sea igual a  $V_D$ , la capa barrera desaparecerá por completo y la corriente se verá incrementada bruscamente.

La corriente total está formada por una corriente de electrones y otra de huecos, según se ilustra en las figuras anteriores: en la

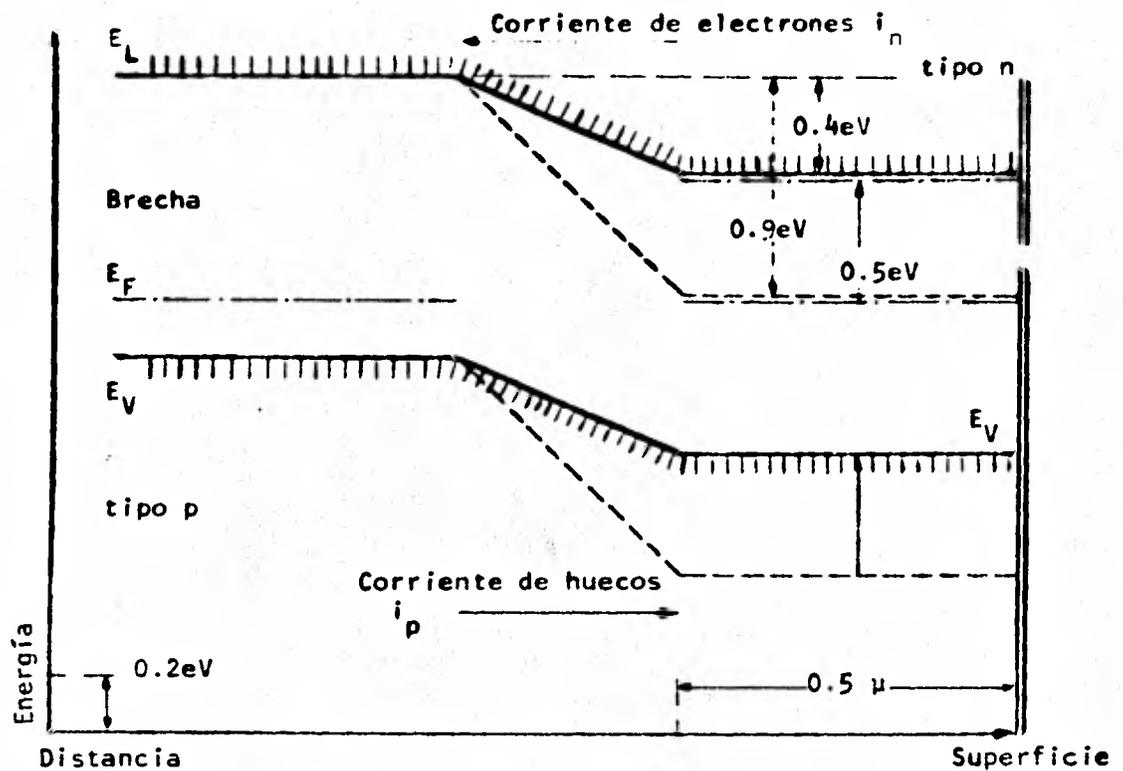


Figura III.2,2 Diagrama de bandas de una celda práctica de silicio con un voltaje de 0.5 volts aplicado a la capa n (características de directa).

interfase  $x_j$ , la corriente de electrones es igual a la corriente de huecos, si el drogado es simétrico; en el punto  $x_n$ , la concentración de huecos en equilibrio se describe por medio de la ecuación de Boltzman, como ya se vió anteriormente:

$$p(x_n) = p_n = p_p \{ \exp(-eV_D/kT) \} \quad (\text{III.2,1})$$

y cuando el voltaje aplicado  $V_F$  lo sea de forma que compense parcialmente a  $V_D$ , se tendrá que:

$$p(x_n)_F = p_p \{ \exp(-(eV_D - eV_F)/kT) \}$$

$$= p_n \exp(eV_F/kT)$$

III.2,2

Los huecos en exceso,  $p(x_n)_F - p(x_n)$ , se mueven más allá hacia la capa n por difusión; ellos no corresponden a la concentración en equilibrio térmico y por tanto deben desaparecer por recombinación.

Esto es, los portadores en exceso a la concentración en equilibrio tienden a desaparecer después de un determinado tiempo llamado "tiempo de vida"; un electrón desaparece por ejemplo de la banda de conducción llenando un hueco en la banda de valencia, que luego desaparece en su turno, proceso conocido como "recombinación". En semiconductores como el silicio, muchas de las recombinaciones ocurren a través de "centros de recombinación", que son impurezas ó defectos en el arreglo del cristal.

El tiempo de vida de los electrones en la capa n depende de la concentración ó niveles de recombinación en el cristal, situándose estos niveles cerca de la mitad de la brecha de energía y formándose ya sea por defectos del cristal ó por iones metálicos en el silicio, especialmente oro ó plata; así, si su concentración es baja, el tiempo de vida de los portadores será alto.

Los huecos en exceso penetrarán en la capa n a una determinada distancia antes de desaparecer por recombinación con los electrones, pero esta distancia puede incrementarse con la constante de difusión de los huecos ( $D_p$ ) y su tiempo de vida ( $\tau_p$ ). A la distancia promedio a la cual la concentración de huecos ha declinado en un factor "e" (= 2.7) debido a la recombinación, se le llama "longitud de difusión  $L_p$ ".

La concentración de los huecos en exceso,  $p_n \exp(eV/kT)$ , donde

V es el voltaje aplicado, que es inyectada en la capa n en  $x_n$  de la unión, declina exponencialmente. Esto es debido a la tasa de recombinación constante a la que declina la concentración de portadores; a la distancia  $L_p$  desde  $x_n$ , la concentración declina en un factor de 2.7 ("e"), y se convierte en  $p_n/e\{\exp(eV/kT)\}$ ; en la trayectoria de  $x_n + L_n$  a  $x_n + 2L_n$  decrece de nuevo en un factor "e" y se vuelve ahora  $p_n/e^2\{\exp(eV/kT)\}$ , por lo que la decaída como una función de la distancia desde  $x_n$  puede expresarse como:

$$p(x)_F = p_n\{\exp(eV/kT)\} \exp\{-(x-x_p)/L_p\} \quad \text{III.2,3}$$

Similarmente, los electrones son inyectados en la capa p en  $x_p$  de acuerdo con la ecuación:

$$n(x)_F = n_p\{\exp(eV/kT)\} \exp\{-(x_n-x)/L_p\} \quad \text{III.2,4}$$

y la concentración neta se ilustra en la parte superior de la figura III.2,3.

Dentro de la capa p la decaída de la concentración de electrones se describe con una línea recta porque la escala de la concentración es logarítmica; esta decaída implica un gradiente de concentración, y debido a él fluye una corriente de difusión hacia concentraciones más bajas. Dicha concentración decrece al incrementarse la distancia desde la unión porque el gradiente  $\Delta n/\Delta x$  también decrece exponencialmente.

Al decrecer la corriente de electrones, la corriente de huecos en la capa p se incrementa porque la suma de ambas debe ser constante a través del cristal; esto significa que al incrementar-se la distancia desde la unión la concentración de huecos en la capa p también debe hacerlo. Si, en la unión, la mitad de la corrien

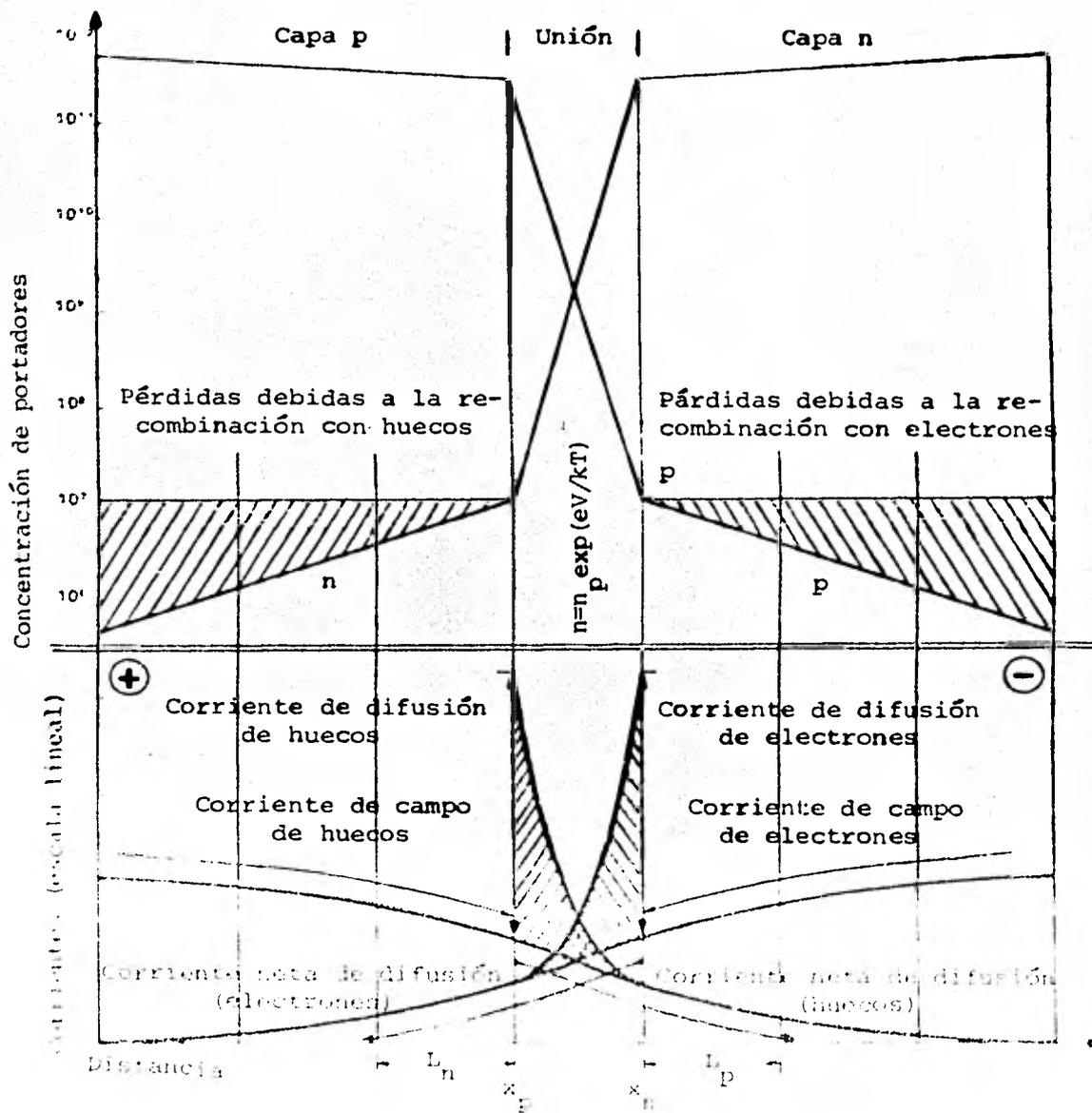


Figura III.2.3 Esquema de un diodo simétrico en la sombra con un voltaje de polarización directa  $V$ ; asimismo se muestra la concentración de portadores y corrientes.

**te total es de huecos y si, dentro de la capa p lejos de la unión, la corriente total es de huecos, entonces la concentración de los mismos es ahí el doble de lo que es cerca de la unión.**

Dentro de la unión tanto la corriente de campo como la de difusión son mucho más altas que en las capas n y p, ya que los gradientes de concentración son muy altos y el campo eléctrico también, teniendo la unión asimismo la resistividad más alta de la que el cristal entero tiene por su relativa deficiencia de portadores.

Para resumir, la corriente que fluye a través del cristal, la cual se muestra en la figura III.2,3, puede ser descrita como sigue:

1) Si se asume que el cristal está drogado simétricamente en ambos lados de la unión, la corriente de electrones en cada lado de la misma es simétrica a la corriente de huecos en el lado opuesto de dicha unión.

En  $x_p$ , fluye una corriente de electrones de difusión hacia la capa p que se incrementa exponencialmente al incrementarse el voltaje aplicado. Esta corriente de difusión es el proceso limitante para el flujo de corriente a través del cristal.

3) Dentro de la capa n, la corriente de electrones es una corriente de campo que decrece hacia la unión.

4) Dentro de la unión, las corrientes de difusión y de campo son mucho mayores que fuera de ella. El voltaje efectivo en la unión es  $V_D - V$  (aplicado), por lo que la corriente de electrones de campo en la unión fluye en dirección opuesta a la de la capa n, donde el voltaje aplicado es  $\epsilon V$  (aplicado), siendo  $\epsilon$  un número mu

cho menor que 1.

La corriente neta de electrones en la unión es una corriente de difusión que es prácticamente igual que en la capa p cerca de la unión. La razón es que la muy alta corriente de difusión se compensa parcialmente con la corriente de campo que fluye en la dirección opuesta.

En base a la descripción esquemática de las corrientes en un diodo, la ecuación para la característica corriente-voltaje (I-V) puede deducirse de la manera siguiente: partiendo de la expresión para la corriente de difusión

$$i_p = -eD_p dp_F/dx \quad \text{III.2,5}$$

el gradiente de  $p_F$  puede derivarse de:

$$p(x)_F = p_n \exp(eV/kT) \exp\{-(x-x_p)/L_p\} \quad \text{III.2,6}$$

y como:

$$dp(x)_F = -1/L_p \{p(x)_F\} \quad \text{III.2,7}$$

se tiene que:

$$i_p = eD_p/L_p \{p(x)_F\} \quad \text{III.2,8}$$

La concentración de huecos inyectados en la capa n puede expresarse por medio de:

$$p(x)_F = p(x) - p_n \quad \text{III.2,9}$$

siendo  $p(x)$  la concentración total y  $p_n$  la concentración de huecos en la capa n en equilibrio térmico. En  $x_n$  se obtiene:

$$i_p(x_p) = eD_p/L_p \{p(x_n) - p_n\} \quad \text{III.2,10}$$

y como  $p(x_n)$  depende exponencialmente de  $V_F$  se tiene:

$$i_p(x_p) = eD_p/L_p \{ \exp(eV_F/kT) - 1 \} p_n \quad \text{III.2,11}$$

Similarmente, se obtiene  $i_n$  para  $x_n$ :

$$i_n(x_n) = eD_n/L_n \{ \exp(eV_F/kT) - 1 \} n_p \quad \text{III.2,12}$$

Solamente se pierden unos cuantos huecos cuando la corriente de los mismos atraviesa la barrera entre  $x_p$  y  $x_n$ , y entonces las corrientes de huecos en ambos lados de la unión son casi iguales. Asimismo, la corriente de electrones  $i_n$  no declina mucho cuando atraviesa la unión, ó sea que se tiene la condición  $i_n(x_n) = i_n(x_p)$ ; luego, como la ecuación para la corriente total en el diodo polarizado puede obtenerse sumando  $i_p(x_p)$  e  $i_n(x_n)$ , se tiene que:

$$i_F = e \{ (D_n n_p / L_n) + (D_p p_n / L_p) \} \{ \exp(eV_F/kT) - 1 \} \quad \text{III.2,13}$$

donde el primer término se llama "corriente de saturación  $i_s$ ":

$$i_s = e \{ (D_n n_p / L_n) + (D_p p_n / L_p) \} \quad \text{III.2,14}$$

La ecuación que describe la corriente del diodo bajo polarización directa es una dependencia exponencial simple del voltaje. A la temperatura ambiente,  $kT$  es igual a  $\frac{1}{40}$  eV, mientras que  $V_F$  es algo mayor a 50 mV, por lo que el exponente  $eV_F/kT$  es mayor -- que 1 y entonces:

$$i_F/i_s = \exp(eV_F/kT) \quad \text{III.2,15}$$

Ya que  $i_s$  es una constante, esta ecuación resulta en una línea recta en una escala semilogarítmica para la dependencia del voltaje de una corriente de directa de un diodo.

Para la mayoría de los propósitos prácticos, debe hacerse una extensión de la teoría del diodo porque la suposición de que la recombinación es pequeña en cualquier parte del cristal puede

no ser verdadera. Se ha observado que, particularmente dentro de la región de espacio de carga, los centros de recombinación pueden tener algunos efectos sobre la corriente.

Considérese un electrón en la capa n en la banda de conducción  $E_L$ ; bajo condiciones de polarización directa, se moverá a la región de espacio de carga donde ganará la energía  $e(V_D - V_F)$ , continuando posteriormente su movimiento en la capa p. En el acto de recombinación, los electrones necesitan no subir toda la trayectoria, igual a  $e(V_D - V_F)$ , en la banda de conducción, ya que tan pronto como encuentren un centro de recombinación conveniente se recombinarán con un hueco proveniente de la capa p.

Esto sucede cuando los electrones ó los huecos han atravesado solamente una fracción de la altura total (para la mitad de esa altura, las condiciones para los electrones y para los huecos son simétricas). Debido a que es más fácil que se detengan ahí en vez de que venzan la barrera entera, más electrones se mueven hacia los centros de recombinación en vez de hacerlo hacia la capa p.

En realidad se tiene que, con centros de recombinación en la barrera, la corriente medida es mayor que sin ellos, particularmente a bajos voltajes. Al incrementar la polarización directa, la fracción de electrones que alcanza la capa p (corriente de difusión) se incrementa más rápidamente que la "corriente de recombinación", ya que ésta está limitada por el número de centros de recombinación que, a cierto voltaja de umbral, llega a saturarse cuando más y más electrones se introducen en la barrera; se ha calculado la corriente de recombinación como:

$$i_R = i_{R0}(\exp(eV_F/kT) - 1)$$

III.2,16

Puede demostrarse que "A" es 2 cuando los centros de recombinación se encuentran en la mitad de la brecha y están distribuidos uniformemente, mientras que para otras condiciones variará entre 1 y 2. La figura III.2,4 muestra la corriente para sombra medida en una celda solar común de silicio; la pendiente de A=1 a voltajes mayores indica una corriente de difusión pura, mientras que a voltaje menor se sumará una corriente de recombinación.

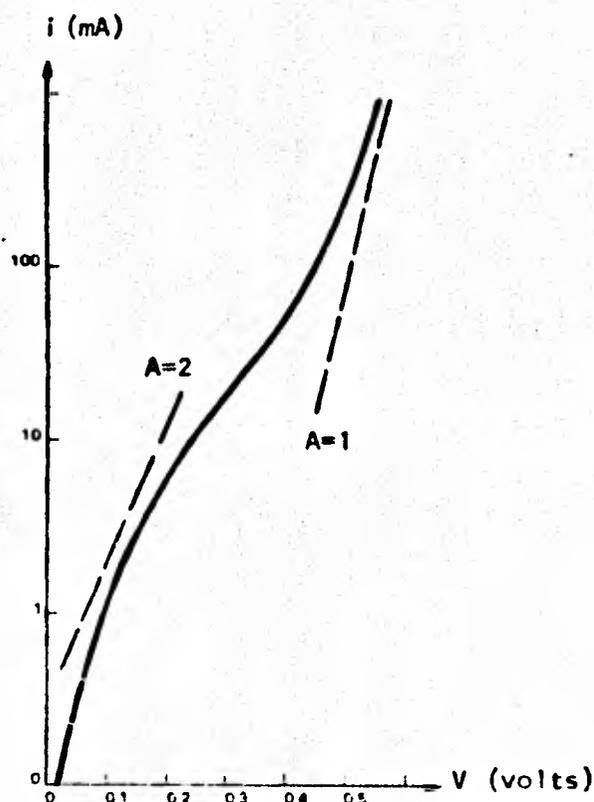


Figura III.2,4 Curva I-V práctica para una celda solar de silicio no optimizada.

A baja polarización aplicada, es frecuente observar que la "rodilla" es más pronunciada, y ya han sido encontrados valores mu

cho mayores que 2 para "A"; puede demostrarse que estas corrientes inesperadamente altas a bajos voltajes se deben a la presencia de corrientes óhmicas derivadas, que pueden estar presentes en la -- gran área superficial de las uniones usadas para las celdas de silicio. Como norma, los valores de "A" mayores que 1 tienen un efecto adverso en la eficiencia de las celdas solares.

Este esquema general permanece inalterado en celdas solares prácticas, a pesar del hecho de que algunas suposiciones deban ser modificadas: por ejemplo, el espesor de la barrera es típicamente de 0.1 micras en comparación a las 200 del espesor del cristal. La longitud de difusión puede calcularse de los tiempos de vida medidos, como en el silicio monocristalino a la temperatura ambiente, en el cual el tiempo de vida de los portadores minoritarios es en el mejor de los casos de  $2.5 \times 10^{-3}$  segundos y la constante de difusión de  $15 \text{ cm}^2 \text{ seg}^{-1}$ , dada una longitud de difusión de 200 micras.

Pero en la mayoría de las celdas solares de silicio la longitud de difusión para los electrones en el material tipo p no es mayor a 200 micras porque su tiempo de vida es más corto. Esto significa que, cuando se aplica una polarización directa a una celda solar de 200 micras, la concentración de electrones inyectados en la parte delantera ha decrecido en un factor aproximado de 2.7 ("e") después de difundirse al contacto posterior.

### III.3. EFECTOS DE LA LUZ INCIDENTE EN UN DIODO.

La característica corriente-voltaje de un diodo iluminado es idéntica a la característica para la condición de sombra, excepto que se le suma una "fotocorriente" que puede describirse de la manera siguiente:

- a) La corriente adicional debida a la luz incidente es independiente del voltaje aplicado.
- b) La corriente es proporcional a la intensidad de la luz.
- c) Esta corriente fluye en dirección opuesta a la corriente de sombra.

El proceso básico de la fotocorriente es el "fotoefecto"; -- cuando la luz incide en un sólido libera electrones y huecos por ionización interna, siendo la concentración de electrones y huecos proporcional a la tasa de absorción de luz (idealmente se asume -- que toda la luz es absorbida para transmisiones de energía de la banda de valencia a la de conducción) y al respectivo tiempo de vida de los portadores.

La absorción de la luz es posible solamente si la longitud de onda ( $\lambda$ ) es menor que el margen de absorción del material iluminado. La energía fotónica en el margen de absorción corresponde a la energía mínima con que debe proveerse a un electrón para que cruce la brecha de energía, y la fracción de energía fotónica excedente a esta brecha ( $E_L - E_V$ ) es transformada en energía térmica.

La figura III.3,1 es una gráfica del coeficiente de absorción del silicio: su margen de absorción abarca una longitud de onda de 1 micra y la profundidad de penetración de la luz es inversamente proporcional al coeficiente de absorción. La luz azul ( $\lambda=0.5 \text{ mi}$  --

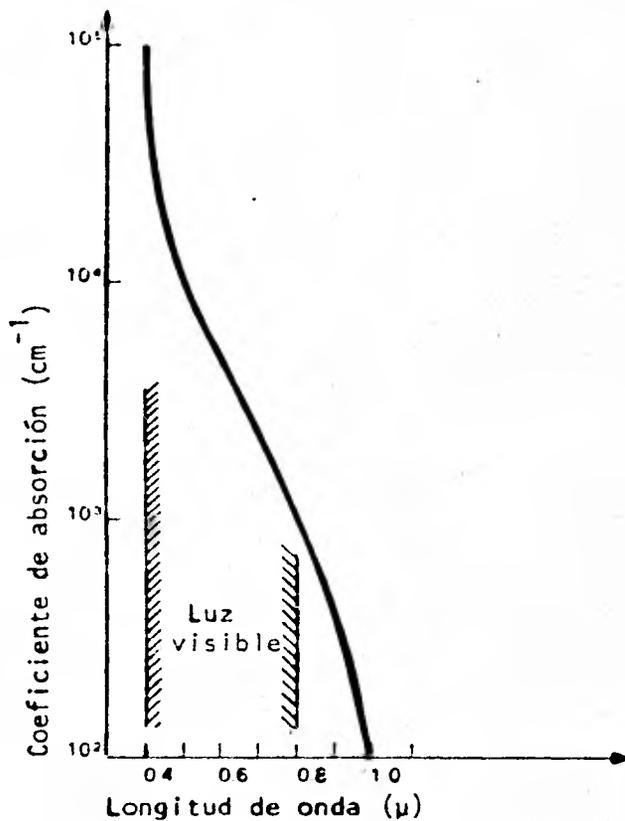


Figura III.3,1 Coeficiente de absorción en monocristales de silicio.

cras) es totalmente absorbida por una capa de silicio de 1 micra - de espesor, mientras que la luz roja lo es mediante una capa de 10 micras de espesor; para la absorción de la luz con una longitud de onda de 1 micra, se requiere entonces de un espesor de 100 micras.

El tiempo de vida de los electrones fotogenerados y de aquéllos inyectados por una polarización de directa aplicada a un diodo en la sombra es aproximadamente el mismo; en celdas prácticas de silicio, el tiempo de vida en la base toma valores por debajo de 10 μseg.

Los electrones y huecos creados dentro de la barrera están ex

puestos directamente al campo  $V_D/W$ , siendo  $W$  la amplitud de la barrera; la intensidad de este campo es muy fuerte, mientras que  $V_D$  es del orden de 900 mV a la temperatura ambiente y la amplitud de la barrera es de unas 0.5 micras. La intensidad del campo puede estimarse en unos 10 kV/cm, y en este campo tan fuerte los portadores ya no obedecen la simple relación:

$$v = \mu E \quad \text{III.3,1}$$

en donde  $v$  es la velocidad de los electrones,  $\mu$  su movilidad y  $E$  la intensidad del campo eléctrico.

La razón es que, en un campo eléctrico de gran intensidad, ocurre una interacción entre los electrones y los fotones ópticos de la red de silicio. Los portadores entonces adquieren más energía de la que tienen en equilibrio térmico: arriba de ciertas intensidades de campo, las velocidades de aproximación se acercan a una velocidad de dispersión limitada que es aproximadamente de  $10^7$  cm/seg.

Esta es la más alta velocidad de aproximación que los portadores pueden alcanzar en el silicio: para una intensidad de campo de  $10^4$  V/cm que ocurre en las uniones de las celdas solares, actualmente ya se ha alcanzado este máximo. Ya que la corriente de campo es igual a:

$$i = env = \text{cte.} \quad \text{III.3,2}$$

no varía con el voltaje, debido a que la fotocorriente permanece constante a pesar del voltaje aplicado a la celda solar, siempre que éste sea menor a  $V_D$ .

Aún más, no es posible incrementar la fotocorriente en un -

diodo reduciendo la amplitud de la barrera, reforzando por consiguiente al campo; entonces, los electrones y los huecos se dirigen con la máxima velocidad posible a través de la barrera siguiendo la dirección de  $V_D$  (mientras que la corriente de directa en un diodo en la sombra fluye en la dirección opuesta). Como consecuencia de la corriente de campo de fotoportadores en la unión, los portadores fotogenerados en el exterior de la misma son drenados hacia dicha unión, que actúa como un enorme "sumidero" para los huecos y los electrones.

Se establecerá un gradiente de concentración en la capa para el caso de estado estable, y como consecuencia se tiene una corriente de difusión de electrones que puede expresarse como:

$$i_n(x) = eD_n \frac{dn}{dx} = \text{cte.} \quad \text{III.3,3}$$

y más allá de la unión puede escribirse:

$$i_n = \{eD_n/L_N\}n_{ph} \quad \text{III.3,4}$$

con  $n_{ph}$  proporcional a la tasa de generación y al tiempo de vida. La figura III.3,2 muestra esquemáticamente esta corriente para una celda de silicio para una intensidad solar típica.

La concentración de electrones  $n_p$  en la sombra puede determinarse de dos maneras: en un material de  $1\Omega\text{-cm}$  la concentración de huecos  $p_p$  es de  $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ; con  $n_p = 10^{20}/p_p$  ( $10^{20}$  corresponde a  $n_i^2$  y es una constante del material)  $n_p$  llega a ser de  $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ . Ya que  $i_F/i_S = \exp(eV_F/kT)$ , puede también deducirse de una gráfica corriente-voltaje en la sombra para una polarización aplicada de 0 volts.

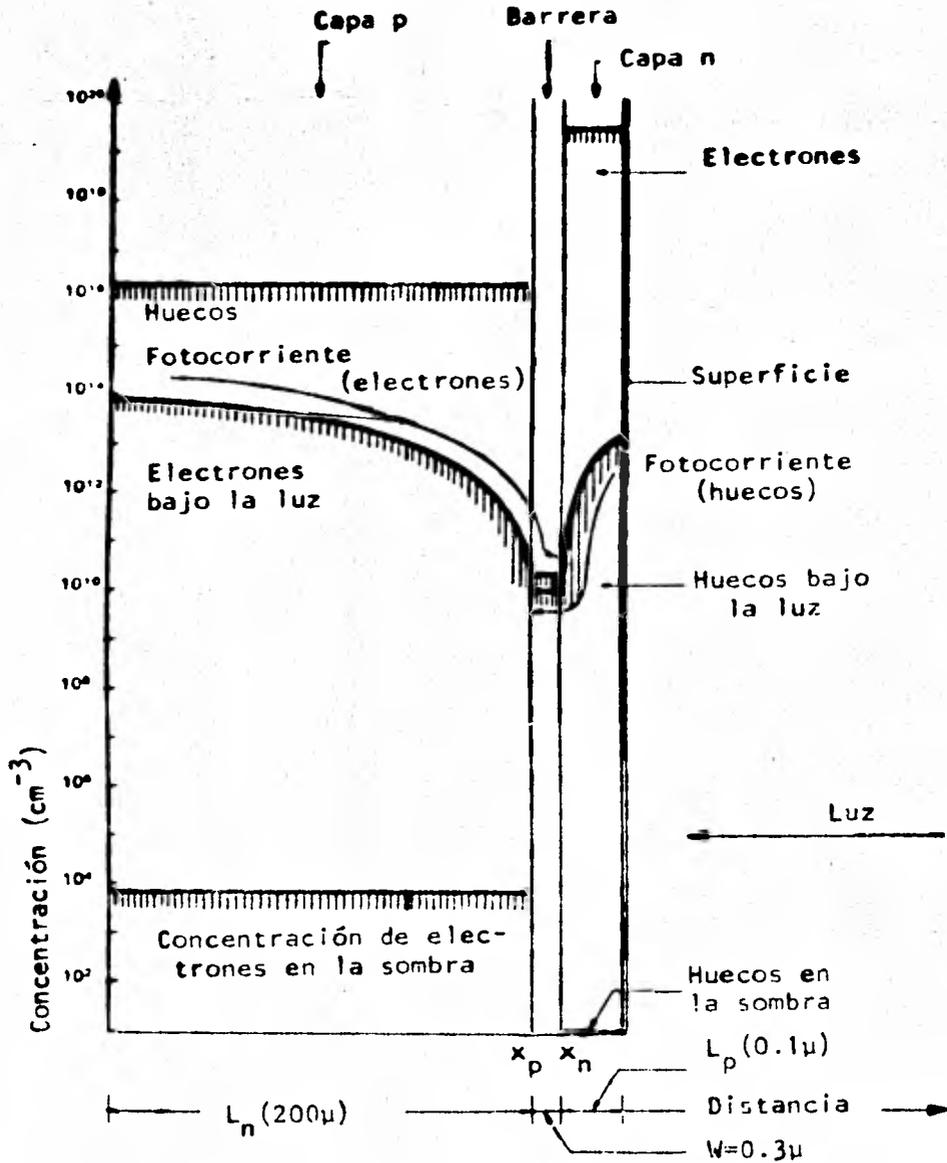


Figura III.3,2 Perfiles de concentración en una celda solar práctica de silicio: condición de corto circuito. Caso ideal de recombinación "0" en la superficie del cristal.

Un valor extrapolado de  $i_s = 4 \times 10^{-12}$  A  $\text{cm}^{-2}$  para  $V=0$  conduce al mismo valor de  $n_p$  para celdas prácticas. De otros valores estándares para celdas de silicio puede determinarse el perfil de la fotocorriente de portadores, siendo dichos valores:

$$n(\text{sombra}) = 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3} \quad \text{III.3,5}$$

$$D_n = 27 \text{ cm}^2 \text{ seg}^{-1} \quad \text{III.3,6}$$

En las celdas prácticas de silicio, una fotocorriente típica bajo luz solar intensa es de  $40 \text{ mAcm}^{-2}$ ; correspondientemente, la concentración de electrones dentro de la barrera puede determinarse usando:

$$i_{ph} = env(\text{máxima}) \quad \text{III.3,7}$$

$$v(\text{máxima}) = 10^7 \text{ cmseg}^{-1} \quad \text{III.3,8}$$

lo que da un valor de  $n = 2.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . Aún más, esta concentración de electrones debe ser la misma en la interfase entre la barrera y la capa p.

El gradiente de concentración se obtiene de la ecuación para la corriente de difusión: con  $i_n = 40 \text{ mAcm}^{-2}$  y  $D_n = 27 \text{ cm}^2 \text{ seg}^{-1}$  - este gradiente tiene un valor de  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , como puede verse en la figura III.3,2. Es obvio que la corriente de electrones debe ser constante en la capa n completa, lo que implica que el gradiente de concentración también lo será; entonces, a diferencia de las corrientes de difusión de un diodo con polarización de directa en la sombra, el perfil de la concentración aparece como una "rodilla" - en la escala logarítmica de dicha figura (y correspondientemente pueden determinarse las corrientes de huecos en la capa n y en la unión).

La fotocorriente ilustrada en esta misma figura pasa a ser la corriente de corto circuito de una celda solar no iluminada, y debe enfatizarse que fuera de la unión ésta es una corriente de difusión; no es afectada por el voltaje aplicado externamente, y depende exclusivamente de la intensidad de la luz.

Cuando se aplica un voltaje a una celda solar no iluminada, la característica corriente-voltaje es como se muestra en la figura III.3,3: como se hizo notar anteriormente, la corriente producida a cualquier voltaje puede expresarse en dos componentes, llamadas la corriente de diodo y la fotocorriente constante, que fluyen en direcciones opuestas. La concentración de electrones de la fotocorriente en la capa p y la concentración de huecos de la fotocorriente en la capa n son las mismas que en la figura III.3,2.

Sin embargo, al incrementarse el voltaje (ver también la figura III.3,4) estas fotocorrientes son cada vez más y más compensadas por los portadores inyectados de la barrera. Debido a que el drogado no es simétrico en las celdas corrientes de silicio, a cualquier voltaje se inyectan a la capa p más portadores que a la capa n; esto proviene del hecho de que a  $x_p$  se tiene que  $n_p \exp(eV/kT)$  es siempre mayor que  $p_n \exp(eV/kT)$  en  $x_n$ , simplemente porque la concentración de  $n_p$  en la sombra es mayor que  $p_n$ , siendo V el voltaje aplicado a la celda solar.

A cierto voltaje  $V_1$  los electrones inyectados a la capa p junto con la corriente de campo de huecos balancearán exactamente a la fotocorriente de electrones en esa capa. A este voltaje, la fotocorriente de huecos de la capa n no es balanceada completamente y hay una remanencia de corriente neta  $i_1$ , como se mues-

tra en la figura III,3,3

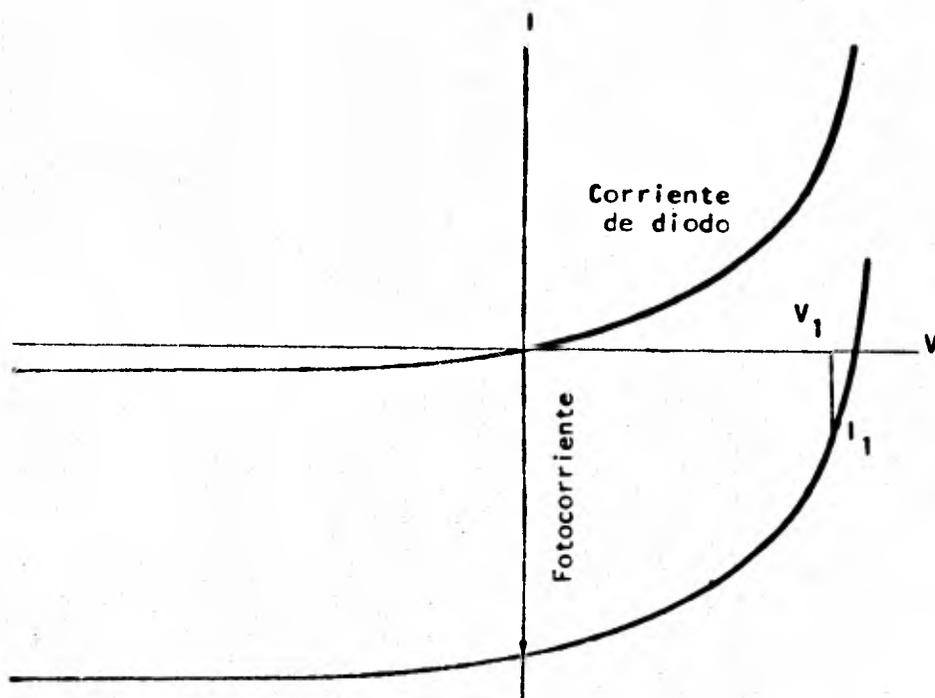


Figura III.3,3 Fotocorriente y corriente de diodo.

A un voltaje alto, una corriente neta de diodo aparece en la capa p, alejándose de la barrera, y el voltaje al cual esta corriente iguala a la fotocorriente de huecos en la capa n, que no es completamente compensada por inyección, es el voltaje de circuito abierto. Luego, la corriente neta en un lado de la unión -- compensa a la corriente neta que fluye en el otro lado, siendo el total cero, lo que se muestra en la figura III.3,4.

Las corrientes son corrientes de estado estable que fluyen permanentemente, a diferencia de las corrientes en equilibrio de un diodo en la sombra, que son interrumpidas por el establecimiento de una distribución de Boltzman.

Para ilustrar mejor el mecanismo de flujo de corriente en celdas solares, considérese el comportamiento de las celdas de - - -

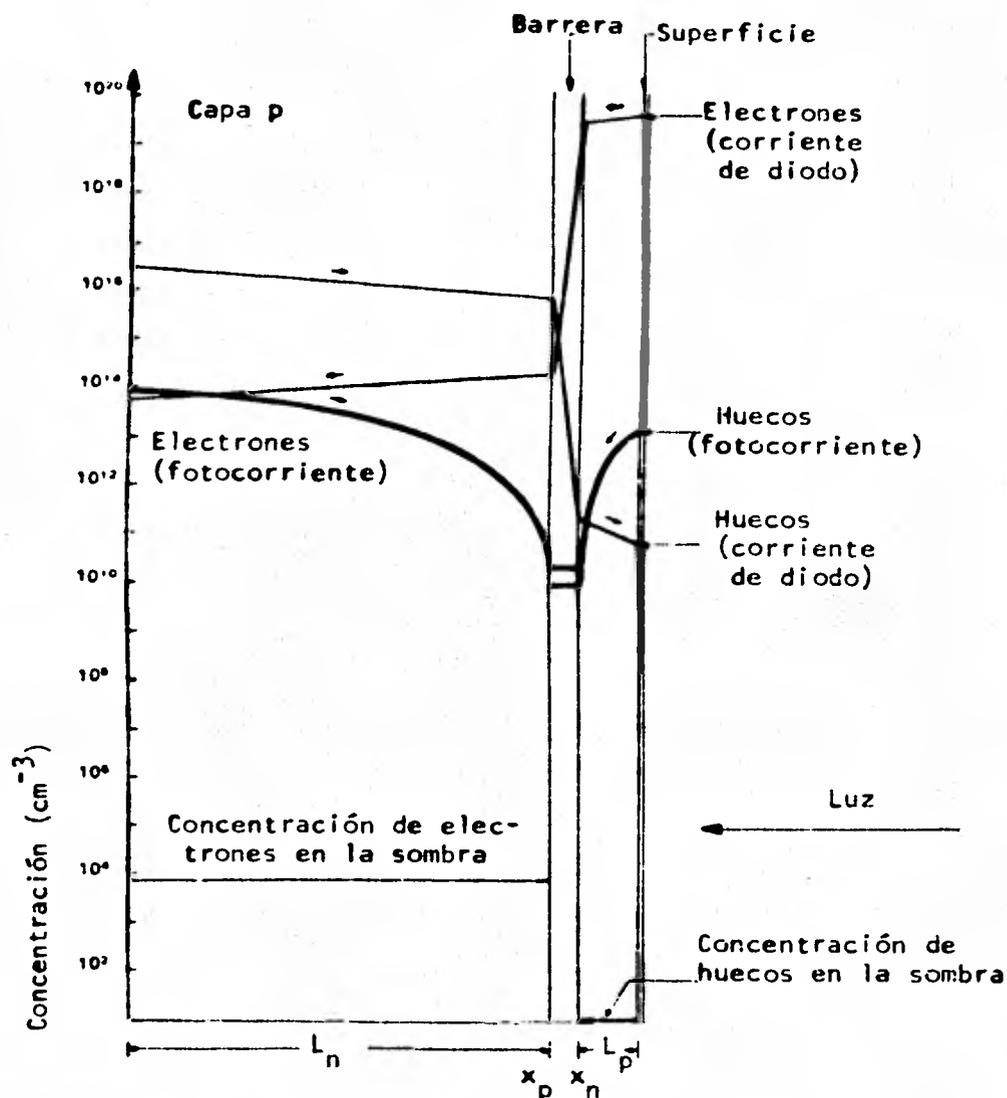


Figura III.3,4 Perfiles de concentración en una celda solar como la de la figura anterior: condición de corto circuito (unión de silicio tipo p-n).

CdS-Cu<sub>2</sub>S en las que la fotocorriente está limitada a un lado de la unión: aquí el CdS tipo n está en íntimo contacto con el Cu<sub>x</sub>S tipo p, siendo  $x = 1.995$  para celdas solares "buenas". Muchas de las propiedades físicas del Cu<sub>x</sub>S son similares a las del silicio, en particular el coeficiente de absorción y la brecha de banda, que es de unos 1.2 electrón-volts a temperatura ambiente.

La concentración de huecos en el Cu<sub>2</sub>S es de  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , mientras que la de los electrones en la sombra sería del orden de 10. La concentración de electrones en el CdS fuera de la barrera es más o menos la misma que la de huecos en la base una celda de silicio; sin embargo, debido a que la brecha del CdS es de 2.4 eV, la concentración de huecos en la sombra es despreciable.

La mayor parte de la luz solar es absorbida en el Cu<sub>2</sub>S, y la fotocorriente de electrones resultante es drenada a través de la unión que se establece completamente en el CdS. La figura III.3,5 muestra que, en condiciones de corto circuito, la fotocorriente de electrones es compensada por los electrones inyectados desde el CdS.

Los huecos inyectados desde el Cu<sub>2</sub>S al CdS son despreciables debido a la pequeñez de  $P_n$  en el CdS. Este análisis demuestra que la fotocorriente en las celdas solares de CdS Cu<sub>x</sub>S es determinada principalmente por el tiempo de vida y la difusión de los electrones en el Cu<sub>x</sub>S, mientras que la corriente de diodo, esto es, la característica I-V de la celda, es determinada por el CdS.

La fórmula para la característica I-V de una celda solar puede expresarse como:

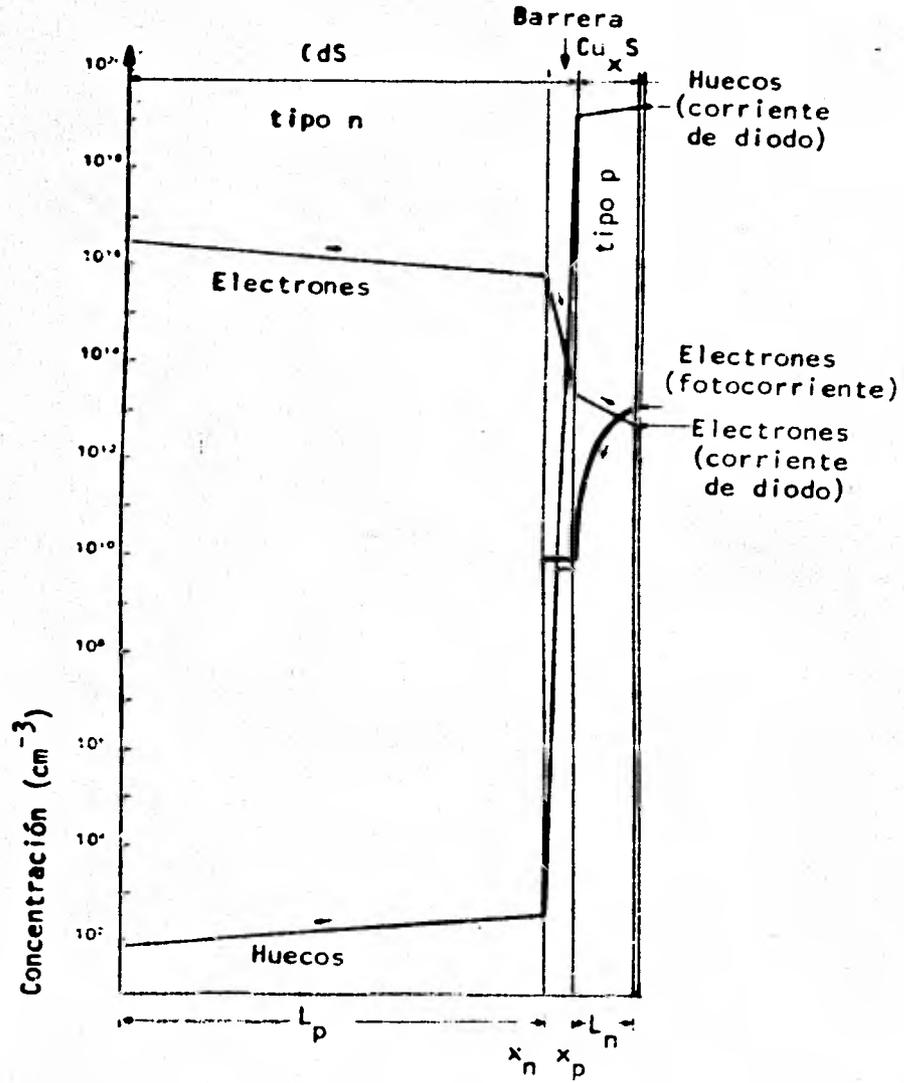


Figura III.3,5 Perfiles de concentración de una celda solar de heterojuntura CdS-Cu<sub>x</sub>S: condición de circuito abierto.

$$I = I_s \{ \exp(eV/kT) - 1 \} + I_{RO} \{ \exp(eV/kT) - 1 \} - I_{foto} \quad \text{III.3.9}$$

Cuando  $I = 0$ , el fotovoltaje es:

$$V = (kT/3) \ln(1 + I_{foto}/I_s) \quad \text{III.3.10}$$

(Si la corriente de recombinación es despreciable. Si esta corriente es grande comparada con  $I_s$ , el lado derecho debe multiplicarse por 'A' es  $I_s$  reemplazarse por  $I_{RO}$ ).

Después de estudiar la teoría del efecto fotovoltaico, es -- fácil entender el comportamiento térmico de las celdas solares: la fotocorriente casi no es afectada porque la temperatura tiene una débil influencia en la corriente de difusión de los portadores minoritarios fotogenerados, mientras que la constante de difusión - "D" y el tiempo de vida " $\tau$ " son insensibles a la temperatura.

Por otra parte, el voltaje de circuito abierto decrece linealmente con la temperatura debido al hecho de que, en una celda de silicio por ejemplo, la concentración de electrones  $n$  en  $x_p$  que -- balancea a la fotocorriente en condiciones de circuito abierto, depende exponencialmente de  $eV_{oc}/kT$ . La única manera de mantener --  $n(x_p)$  constante es, entonces, dejar que  $V_{oc}$  decrezca en la misma -- proporción de  $kT$ , es decir, de la temperatura.

### III.4. CELDAS SOLARES

#### III.4.1 LA CELDA SOLAR CONVENCIONAL DE SILICIO.

La celda solar más ampliamente utilizada y técnicamente desarrollada es la celda de silicio, aunque su popularidad no nace de su excelencia científica, sino del hecho de que se apoya en la extensa experiencia de la tecnología y manufactura de dispositivos de estado sólido de la industria de semiconductores.

Por otra parte, el silicio es químicamente estable y de él se obtienen celdas de duración potencialmente larga en el medio ambiente terrestre, además de que la mayoría de las celdas comerciales tiene una eficiencia de conversión de un 10%, aproximándose en la actualidad algunas incluso al 15%.

Sin embargo, el costo de las celdas solares de silicio es tan alto, que su uso como fuente de energía para aplicaciones terrestres ha estado limitado a instalaciones remotas especiales donde el costo de la potencia es pequeño comparado con otros costos, ó donde el servicio es esencial, como en teléfonos ó instrumentos en sitios remotos.

En la actualidad, todas las celdas se fabrican con silicio policristalino, siendo redondas las celdas normales de "bajo costo" porque están hechas de hojas cortadas de rodillos de dicho material; la figura III.4.1.1 muestra esquemáticamente la estructura de una celda solar típica de silicio.

La estructura mostrada tiene un uso muy amplio, pero es posible hacerle modificaciones: por ejemplo, el espesor puede reducirse a 50 micras, la capa antirreflectiva puede ser suprimida por -

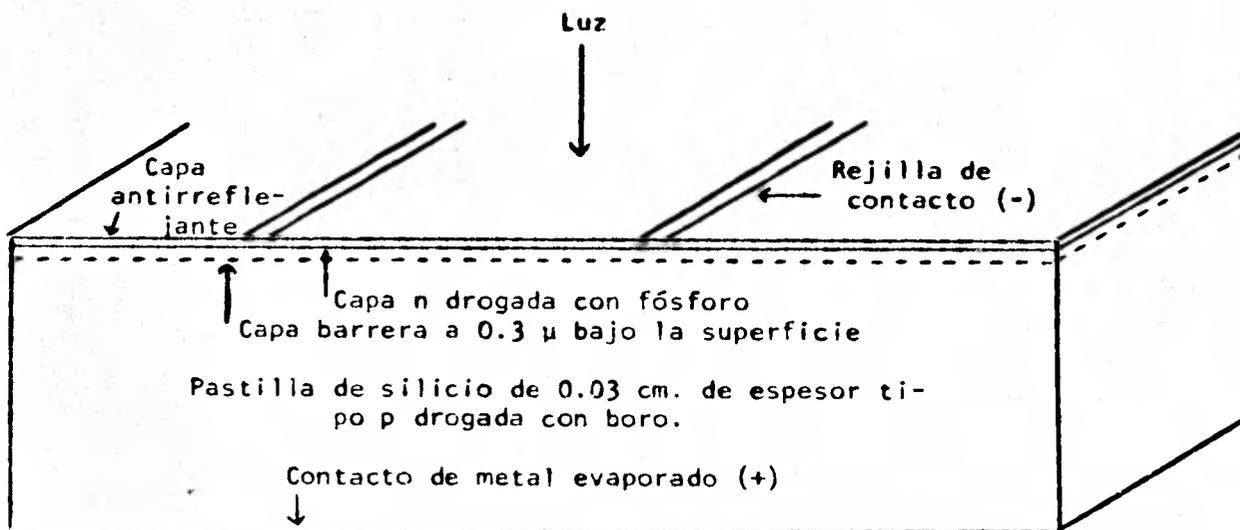


Figura III.4.1.1 Corte esquemático de una celda de silicio.

razones económicas, la polaridad del voltaje puede invertirse al usar una estructura p-n en vez de una n-p. Así mismo, pueden utilizarse otros materiales para el dopado.

Debido a la barrera que, como ya se dijo, es esencial para el efecto fotovoltaico, las celdas solares tienen en la sombra características de diodo; en la figura III.4.1.2 se muestra la característica corriente-voltaje (I-V) de una pequeña celda típica de 2x2 cms, donde se observa que bajo la luz, la curva mantiene el mismo contorno pero desplazado a lo largo del eje negativo de la corriente. Como resultado, se tiene un voltaje de circuito abierto en el eje positivo del voltaje y una corriente de corto circuito en el eje negativo de la corriente.

La curva I-V se desplaza linealmente a lo largo del eje de la corriente como una función de la intensidad de la luz, y, entonces, la dependencia de la intensidad de la luz es lineal. Se sigue

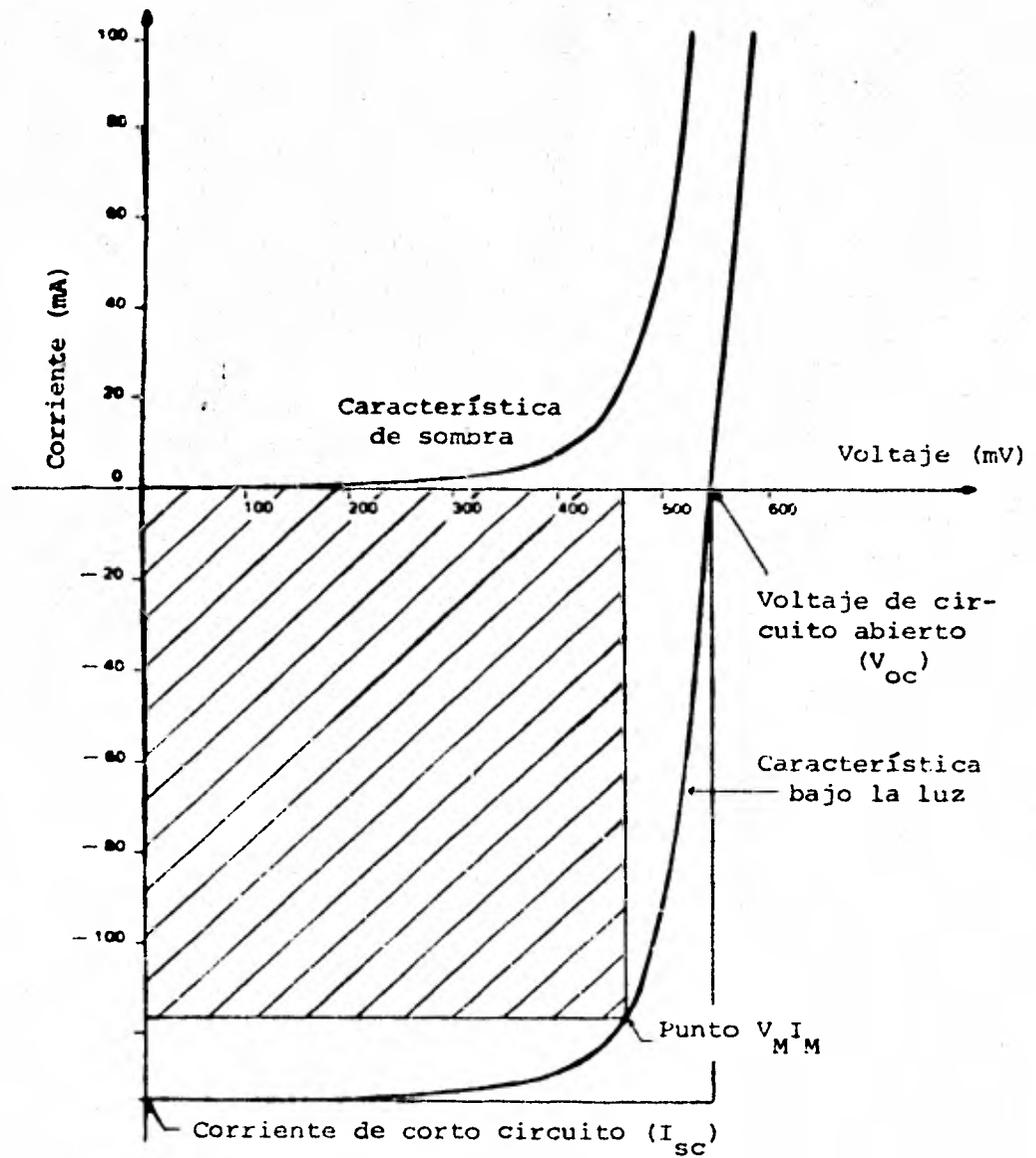


Figura III.4.1,2 Características I-V de una celda solar de silicio típica.

también que el voltaje de circuito abierto se incrementa como una función logarítmica de la intensidad de la luz.

La característica I-V de una celda solar puede interpretarse de la siguiente manera: dentro de la barrera se tienen un campo eléctrico y una diferencia de potencial, que se deben enteramente a la diferencia entre los drogados de los dos lados del cristal. En la sombra, este campo eléctrico se opone al paso de una corriente eléctrica; si se aplica un voltaje externo en la dirección opuesta, el campo se fortalece y con él la barrera al flujo de electrones de modo tal que la corriente es incapaz de incrementarse con el voltaje.

Pero si se aplica un voltaje externo en la misma dirección, el voltaje interno es compensado progresivamente por el externo, que actúa en la dirección opuesta; entonces, la corriente directa se incrementa hasta que el voltaje interno es completamente superado: en este punto, la barrera ya no limita más a la corriente

Cuando el diodo se ilumina, los electrones son liberados y accionados por el campo interno, que los conduce en su dirección, y como resultado se genera la fotocorriente, la cual fluye en dirección opuesta a la corriente directa de "sombra". Aunque no se aplique un voltaje externo, esta fotocorriente continúa fluyendo, y se mide como corriente de "corto circuito"; esta corriente depende linealmente de la intensidad de la luz, porque cuando se absorbe más cantidad de ésta se exponen electrones adicionales a la fuerza del campo interno.

La condición de voltaje de circuito abierto se consigue cuando la fotocorriente es balanceada por una corriente directa de

sombra asociada con el fotovoltaje que genera una corriente de directa exactamente como un voltaje aplicado externamente, como se vió anteriormente.

Otro parámetro importante de las celdas solares es el "Factor de Relleno" (F.F.), que se define como:

$$F.F. = \frac{V_M I_M}{V_{OC} I_{SC}} \quad \text{III.4.1.1}$$

donde  $V_M$  e  $I_M$  son el voltaje y la corriente máximos de salida respectivamente,  $V_{OC}$  el voltaje de circuito abierto e  $I_{SC}$  la corriente de corto circuito, siendo a su vez el producto de  $V_M$  e  $I_M$  la potencia máxima de la celda.

Entonces, puede fijarse en una celda solar un punto de máxima potencia ya sea aplicando un voltaje externo  $V_M$  ó conectando la celda a una resistencia de carga  $R=V_M/I_M$ . Gráficamente, se marcan dos rectángulos alrededor de la característica I-V, y la razón del rectángulo menor ( $V_M \times I_M$ ) al mayor ( $V_{OC} \times I_{SC}$ ) es precisamente el factor de relleno.

El factor de relleno tiene valores de entre 0.7 y 0.82 para celdas solares prácticas de silicio, mientras que los voltajes típicos de circuito abierto son de unos 550 a 600 milivolts y las corrientes de corto circuito de aproximadamente 30 mA/cm<sup>2</sup>, para celdas de silicio operadas a temperatura ambiente y a una intensidad de iluminación AMO.

Para representar una celda solar por medio de un circuito -- equivalente, se debe tomar en cuenta su resistencia interna, propia de todo dispositivo generador de potencia eléctrica. Dicha resistencia interna está formada a su vez por una resistencia en se

rie ( $R_s$ ) y otra en paralelo o "shunt" ( $R_{sh}$ ), y ambas contribuyen en la característica corriente-voltaje de la celda.

El origen de  $R_s$  se debe principalmente a los electrodos que se colocan en la celda, aunque hay una contribución debida a la resistencia intrínseca del semiconductor, mientras que el origen de  $R_{sh}$  se debe a estados de interfase en la unión y a otros defectos del material.

En la figura III.4.1.3 se muestra el circuito equivalente de una celda solar; en este diagrama la fuente de corriente  $I_{ph}$  representa a la fotocorriente,  $V_s$  e  $I_s$  son el voltaje y la corriente de salida respectivamente, y a su vez  $V_d$  e  $I_d$  son el voltaje y la corriente de diodo.

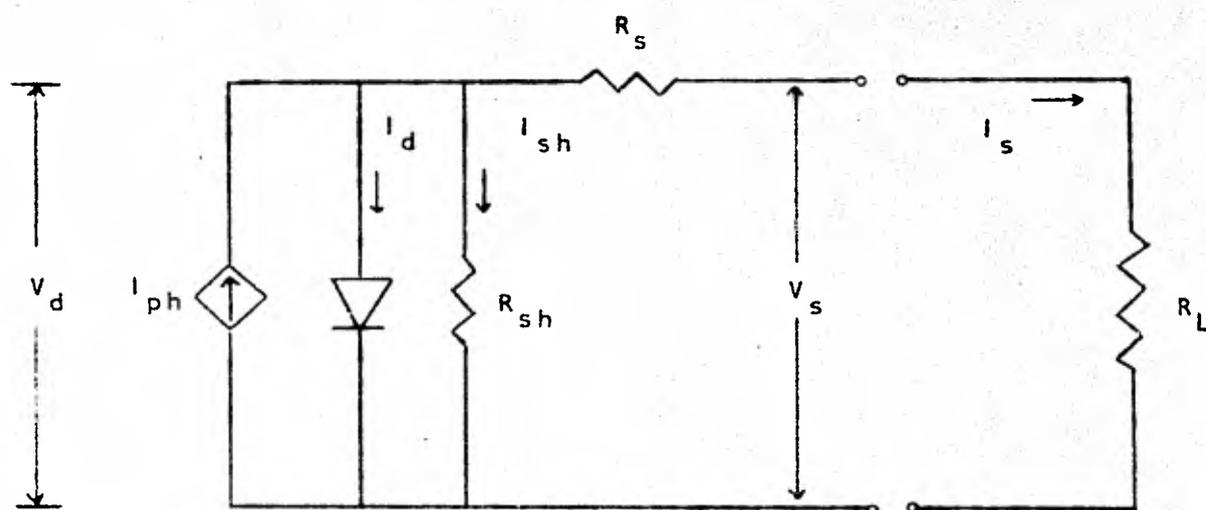


Figura III.4.1,3 Circuito equivalente de una celda solar.

Del circuito, se tiene que:

$$I_{ph} = I_d + I_{sh} + I_s \quad \text{III.4.1.2}$$

$$V_s = V_d - I_s R_s \quad \text{III.4.1.3}$$

Combinando estas ecuaciones se obtiene:

$$I_s (1 + R_s/R_{sh}) = I_{ph} - V_s/R_{sh} - I_d \quad \text{III.4.1.4}$$

que es la ecuación característica corriente-voltaje de una celda solar.

Recordando la ecuación característica del diodo:

$$I_d = I_0 (\exp(eV_d/kT) - 1) \quad \text{III.4.1.5}$$

donde  $I_0$  es la corriente de saturación del diodo, y suponiendo - que  $R_s$  es muy pequeña y  $R_{sh}$  muy grande, entonces  $V_d$  se aproxima a  $V_s$  y podemos escribir la ecuación característica como:

$$I_s = I_{ph} - I_0 (\exp(eV_s/kT) - 1) \quad \text{III.4.1.6}$$

de donde la corriente de corto circuito ( $V_s = 0$ ) está dada por:

$$I_{sc} = I_{ph} \quad \text{III.4.1.7}$$

y el voltaje de circuito abierto ( $I_s = 0$ ) por:

$$V_{oc} = (kT/e) \ln(I_{sc}/I_0 + 1) \quad \text{III.4.1.8}$$

La eficiencia ( $\eta$ ) de una celda solar se define como el cociente entre la potencia eléctrica que puede ser obtenida en el punto de máxima potencia de la curva I-V y la luz incidente ( $p_i$ ), es decir:

$$\eta = P_M I_M / P_i$$

III.4.1.9

que también se puede expresar como:

$$\eta = F.F. (I_{SC} / P_i)$$

III.4.1.10

de donde se deduce que para una potencia incidente fija, la eficiencia de conversión aumenta si lo hace el factor de relleno - F.F.

Para luz visible monocromática, esto es, un haz de luz amarilla o verde, la máxima eficiencia teórica de una celda solar de silicio es de aproximadamente de 45 a 50%. Sin embargo, las eficiencias para la luz solar son menores; esto se debe a que el espectro de la luz solar se extiende desde el ultravioleta, a través del rango visible y hasta el infrarrojo, mientras que las celdas solares de silicio son insensibles a la luz fuera de las partes visibles y la muy cercana al infrarrojo.

La variación de la sensibilidad con la longitud de onda para celdas de silicio es determinada por una serie de efectos: - los "cortes" exactos para el infrarrojo y el azul pueden ajustarse en la manufactura al variar los parámetros físicos apropiados; la opacidad del silicio cambia rápidamente con la longitud de onda, y consecuentemente la profundidad de la colocación de la junta bajo la superficie del silicio influye mucho en la sensibilidad espectral.

Si la profundidad de la junta y la longitud de difusión están más allá de la región de absorción para la luz azul, el fotón simplemente produce calor porque los pares se recombinan

antes de que alcancen a la juntura. En el infrarrojo, por el otro lado, la opacidad es menor que en la región visible, y el fotón penetra demasiado profundamente para que el par se difunda a la juntura, lo que resulta también en producción de calor más que de electrones.

Para la luz solar fuera de la atmósfera, es decir, la llamada "Air Mass 0" (AM0), con una intensidad de  $1.38 \text{ kW/m}^2$ , la máxima eficiencia teórica de conversión para celdas solares de silicio es de 19%, considerando temperatura ambiente. Pero esto solo es relevante para aplicaciones en satélites, ya que al nivel del mar el espectro es diferente, puesto que el infrarrojo es mucho más pobre ahí que en el espacio.

La máxima intensidad de luz al nivel del mar se llama "Air Mass 1" (AM1), equivalente a  $1 \text{ kW/m}^2$ , valor que puede incrementarse en las altas montañas hasta  $1.1 \text{ kW/m}^2$ . A pesar de que la intensidad de la luz en la tierra es menor que en el espacio, la composición espectral diferente en el nivel del mar tiene el efecto de concentrar más de la energía que entra en la parte del espectro donde las celdas solares son sensibles; se ha encontrado de la experiencia que la eficiencia de las celdas de silicio es, como regla general, 20% mayor en la tierra que fuera de la atmósfera, por lo que entonces la máxima eficiencia teórica de conversión para estas celdas bajo máxima iluminación puede ser de un 23%.

Las eficiencias logradas hacia 1970 para celdas terrestres se situaban entre el 10 y el 15%; sin embargo, a nivel de laboratorio, se ha estado haciendo un considerable esfuerzo desde 1971

para incrementar dichas eficiencias. Esto ha llevado al desarrollo de celdas con una eficiencia máxima de entre 17 y 19%, que es un nivel muy cercano al máximo teórico. De aquí que sea razonable esperar que las celdas comerciales se beneficien de estos trabajos y que en un futuro cercano estarán en el mercado de un 15 o 16% de eficiencia.

#### III.4.2. CELDAS DE SILICIO POLICRISTALINO.

El costo de producción de celdas de silicio a partir de cristales sencillos de ese material, ha llevado a un considerable esfuerzo para encontrar formas de utilizar material policristalino. Se piensa generalmente que si el tamaño del cristal puede hacerse grande comparado con la longitud de difusión requerida, la celda actuará prácticamente como si fuera de cristal sencillo.

El silicio policristalino puede ser depositado de varias maneras relativamente baratas, pero el problema persistente en la reducción del costo es encontrar un substrato barato sobre el cual depositar el silicio, habiéndose reportado experimentos desde 1974 con acero, grafito y zafiro. El zafiro tiene constantes estructurales razonablemente parecidas a las del silicio y es fácilmente formado en tiras de cristal sencillo en donde se deposita el silicio, pero desafortunadamente el costo de estos substratos es alto y pudiera no alcanzarse una buena reducción del costo aunque se obtuvieran celdas de buen funcionamiento.

Los mejores tiempos de vida medios logrados para el silicio sobre zafiro están en el rango de  $10^{-8}$  a  $10^{-9}$  segundos, - cien veces menores que los necesarios para celdas solares eficien

tes. Mientras que otros experimentos con grafito condujeron a celdas de silicio policristalino con eficiencias de alrededor del 1.5%.

#### III.4.3. CELDAS DE SULFURO DE CADMIO.

Las celdas solares de sulfuro de cadmio (CdS) fueron desarrolladas conjuntamente con las de silicio para las aplicaciones espaciales, pero pronto fueron relegadas. Sin embargo, y aunque uno de los problemas con estas celdas era la poca confiabilidad de su funcionamiento y su propensión a degradarse en la atmósfera terrestre, el hecho de que puedan producirse por medio de técnicas muy baratas de deposición de película delgada ha aumentado su valor potencial para aplicaciones terrestres.

El sulfuro de cadmio ha merecido casi tanta atención como el silicio, porque exhibe buenas eficiencias de conversión cuando se emplea en asociación con el sulfuro de cobre ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) como heterojuntura CdS- $\text{Cu}_2\text{S}$ . En 1974 se proyectó por primera vez la producción comercial de celdas solares de CdS, empleándose una tecnología llamada de "celda de pared frontal"; ésta consiste de un substrato en el cual se evapora una capa de CdS de 20 micras de grosor con una delgada película de  $\text{Cu}_2\text{S}$  encima, y el conjunto es herméticamente sellado en una cápsula de vidrio.

La celda se llamó de sulfuro de cadmio cuando se pensaba -- que éste era el material activo, pero al reconocerse la importancia del sulfuro de cobre y de la juntura entre los dos materiales, ahora se emplea el término "heterojuntura" para designar a este tipo de celdas, siendo la juntura entre los dos compuestos quími

cos la región activa.

La designación adecuada para esta celda sería  $\text{CdS}/\text{Cu}_{1.98}\text{S}$ , pero por brevedad las celdas de heterojuntura se designan ya sea por uno ó por otro material, siendo la elección de alguna manera debida a los investigadores que trabajaron primero con los materiales. En la figura III.4.3.1 se muestra un corte esquemático de esta celda, donde se denota la capa de sulfuro de cobre como  $\text{Cu}_2\text{S}$ , pero la tasa real de cobre a sulfuro debe apartarse de la relación 2:1 para una celda eficiente, siendo la composición nominal desde  $\text{Cu}_{1.96}$  a  $\text{Cu}_{1.98}$  por átomo de azufre.

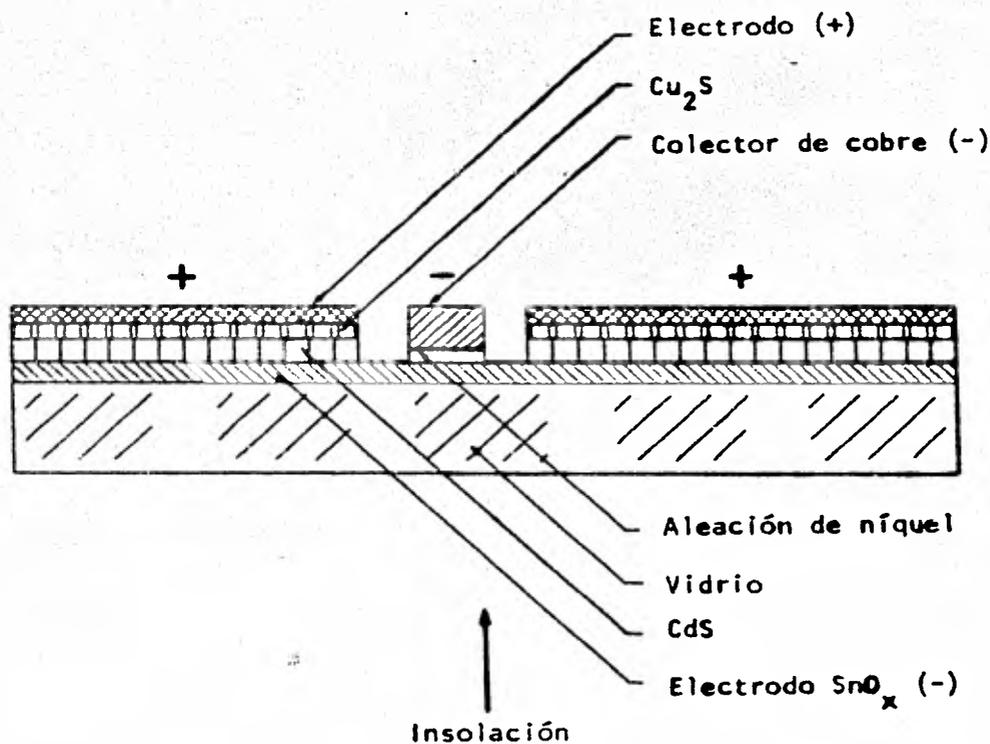


Figura III.4.3.1 Corte esquemático de una celda de sulfuro de Cadmio de "bajo costo".

En la figura III.4.3.2 se muestra la curva característica para una celda solar de CdS típica. El punto de máxima potencia de salida está en 0.75 A y 0.37 V, aunque esta curva cambia con la temperatura, como se verá más adelante; por otra parte, la eficiencia medida de esta celda fue de 5.1%.

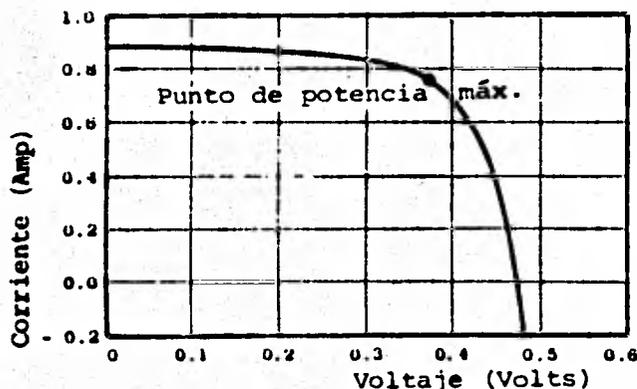


Figura III.4.3,2 Curva característica de una celda CdS/Cu<sub>x</sub>S.

Otros trabajos muy promisorios se están desarrollando con una estructura CdS-Cu<sub>2</sub>S modificada: en un substrato de vidrio convencional se rocían químicamente en sucesivos pasos una delgada y transparente capa conductiva de óxido, una capa de CdS y finalmente una capa de Cu<sub>2</sub>S, siendo el grosor de las 3 capas juntas no mayor de 3 micras. Esta celda se ilumina desde la parte posterior, o sea que la luz debe atravesar primero el substrato de vidrio y el cuerpo de la capa semiconductor antes de alcanzar la juntura; a este tipo de estructura se le llama "celda de pared posterior".

Las celdas solares de sulfuro de cadmio se consideran particularmente promisorias para el logro de celdas solares de muy bajo costo para la conversión fotovoltaica a gran escala, por ejemplo en grandes plantas solares de potencia. En primer lugar, ellas -

implican muy poco consumo de material porque la capa es extremadamente delgada: una celda solar de CdS es un ejemplo típico de la tecnología de "celdas de película delgada". En segundo, están hechas de material policristalino, que representa bajo costo en comparación al silicio monocristalino.

Los voltajes de circuito abierto para estas celdas están en el rango de 400 a 500 milivolts, el cual es menor que para las de silicio, mientras que se han reportado corrientes de corto -- circuito comparables a las observadas en las celdas convencionales de silicio, la máxima eficiencia obtenida en el laboratorio está entre 8 y 8.5%, pero es más común una eficiencia del 5% para las unidades de pequeña producción que han sido las más operadas; se estima que la máxima eficiencia teórica de celdas solares de muy delgada capa de CdS está entre el 11 y el 14%.

Debido a la pobre estabilidad de su duración, se había des-  
deñado por muchos años el desarrollo de las celdas de CdS; sin embargo, recientemente ha sido demostrada la factibilidad de celdas solares de CdS estables arriba de 90°C, y su futuro en el -- campo de la producción de electricidad en gran escala es muy promisorio. Las celdas solares de CdS todavía son inapropiadas para operación bajo alta concentración lumínica, que involucra altas temperaturas de operación a pesar de enfriamiento externo; por encima de 90 ó 100°C, estas celdas pueden sufrir un deterioro -- que afectaría la expectativa de vida del sistema.

#### III.4.4. CELDAS SOLARES DE ARSENIURO DE GALIO.

Esta otra clase de celda solar que también pertenece a las de tipo heterojuntura, es de importancia porque tiene la gran ventaja potencial de una absorbencia mayor, lo que permite absorber una mayor cantidad de fotones dentro de la longitud de difusión, y una ventaja adicional es que su brecha de banda más grande permite que este material trabaje a mayores temperaturas que el silicio y el sulfuro de cadmio.

En la forma de celdas policristalinas de película delgada, el arseniuro de galio tiene un funcionamiento muy pobre, pero -- cuando se usa en forma monocristalina como las celdas actuales -- de silicio, pueden obtenerse altas eficiencias de conversión. Se han demostrado ya eficiencias del 13%, mientras que otras fuentes anotan un 19%; a la iluminación terrestre (AM1), la máxima eficiencia teórica es de un 27%, la cual es más alta que para -- las celdas de silicio.

Por sus propiedades físicas, el arseniuro de galio está muy cerca de los materiales óptimos para las celdas solares; en la figura III.4.4.1 se muestra una estructura recientemente propuesta para esta celda. Debido a su alto coeficiente de absorción para la luz visible, toda la luz es absorbida en una capa superficial no mayor a una micra de grueso, pero sin embargo el consumo de material por unidad es considerablemente mayor que para las celdas de CdS porque se requiere un substrato de GaAs monocristalino. Al agregar la desventaja de que el costo de las celdas de GaAs comparado con el de las celdas de CdS es aún mayor cuando se considera que, en el estado presente de la tecnología, es ne-

cesario primero transformar aquél a su forma monocristalina, parece que el arseniuro de galio es inadecuado para celdas solares de "muy bajo costo".

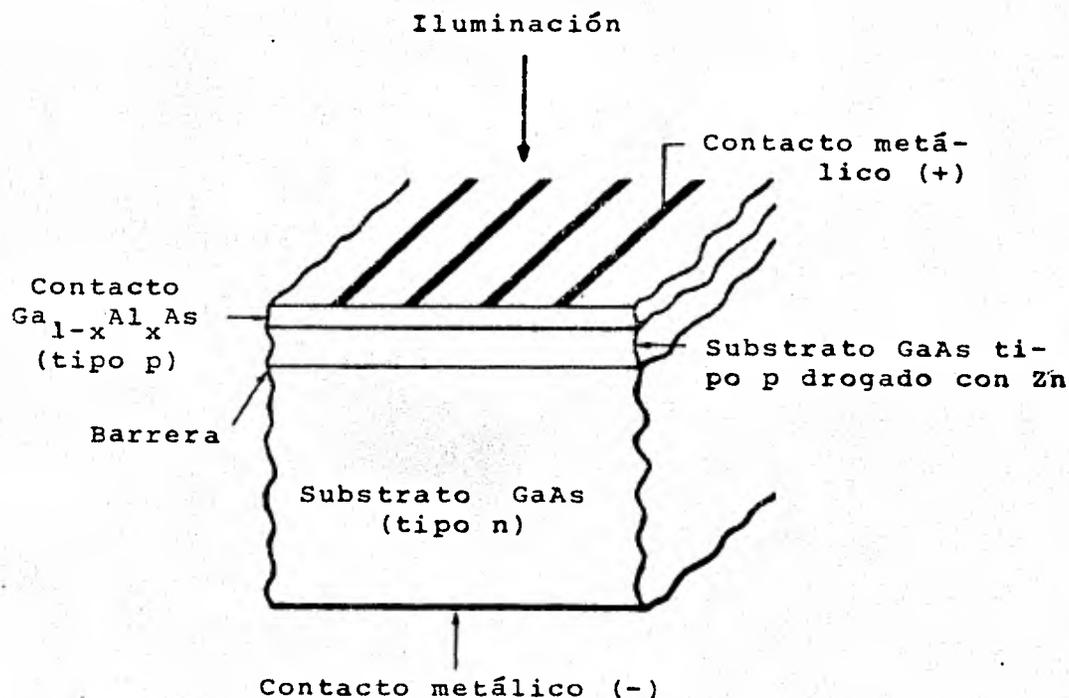


Figura III.4.4,1. Corte esquemático de una celda GaAs.

No obstante, estas celdas son promisorias en conjunción con los dispositivos concentradores de luz, donde se encuentran más altas temperaturas de operación: arriba de unos  $100^{\circ}C$ , el funcionamiento de las celdas de GaAs es mejor que el de las celdas convencionales de silicio. En primer lugar, el voltaje decrece con la temperatura en unos  $2,6 \text{ mV}$  por  $^{\circ}C$  de incremento de temperatura, que es menor que para el silicio, lo cual resulta en que la potencia de las celdas de GaAs decrece de  $0,2$  a  $0,3\%$  por  $^{\circ}C$ , y para las de silicio de  $0,35\%$  a  $0,45\%$ . En segundo, el voltaje de -- circuito abierto a la temperatura ambiente es ligeramente menor a  $1 \text{ volt}$ , lo que es apreciablemente mayor que para las celdas de

silicio; en consecuencia el voltaje que decrece como un porcentaje del voltaje original es comparativamente menor para las celdas de GaAs.

#### III.4.5. EFECTOS DE LA TEMPERATURA.

La celda solar de silicio se diseña normalmente para emplearse entre un rango de temperaturas de  $-65^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$ . La celda soportará una temperatura mayor a  $+250^{\circ}\text{C}$ , pero no por un período mayor de 30 minutos, y aún soportará una temperatura de  $+300^{\circ}\text{C}$  por períodos más cortos de tiempo.

Las celdas solares trabajan muy bien a temperaturas extremadamente bajas. No es raro encontrar un límite inferior de temperatura tan bajo como  $-100^{\circ}\text{C}$ .

La temperatura de una celda solar influye en la potencia que ella entregará para una iluminación determinada: al incrementarse la temperatura de la celda, el voltaje terminal se reducirá en un promedio de unos  $2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ , aunque este decremento en el voltaje se compensa parcialmente por el hecho de que la corriente se incrementa en unos  $0.5\text{mA}/^{\circ}\text{C}$ . Pero como esta compensación no es completa, el efecto neto es que la potencia de la celda disminuirá a aproximadamente  $0.3\%/^{\circ}\text{C}$  al incrementarse su temperatura.

Se puede calcular el efecto de la temperatura empleando simplemente:

$$E_{\text{out}} = E_{\text{ref}}\{1 - 0.002(T - 25)\} \quad \text{III.4.5,1}$$

en donde  $E_{\text{out}}$  es el voltaje de salida,  $E_{\text{ref}}$  es el voltaje de salida a  $25^{\circ}\text{C}$  y  $T$  es la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). Además:

$$I_{out} = I_{ref}(1+0.025A(T-25))$$

III.4.5,2 214

en donde  $I_{out}$  es la corriente de salida en mAmp,  $I_{ref}$  es la corriente de salida a 25 °C y T es la temperatura (°C).

El comportamiento térmico de las celdas solares es muy importante para su aplicación en la tierra, ya que el alto costo de las mismas podría superarse significativamente si ellas fueran usadas con sistemas de concentración óptica. El área de la celda sería entonces 1/x veces la concentración, y ya que los espejos son presumiblemente más baratos por metro cuadrado que las celdas podría obtenerse una reducción neta de los costos del sistema.

El problema básico con el uso de concentración óptica es que las celdas solares se calientan bajo el flujo solar, proviniendo este calentamiento de la absorción de los fotones solares y de la subsecuente recombinación de los pares; la salida de todas las celdas solares es dependiente de la temperatura, tal como se ve en la figura III.4.5,1, donde se muestra el comportamiento térmico de varios tipos de ellas.

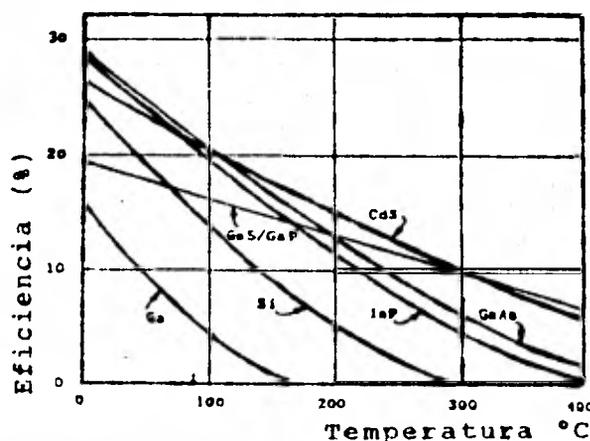


Figura III.4.5,1. Variación de la eficiencia de conversión de celdas solares en función de la temperatura.

Se nota en esta figura que el arseniuro de galio debería -- ser apenas menos sensitivo a la temperatura que el silicio, pero - en los experimentos de laboratorio el arseniuro de aluminio-galio aparece como significativamente mejor, aún para temperaturas sobre 200 °C, y entonces esta curva teórica no es absoluta cuando - se llega a las celdas de heterojuntura. Por ejemplo, las celdas - de sulfuro de cadmio deberían tener mejor funcionamiento térmico que las de arseniuro de galio, pero de hecho tienen curvas de un funcionamiento térmico pobre, debiéndose aparentemente la diferencia a que los dispositivos de heterojuntura no actúan como lo hacen los de semiconductores de alta pureza; una de las metas es entonces desarrollar el pleno potencial térmico de los materiales de amplia brecha de banda.

Ya que las celdas solares son sensibles por lo general únicamente cerca del lado rojo y del infrarrojo del espectro solar - visible, la carga del flujo solar incidente puede reducirse recubriendo las celdas para reflejar las longitudes de onda indeseadas, y al mismo tiempo como antirreflejante de las longitudes de onda efectivas en la producción de la fotocorriente.

El cambio en la salida de las celdas de sulfuro de cadmio se muestra en la figura III.4.5,2: a un voltaje constante la corriente de salida cae rápidamente con la temperatura, mientras - que a una corriente constante la caída de voltaje con el aumento de temperatura no es tan seria. El lugar de voltaje constante y - de máxima potencia de salida se muestran también en esta figura.

Por su parte, la figura III.4.5,3 muestra la dependencia de la temperatura para las celdas de silicio para una barrera de 0.8

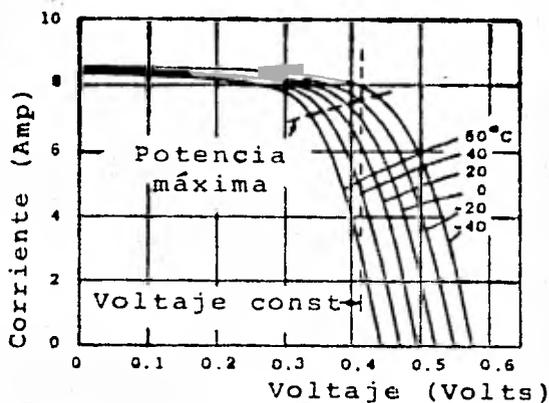


Figura III.4.5,2. Variación de la curva característica de la celdas de sulfuro de cadmio en función de la temperatura.

eV y una celda de juntura p-n ideal sin corriente de recombinación, comparada con los valores experimentales para celdas estándares de juntura difundida, así como la dependencia de la temperatura de las celdas de arseniuro de galio; la eficiencia de las celdas solares depende de la concentración de flujo "C", y se incrementa significativamente a temperaturas superiores, como se ilustra para el arseniuro de galio para una concentración unitaria de flujo y para una de mil.

Las curvas mostradas en esta figura son más bien similares en forma pero diferentes en altura. Estas curvas son para cada sensibilidad en particular, pero es aparente que se puede tomar en forma segura la sensibilidad de la celda real a usarse y estimar su comportamiento térmico simplemente dibujando una curva de forma semejante a las mostradas, a través del valor de la sensibilidad de la celda a usarse.

La razón del incremento de la eficiencia se obtiene de las

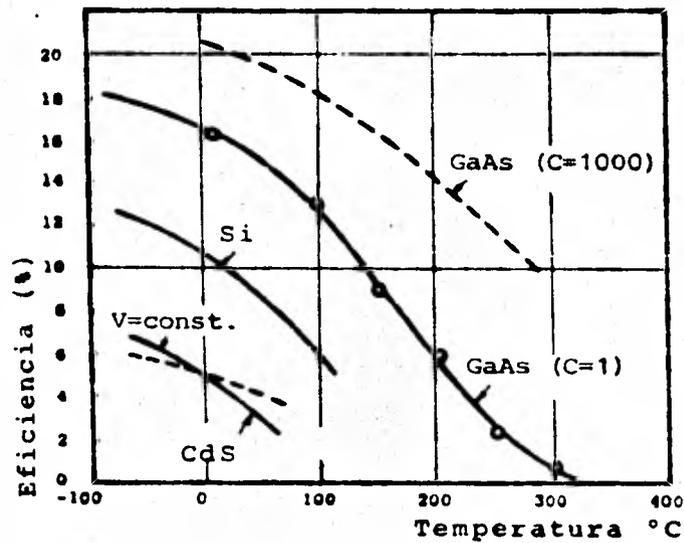


Figura III.4.5.3. Variación de la eficiencia de conversión de celdas solares en función de la temperatura.

ecuaciones para el voltaje y la corriente a óptima potencia:

$$V_p = V_{oc} - (nkT/q) \ln(qV_p I_s / nkT i_p) \quad \text{III.4.5.3}$$

$$i_p / I_s = 1 - \exp\{q(V_p - V_{oc}) / nkT\} \quad \text{III.4.5.4}$$

donde  $V_p$  e  $i_p$  son los valores del voltaje y la corriente a óptima potencia,  $V_{oc}$  es el voltaje de circuito abierto,  $nkT$  es el factor de Boltzman e  $I_s$  es la intensidad del flujo solar. Estas dos ecuaciones deben resolverse por iteraciones, y se hace el producto  $i_p V_p$  para calcular la eficiencia como una función de  $I_s$ ; la ganancia proyectada está, sin embargo, sujeta a los efectos adversos inherentes a la temperatura.

La ventaja de una celda de arseniuro de galio tipo alta temperatura es que podría utilizarse en un sistema con ciclo combinado; la celda produciría en primer lugar potencia eléctrica y, en segundo, calor, el cual sería transferido a un enfriador a aproximadamente  $400^\circ\text{C}$  para operar un ciclo termodinámico.

### III.5. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Un sistema fotovoltaico es una instalación cuya finalidad es la conversión directa de energía solar a eléctrica, y en general consiste de un arreglo de paneles colectores formados por celdas solares, un sistema de almacenamiento de energía formado por unas baterías y los sistemas auxiliares de acondicionamiento, control y manejo de potencia, tales como el inversor C.D. - C.A., reguladores de voltaje, instalación eléctrica, etc.

El arreglo colector transforma la luz solar incidente en energía eléctrica en forma de corriente directa, pudiéndose utilizar ésta en aparatos de C.D. ó en aparatos de C.A. utilizando para esto último el inversor C.D. - C.A.; asimismo, la energía transformada por el arreglo se almacena en baterías para su utilización tanto en el día como en la noche y en días de baja insolación.

También puede tenerse un sistema auxiliar en C.D. ó bien un sistema auxiliar en C.A. tales como un generador diesel ó una línea de transmisión, que pueden utilizarse dependiendo de la mejor opción tanto técnica como económica.

La figura III.5 muestra el esquema de un sistema fotovoltaico típico.

#### III.5.I. EL GENERADOR FOTOVOLTAICO.

Debido a que la potencia entregada por una celda solar es relativamente baja, por ejemplo 0.3 watts en una celda de 5 cms. de diámetro con área superficial de 20 cms<sup>2</sup> y eficiencia del 15%, trabajando bajo plena insolación y a temperatura ambiente, ó bien 1.2 watts para una celda de 10 cms. de diámetro y área de 80 cms<sup>2</sup> tra-

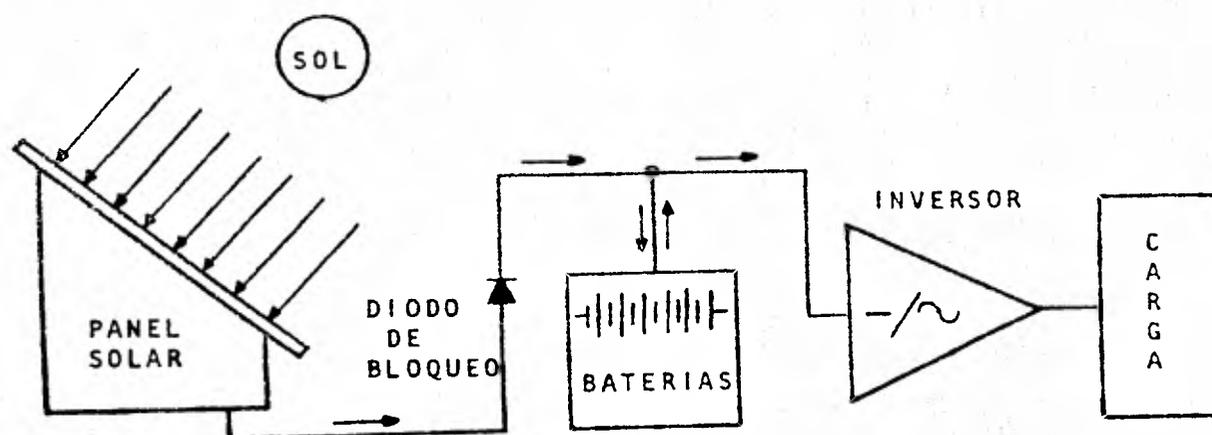


Figura III.5. Sistema fotovoltaico típico.

bajando en las mismas condiciones, es necesario conectar un determinado número de celdas para obtener mayores potencias.

Al interconectar eléctricamente las celdas se obtienen los -- "módulos fotovoltaicos", en donde se hacen conexiones generalmente tanto en serie como en paralelo, ya que si se hicieran todas las - conexiones en serie, el atrofiamiento de una sola celda traería co - mo consecuencia que la potencia entregada por el módulo fuera nula. Los módulos pueden estar formados por celdas de diversas formas - (circulares, cuadradas, hexagonales), lo cual hace que varíe el -- área colectora efectiva por módulo (es decir, el área del módulo - cubierta por celdas); esta área varía del 75 al 90%, dependiendo - de la forma de las celdas y de su distribución en el módulo.

Para fines prácticos, es conveniente instalar un conjunto de -  
módulos en estructuras firmes, llamadas "páneles fotovoltaicos"; el  
conjunto de páneles instalados y conectados constituye el "arreglo  
colector", el cual es el "generador fotovoltaico" propiamente dicho.  
La estructura del arreglo colector tiene la finalidad de integrar -  
los voltajes y potencias entregados por los módulos en los niveles  
requeridos por la demanda energética.

Debe prestarse especial atención a la combinación de las ca-  
racterísticas eléctricas de las celdas que van a conectarse. Como -  
regla general, todas las celdas que se conectan en paralelo deberán  
tener el mismo voltaje de circuito abierto y, aún más importante, -  
el mismo voltaje en el punto de máxima potencia, mientras que las -  
celdas que se conecten en serie deberán tener la misma corriente de  
corto circuito y la misma corriente en el punto de máxima potencia.

Una inadecuada combinación de celdas lleva a tener páneles de-  
fectuosos porque las celdas de fotocorriente y fotovoltajes mayores  
disipan su exceso de potencia en las celdas de inferiores caracterís-  
ticas eléctricas, limitándose así el funcionamiento del pánel, mien-  
tras que la potencia de salida se ve reducida aún más por el incre-  
mento de temperatura debido a la disipación interna de potencia.

Actualmente, en el mercado se dispone de diversas clases de pá-  
neles fotovoltaicos. Por ejemplo, el pánel mostrado en la figura --  
III.5.1,1, fabricado por la empresa "Solarex" de los Estados Unidos,  
entrega 10 watts a un voltaje de operación de 7 volts.

La construcción de un pánel solar depende en gran medida de --  
las condiciones a las cuales estará sujeto en cualquier operación en  
particular. Así, en el tipo "Unipánel" mostrado en la figura anterior,-

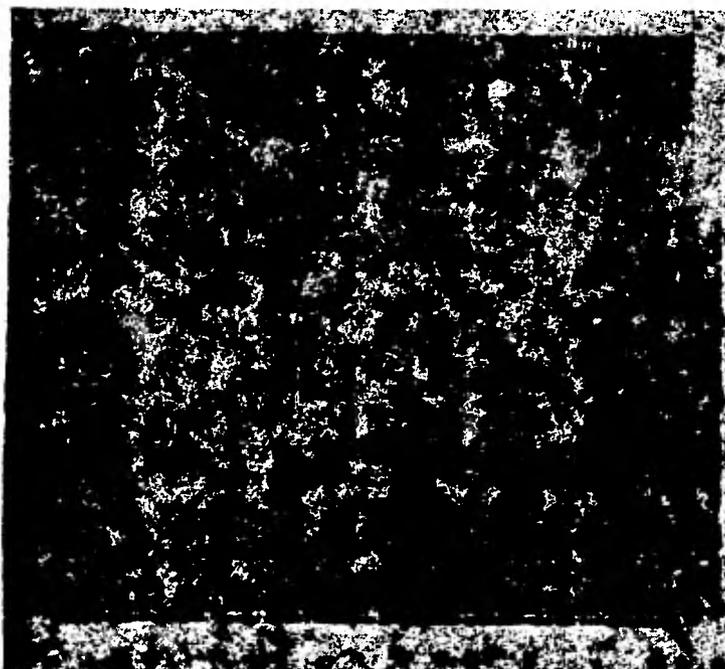


Figura III.5.1,1. Pánel "Solarex 4200J".

Las celdas están montadas en un tablero rígido de poliéster, y usualmente están encapsuladas en una goma silicosa de gran transparencia.

A pesar de que este encapsulamiento provee de una gran protección a la superficie de las celdas, se requiere de cubiertas protectoras adicionales contra condiciones ambientales especialmente severas. Para este propósito, se agregan capas de diversos materiales tales como vidrio, "plexiglas", etc., cuando se requiera de protección extra contra posibles daños a las celdas por granizo, polvo, humedad e influencias ambientales similares.

Otro factor importante a considerar en el diseño y construcción de un pánel solar es el metal de los conductores que efectuarán las conexiones eléctricas de las celdas. Normalmente, el metal utilizado

para este propósito estará sujeto a la corrosión, pero ésta se ha evitado protegiendo a dicho conductor del medio ambiente con una capa de "teflón"; este tipo de construcción de panel da un empaquetado muy durable, resistente al medio ambiente y que prácticamente no requiere de mantenimiento.

Un vistazo al panel de la figura anterior muestra que hay una limitación al utilizar celdas circulares como elementos básicos. Esto proviene del hecho de que las celdas circulares colocadas lado a lado dejan desocupada una gran área del panel que, a pesar de ser iluminada por el sol, no contribuye para la conversión de la luz en electricidad.

Se han empleado celdas de diversas formas para utilizar más eficientemente el área del panel iluminada por la luz solar. En la figura III.5.1,2 se presenta un panel en el que las celdas solares son de forma semicircular, lo cual permite incrementar el área efectiva del panel; en particular, este panel ("solarex" tipo 1480) suministra una potencia de 10 watts a un voltaje terminal de 14 volts bajo plena insolación.

Pero todavía es posible un uso mucho más eficiente del área del panel empleando celdas de forma cuadrada. La figura III.5.1,3 muestra un panel de este tipo, fabricado igualmente por la empresa "Solarex" y denominado "Solarvoltaic", en el cual esencialmente la superficie entera del panel es un área fotovoltaica activa; aún el marco de aluminio está diseñado para minimizar el área inactiva cuando se utilizan varios paneles en un arreglo mayor.

En particular, este panel cuenta con otras características importantes tales como una eficiencia global de conversión del 13%, una potencia suministrada de 35 watts y un voltaje de operación ya

sea a 14 ó a 28 volts, el cual se puede seleccionar por medio de las conexiones en la caja de uniones que es parte integral del mismo pánel.

Por su parte, la figura III.5.1,4 muestra las curvas corriente-voltaje respectivas. Las curvas de la izquierda son las conocidas curvas corriente-voltaje para varias intensidades de iluminación, mientras que las curvas de la derecha son todas para plena insolación con diferentes temperaturas de las celdas; en pruebas efectuadas en los Estados Unidos, este pánel entregó 1.06 kilowatts-hora por semana.

Si la potencia de salida deseada a un voltaje y una corriente particulares no puede obtenerse por medio de un solo pánel, entonces deberán interconectarse varios de ellos en una combinación serie-paralelo determinada para formar un arreglo colector.

La potencia de salida de este arreglo puede variarse al aumentar   reducir el número de páneles y/  alternando las interconexiones en el mismo. La mayorfa de los páneles incorpora un marco de aluminio anodizado, que puede ser ensamblado por medio de tuercas de acero inoxidable, y si el arreglo va a ensamblarse en el suelo se agregan patas y refuerzos para completar la estructura del soporte; asimismo, el arreglo puede equiparse con aisladores y pararrayos cuando sean requeridos.

La tabla adjunta resume las principales caracterfsticas de los diversos páneles fabricados por la mencionada empresa "Solarex".

### III.5.2. DISEÑO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Hay dos consideraciones principales en el diseño de cualquier



Figura III.5.1,2. Pánel "Solarex 1480".

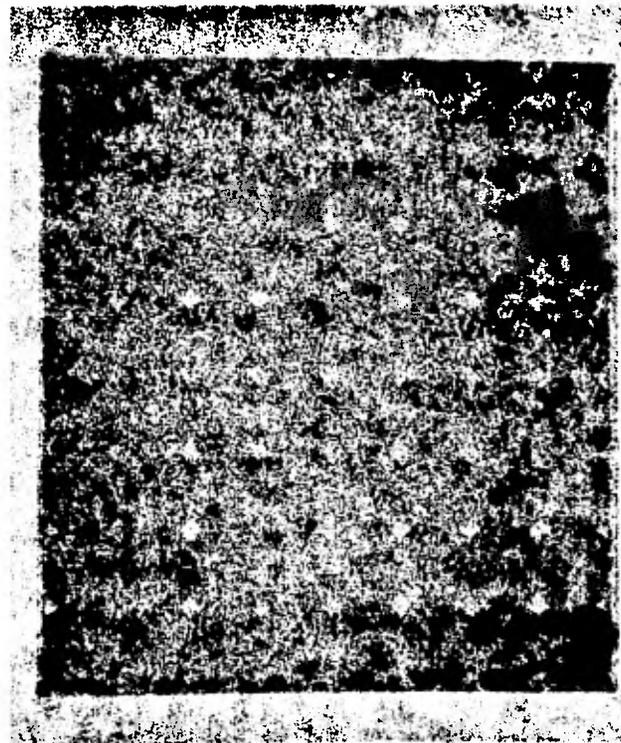


Figura III.5.1,3. Pánel "Solarvoltaic".

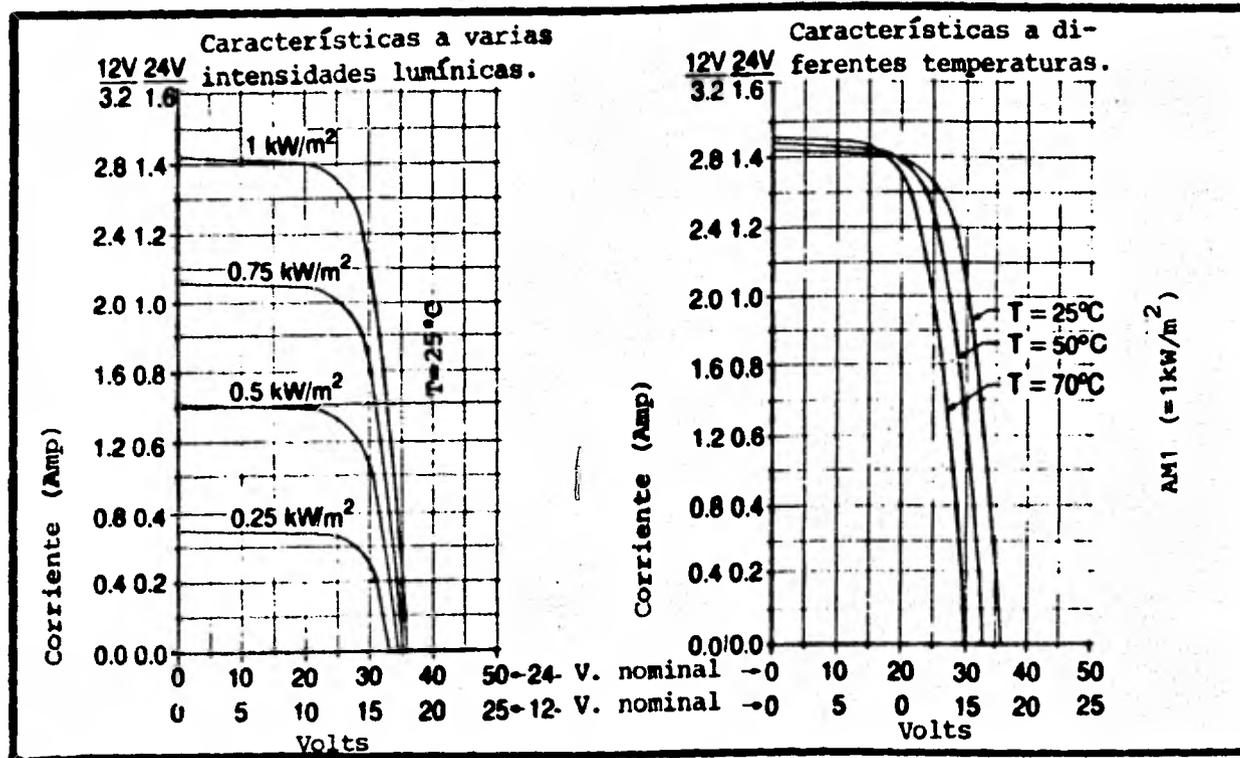


Figura III.5.1,4. Curvas caracterfsticas del pánel "Solarvoltaic".

Tipo	Watts (pico)	V (oc)	V (nom)	Amps (V nom)
435	6.0			0.40
1480	10.0			0.65
4200CG	21.0	20	14	1.40
4200J/JG	22.0			1.50
4300J/JG	36.0			2.30
9200J	25.0	23	16	1.50
220	2.5			0.18
127M	9.0	18	12	0.65
155	0.9	3.3	2.0	
615	2.5	9.0	6.0	0.40

#### Páneles de Alta Densidad

HE51J/JG	34.0	20	14	2.15
HE60J/JG	37.0	20 6	14 6	2.56 6
		40	28	1.28

Características eléctricas de los principales páneles fabricados por "Solarex".

sistema fotovoltaico. En primer lugar, se tiene que conocer la luz solar disponible en el sitio seleccionado y cómo varía con las estaciones del año, lo que permitirá calcular el tamaño del generador fotovoltaico, es decir, el número necesario de paneles para suministrar la potencia requerida.

En segundo lugar, se deben conocer las características de las cargas a alimentar, tales como la corriente promedio requerida y el ciclo de trabajo, lo que permitirá determinar la capacidad de las baterías de almacenamiento que será necesaria para mantener la operación del sistema cuando la luz solar no está disponible.

Es fácil determinar la luz solar disponible en la tierra en prácticamente cualquier localidad, ya que las agencias interesadas en la agricultura y en la meteorología han estado registrando este dato por varios años. Usualmente, estos registros pueden utilizarse para determinar el número de celdas solares requerido para cualquier aplicación específica.

Pero debe tenerse cuidado al emplear estos datos porque pueden no ser aplicables directamente a una instalación fotovoltaica. El primer problema es que la luz solar se registra normalmente en términos de una unidad denominada "langley", la cual es equivalente a 11.62 watts-hora/m<sup>2</sup>.

Si bien es sencillo convertir langleys a watts-hora, se debe tomar en cuenta otra consideración: la información publicada representa generalmente la luz solar que alcanza un metro cuadrado de la superficie de la tierra, es decir, la energía incidente en un plano horizontal.

Sin embargo, las celdas solares normalmente están inclinadas de manera que intercepten la máxima cantidad de energía a través

de todo el año, por lo que entonces el arreglo de celdas inclinadas recibirá una mayor cantidad de energía que una superficie equivalente horizontal.

Una medida mucho más útil de la radiación solar es la que expresa el número de "horas equivalentes promedio de sol por día" para una localidad en particular: una hora equivalente de sol es una hora de luz solar a su intensidad máxima típica,  $1 \text{ kW/m}^2$ , por lo que entonces, 12 horas de luz solar con una intensidad promedio de  $0.4 \text{ kW/m}^2$  equivalen a  $0.4 \times 12 = 4.8$  horas equivalentes de sol. En la figura III.5.2,1

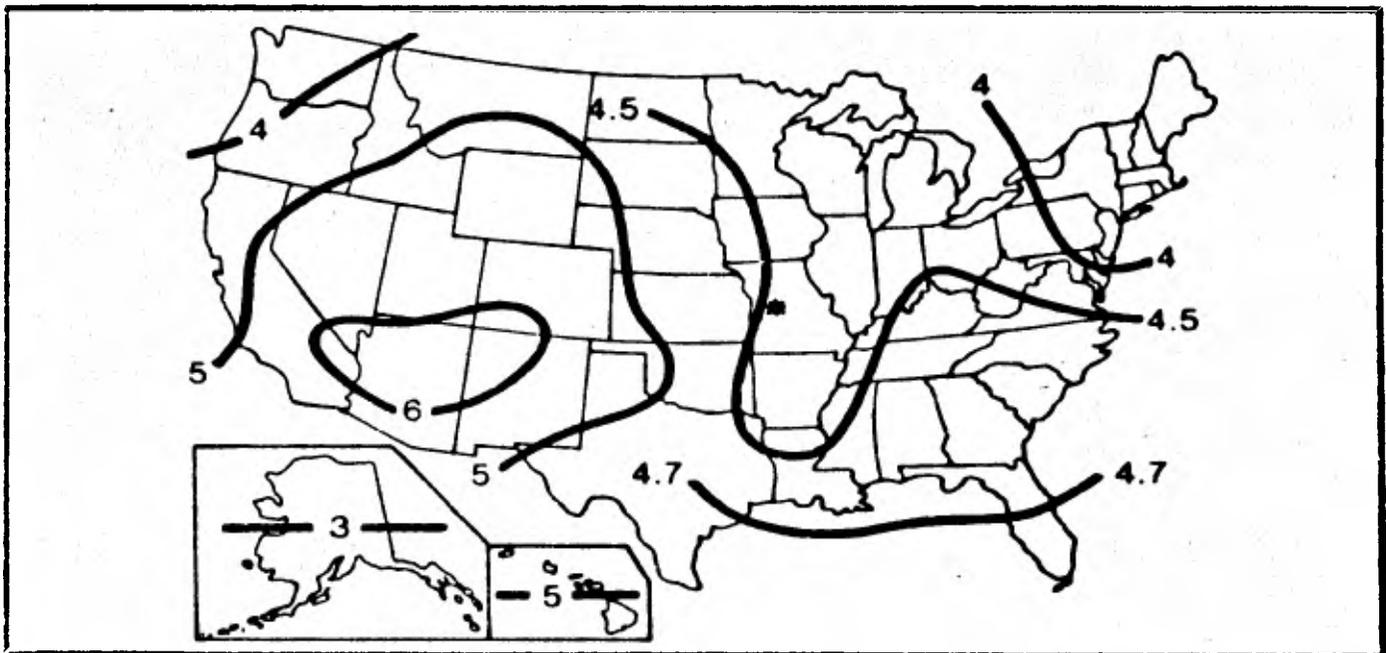


Figura III.5.2,1

se muestra un mapa que contiene estos registros, en el que los números representan promedios anuales, pero serán algo menores durante los periodos en los que la luz solar disminuya.

Por su parte, la figura III.5.2,2 muestra un mapa en el que las cantidades representan las "horas equivalentes promedio de sol por día", pero sobre un "período de cuatro semanas", desde diciembre 7 hasta enero 4, y en donde puede notarse que las cantidades son algo menores que las de la figura anteriormente mencionada.

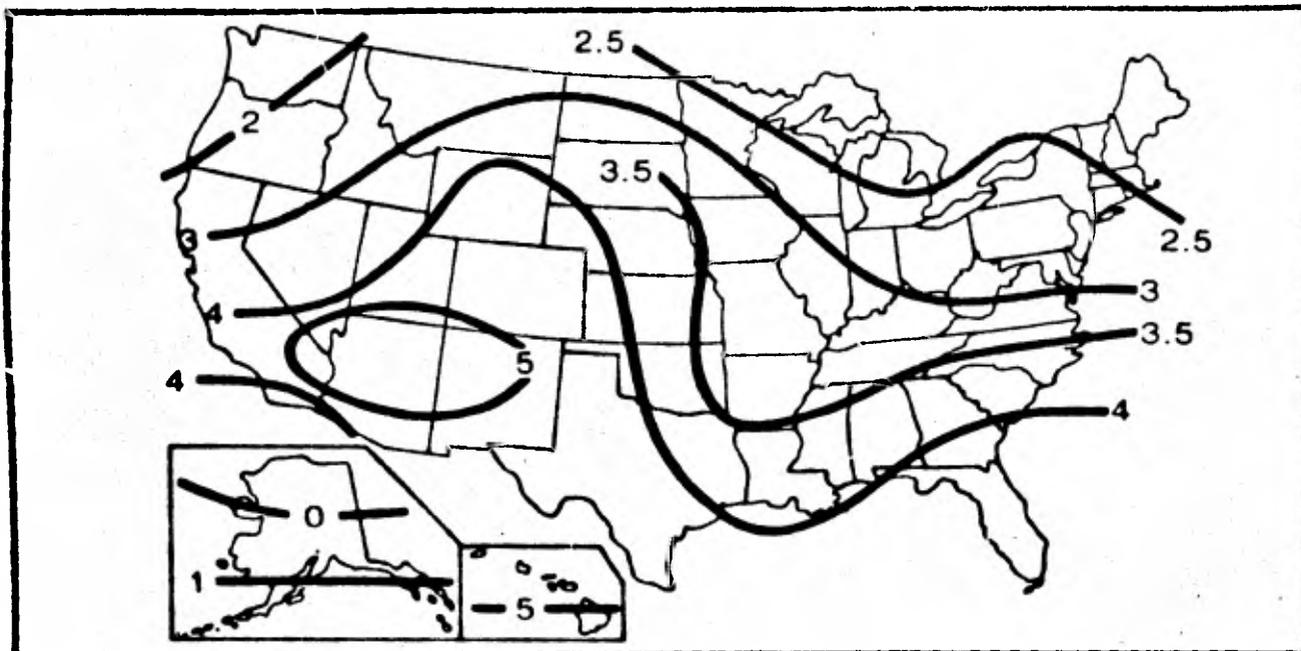


Figura III.5.2,2

En ambas figuras se ha asumido que las celdas solares estarán libres de cualquier sombra durante el día, ya que ésta es la forma preferida de instalar un sistema fotovoltaico. Sin embargo, habrá algunos lugares en que no sea práctico encontrar un sitio para montar el arreglo solar en donde no reciba ninguna clase de sombra, a menos por una parte del día; en tales condiciones, generalmente se requiere de un mayor número de celdas solares para proveer la potencia requerida.

Por lo que respecta a los requerimientos de la carga, el consumo de potencia de un dispositivo eléctrico normalmente está especificado en watts, el que, por supuesto, representa la tasa a la cual el dispositivo consume energía eléctrica, mientras que los requerimientos diarios totales de energía están especificados en watts-hora (ó kilowatts-hora).

Se ha visto anteriormente que el voltaje de salida de una celda solar es prácticamente constante; asimismo, en la mayoría de los sistemas se incluyen baterías de almacenamiento de energía que también tienden a proporcionar un voltaje de salida constante. Por estas razones, es más conveniente especificar el consumo de potencia de un dispositivo eléctrico en términos de amperes, por lo que en este caso los requerimientos diarios de energía estarán dados en amperes-hora.

Al establecer los requerimientos de energía de esta manera, se puede determinar muy fácilmente el número de paneles del generador solar requerido por una carga en particular.

Si la carga es un dispositivo que consume potencia a corriente constante, el problema es muy fácil de solucionar. Supóngase, por ejemplo, que se desea utilizar la energía solar para operar un reloj eléctrico por el que circula una corriente de 20 mAmp; la corriente de la carga es simplemente 0.02 amperes y el requerimiento diario (24 horas) energía en amperes-hora será sencillamente:

$$0.02 \times 24 = 0.48 \text{ amperes-hora}$$

Sin embargo, la mayoría de las cargas que se desearía alimentar con un generador fotovoltaico no consumen potencia a corriente constante; por ejemplo, una estación retransmisora de radio consume mucha más corriente cuando está transmitiendo que cuando está reci-

biendo señales. Pero por supuesto, los requerimientos variables de corriente y voltaje para diferentes aplicaciones no son problema - porque las celdas solares pueden conectarse en cualquier configuración serie-paralelo para proveer de la corriente y del voltaje necesarios.

La manera más fácil de determinar la corriente promedio, así como la carga diaria total en amperes-hora, es efectuar una tabulación de la corriente consumida en diversas horas de un período de 24, como se muestra en el ejemplo siguiente:

Se tiene una estación retransmisora de radio localizada en la cima de una remota montaña, desde donde su antena provee de una -- buena cobertura. Como el área se encuentra muy alejada de cualquier línea de transmisión, se desea alimentar dicha estación con un generador fotovoltaico, utilizando los siguientes datos: cuando la estación está transmitiendo consume una corriente de 5 amp, mientras que cuando está en reposo consume alrededor de 1 amp. Un estudio de este sistema muestra que solo se transmite aproximadamente el 10% del tiempo durante un período de 24 horas.

Conocido lo anterior, se pueden determinar los amperes-hora - requeridos para un período de 24 horas haciendo simplemente:

En la transmisión:  $5 \times 0.10 \times 24 = 12$  amps-hora

En reposo:  $1 \times 0.90 \times 24 = 21.6$  amps-hora

De esta manera tan sencilla se puede preparar una tabulación - semejante para cualquier tipo de carga; una vez conocidos éstos, - se puede determinar el número de paneles requeridos por el generador fotovoltaico.

### III.5.3. CALCULO ESTIMADO DEL SISTEMA

Actualmente se cuenta con diversas técnicas para estimar el tamaño del sistema fotovoltaico requerido para una aplicación específica, las cuales cuantifican las ineludibles variaciones de la radiación solar, que a su vez son influenciadas por factores tales como la estación del año, la latitud y el clima locales.

Una de estas técnicas, propuesta por la firma "Solarex" mencionada anteriormente, utiliza los datos ó los mapas de radiación solar (desarrollados por la misma firma) que expresan la insolación diaria en términos de las horas equivalentes de sol.

El primer paso para determinar aproximadamente el tamaño del sistema por medio de esta técnica, es encontrar las horas equivalentes de sol locales, utilizando ya sea un mapa promediado sobre un período de 4 semanas, si se debe diseñar para el "peor caso" (operación de invierno), ó un mapa con datos promediados sobre un período anual, si la operación segura en invierno no es prioritaria.

En segundo lugar, se determina la demanda diaria promedio de la carga en amperes-hora, agregando un 20% de margen de seguridad para compensar las inevitables pérdidas del sistema, condiciones climáticas desfavorables y prolongadas, etc.

Con estos datos, se puede calcular la corriente requerida del generador fotovoltaico por medio de:

$$\frac{\text{Demanda diaria promedio}}{\text{Horas equivalentes de sol}} \times 1.20 \qquad \text{III.5.3.1}$$

Posteriormente, refiriéndose a las especificaciones respectivas, se selecciona el tipo de pánel con el voltaje apropiado; en sistemas que utilizan circuitos de control y baterías de almacenamiento, la experiencia ha demostrado que el voltaje nominal del pánel -

debe ser ligeramente mayor que el voltaje nominal de la batería. Por ejemplo, en sistemas que utilicen baterías de 12 volts, es conveniente utilizar paneles de 14 volts nominales.

Finalmente, el número necesario de paneles solares para proveer los amperes requeridos, se determina simplemente dividiendo esta corriente entre la corriente de salida de cada panel individual es decir:

$$\text{Número de paneles} = \frac{\text{Corriente requerida}}{\text{Corriente por panel}} \quad \text{III.5.3,2}$$

Como ejemplo ilustrativo del uso de estas ecuaciones, considere el caso práctico de una estación radiorepetidora instalada en Kansas City, E.E.U.U.; dicha estación opera continuamente, 24 horas por día, y consume una corriente promedio de 2 amperes. Refiriéndose a la figura III.5.2,1, se ve que esta región (marcada con\*) cuenta con 4.5 horas-pico de sol en promedio por día, y se tiene entonces:

$$\text{amperes requeridos} = \frac{2 \times 24}{4.5} = 12.8$$

El voltaje nominal de operación de la repetidora es de 12.8 volts, de manera que los paneles solares se utilicen para mantener la carga de una batería de 12 volts. Se ha encontrado experimentalmente que un generador fotovoltaico con un voltaje terminal nominal de 14 volts es el adecuado para tal aplicación; entonces, el "Unipanel tipo 4200" de "Solarex", que tiene una corriente de 1.3 amp a un voltaje terminal nominal de 14 volts, fue seleccionado como el elemento básico del arreglo solar, el cual consistirá de:

$$\frac{12.8}{1.3} = 9.8 \text{ paneles}$$

En la práctica, este resultado fue redondeado y el generador

fotovoltaico de este sistema consiste de 10 "Unipáneles tipo 4200" de "Solarex" conectados en paralelo.

Si la repetidora consumiera la misma corriente, pero estuviera operada a 24 volts, se hubiera tenido que emplear otro arreglo de 10 páneles en paralelo conectado en serie al anterior. Esto nos hubiera dado un voltaje terminal nominal de 28 volts, el cual se ha encontrado como el más adecuado para utilizarse con baterías de 24 volts.

Ahora bien, para nuestro caso particular, se considera un mínimo de aparatos domésticos necesario para el confort de los inquilinos, tal como lavadora, refrigerador, aparato modular de sonido, - televisión de circuitos integrados y alumbrado (fluorescente por su menor consumo de energía), cuyo requerimiento de potencia fue - redondeado a 1000 watts.

Como se verá en el capítulo siguiente, se tiene un circuito inversor para convertir la corriente directa de los páneles solares a corriente alterna para alimentar la carga anteriormente mencionada. Considerando que este inversor tiene una eficiencia del - 90%, requerirá entonces de 1110 watts de potencia de entrada, y -- por sus características de diseño se le fijó un voltaje de entrada de 100 volts, lo cual involucra una corriente de 11 amperes.

Tomando en cuenta lo anterior, así como las características de los páneles, se determina el número de ellos que es necesario - para obtener la potencia mencionada.

Refiriéndose a las especificaciones de los páneles "Solarex", se selecciona el tipo "HE60J/JG" de alta densidad a un voltaje nominal de operación de 28 volts y a una corriente de 1.28 Amp., por

lo que se tendrá:

$$\text{En serie .- } \frac{100V}{28V} = 3.57 \text{ ó } 4 \text{ p\u00e1neles}$$

$$\text{En paralelo- } \frac{11 \text{ amp.}}{1.28 \text{ amp.}} = 8.59 \text{ ó } 9 \text{ p\u00e1neles}$$

Las dimensiones de cada p\u00e1nel son 0.55 x 0.625 mts., por lo que entonces el arreglo colector estar\u00e1 formado por 36 p\u00e1neles y abarcar\u00e1 un \u00e1rea de 12.3 mts<sup>2</sup>.

### III.6. BATERIAS RECARGABLES

Una batería recargable es un dispositivo en el cual la -- la energía eléctrica puede ser convertida en energía química, al macenándose en esta forma de energía y siendo reconvertida en -- energía eléctrica para su uso.

Las baterías están formadas por un conjunto de celdas conectadas en serie para obtener el voltaje deseado, las cuales se llaman celdas recargables.

Para una celda con una alta eficiencia, la energía química almacenada cuando se carga la misma, deberá ser similar a la entrada eléctrica, y la energía eléctrica entregada cuando se descarga, deberá ser similar a la energía química transformada en la celda. En otras palabras, el proceso electroquímico deberá -- ser lo más reversible posible.

Una de las baterías que más se han usado hasta la fecha es la Plomo-Acido, la cual es extensamente recomendada para emplear se en sistemas fotovoltaicos. En estos sistemas, las baterías almacenan energía eléctrica proveniente del banco de fotoceldas.

Una celda recargable consiste esencialmente de un contenedor, en el cual dos placas de plomo están sumergidas, separadas una de la otra, en una solución de ácido sulfúrico y agua, con una gravedad específica de aproximadamente 1.2

Si una corriente directa se hace pasar de una placa a otra a través de la solución ácido-agua, ciertos cambios químicos se llevan a cabo en dicha celda.

En la superficie de la placa positiva, plomo metálico es -- cambiado a peróxido de plomo, mientras que en la superficie de --

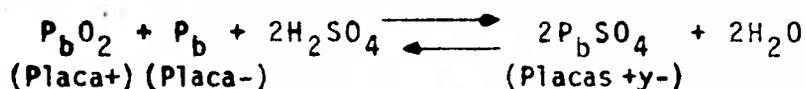
la placa negativa, plomo metálico sólido es convertido en plomo suave esponjoso. Burbujas de hidrógeno se desprenden de las placas, especialmente de la placa negativa.

Lo anterior tiene lugar únicamente en la superficie de las placas y cesa cuando el plomo en contacto con la solución, ha sido totalmente convertido, quedando la celda cargada con un voltaje aproximado de 2 volts. Si en el momento anterior, cuando la celda está totalmente cargada, se conecta una resistencia entre los bornes de la misma, la batería empezará a descargarse.

En el proceso de descarga, el peróxido de plomo de la placa positiva y el plomo esponjado de la placa negativa empezarán a convertirse en sulfato de Plomo. En adición a lo anterior se formará agua en el electrolito y la gravedad específica del ácido será baja.

La celda descrita anteriormente tiene poca capacidad, y esto es debido a la pequeña cantidad de material activo en contacto con el electrolito, pero mediante repetidas cargas y descargas de la celda la penetración del electrolito a las placas se hace mayor aumentando la capacidad de la celda.

La reacción final reversible que se efectúa en la celda -- cuando ésta se carga y se descarga se representa en la ecuación:



El término de la derecha en la ecuación anterior representa la carga de la celda y el de la izquierda la descarga de la misma.

La capacidad de una batería recargable esta en función de

los Amperes-hora que puede entregar continuamente por un tiempo determinado antes de que el voltaje de salida empiece a decaer de cierto valor mínimo. Este valor mínimo depende del tipo de Baterías y del fabricante.

Para baterías estacionarias, la capacidad está basada usualmente en proporción a 8 horas de descarga y para baterías de vehículos en una proporción a 6 horas de descarga.

Por ejemplo, una batería de 320 Amp-h cuyo tiempo de descarga es de 8 horas, entregará 40 Amperes continuamente en el tiempo mencionado, antes que el voltaje mínimo sea alcanzado (aproximadamente 1.75 volts). Si la descarga se disminuye a 3 horas, el tiempo de salida de corriente se aumentará a 80 Amperes, es decir, la capacidad se verá reducida a 240 Amp-h y así sucesivamente.

La tabla adjunta muestra el decremento de la capacidad de las baterías al disminuir el tiempo de descarga y aumentar la corriente de salida.

TABLA DE CAPACIDADES PARA UNA BATERIA ESTACIONARIA

Tiempo de descarga	Amperes	Amperes-hora	Voltaje mínimo
8 horas	40	320	1.75
3 horas	80	240	1.75
1 hora	160	160	1.75
1 minuto	400	6.7	1.75

Las baterías de plomo-ácido tienen grandes capacidades de sobrecarga. En baterías de vehículos, en particular, grandes capacidades de sobrecarga son requeridas en el momento del arranque.

La eficiencia de las baterías disminuye también para grandes sobrecargas, esto es, la eficiencia es del 50 al 65 por ciento, para descargas moderadas la eficiencia es del 70 al 75 por ciento y para descargas lentas la eficiencia es arriba del 80 por ciento.

La figura III.6,1 muestra las curvas de descarga de una celda de plomo-ácido.

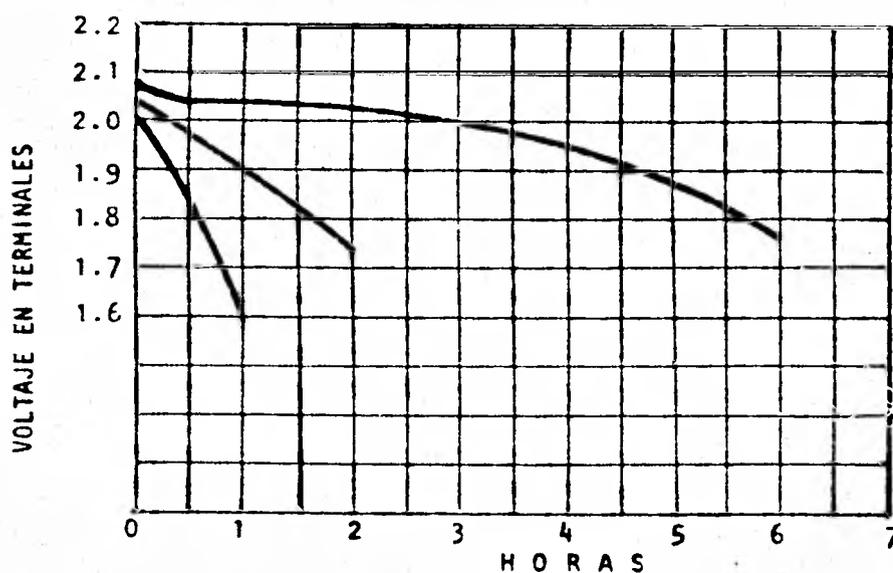


figura III.6,1. Curva de descarga de la celda plomo-ácido.

La carga de las baterías se llevará a cabo conectando la salida de los paneles a los bornes de las mismas, es decir, la terminal positiva de las fotoceldas al borne positivo del banco de baterías y lo mismo con las respectivas terminales negativas de los paneles y banco de baterías. Para evitar una circulación de corriente del banco de baterías, los paneles se conectan un diodo de bloqueo.

Para que el banco de baterías se pueda cargar se requiere de

2.2 a 3 volts por celda, esto es, para cada acumulador se requerirá un voltaje de 13.2 a 18 volts, el cual será entregado por los paneles fotovoltaicos.

Una curva de carga a voltaje constante es mostrado en la figura III.6,2.

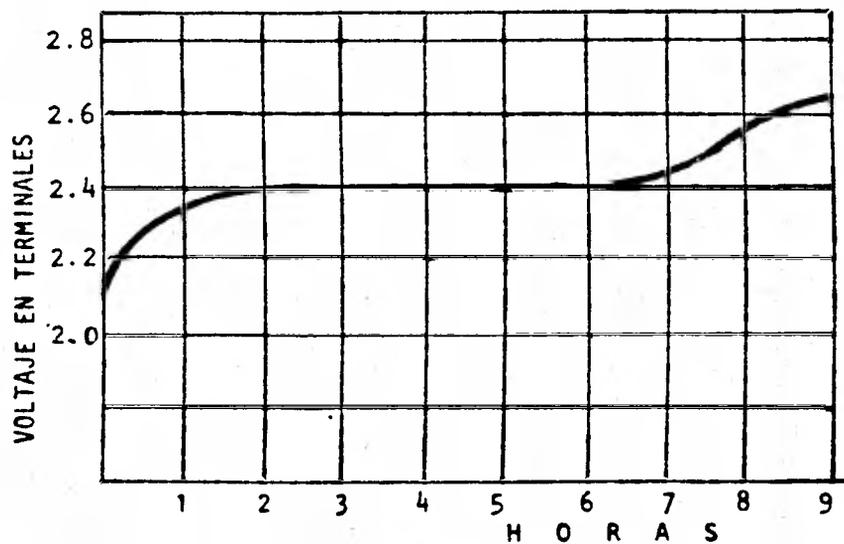
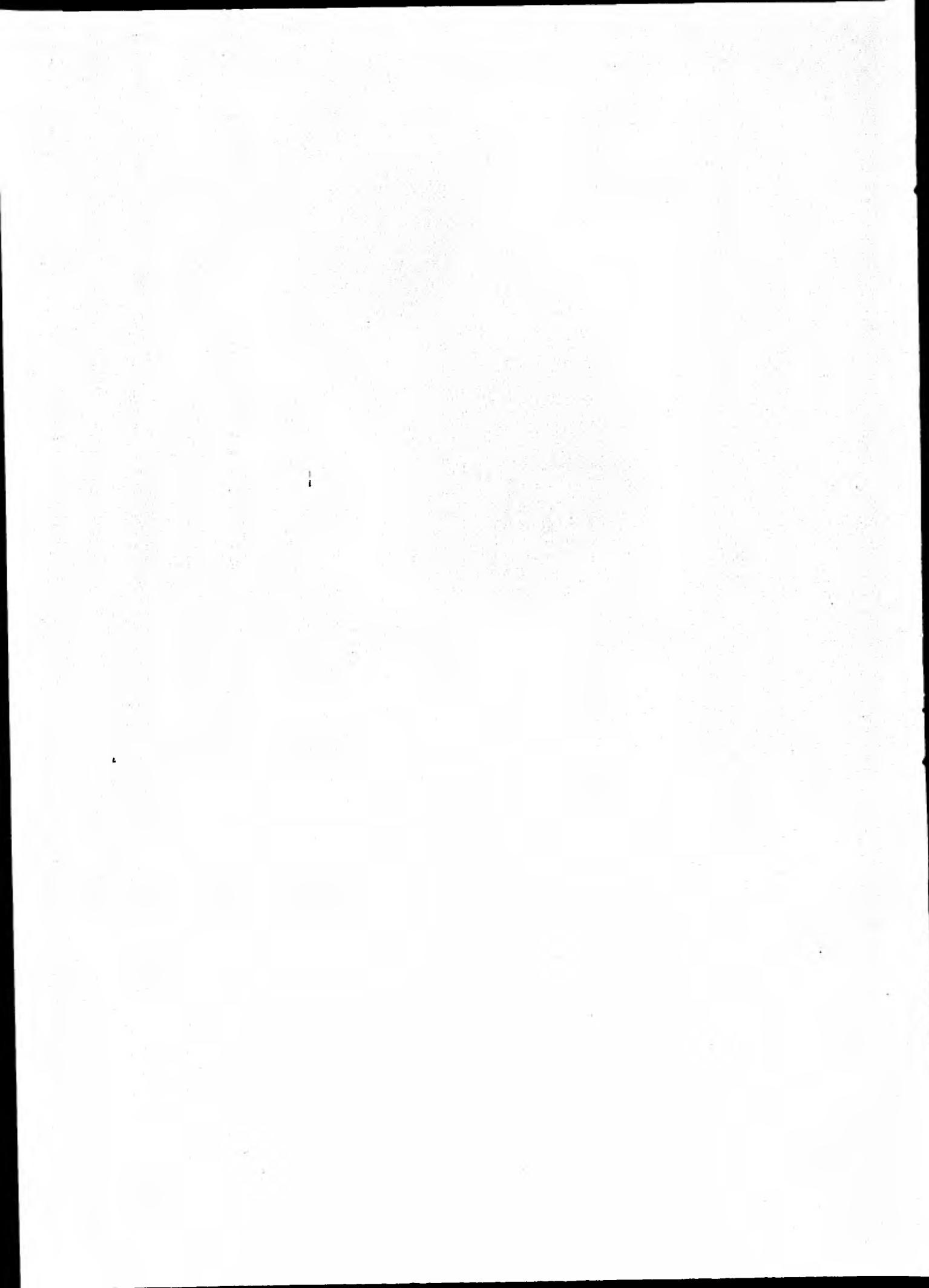


Figura III.6,2. Curva de recarga de una celda plomo-ácido con corriente constante.

De lo anteriormente expuesto se requerirán 8 baterías de tipo automóvil para el almacenamiento de energía eléctrica, las cuales a voltaje nominal tendrán 96 volts en total y serán cargadas con un voltaje de 100 a 112 volts provenientes de las fotoceldas.



C O N V E R S I O N   D E   C O R R I E N T E  
D I R E C T A   E N   A L T E R N A

---

#### IV.1.1 TIRISTORES O SEMICONDUCTORES CONTROLADOS DE SILICIO

El semiconductor controlado de silicio SCR (semiconductor controlado rectifier), que también es llamado tiristor, es un conmutador casi ideal, rectificador y amplificador a la vez. Con el descubrimiento de los semiconductores, el tiristor vino a desplazar la válvula de vacío tiratrón y se ha impuesto en campos tales como -- los de la conmutación pura y simple, la variación de la velocidad de motores de corriente directa, graduación de la luz, graduación de la temperatura, así como en el caso especial para los inversores en la conmutación forzada.

Su característica principal es la de permanecer normalmente -- bloqueado hasta el momento en que se le hace conducir por diversas formas, entre las cuales son: por medio del efecto avalancha, o -- de la forma más común de utilización que es actuando sobre su electrodo de control ó "gate". El tiristor puede gobernarse a voluntad y con mucha precisión, permitiendo ésto determinar con exactitud -- los valores medios de corriente deseados.

En corriente alterna, el SCR presenta dos tipos de funcionamiento que son:

1. Bloqueando (efecto diodo) los semiciclos negativos y algunos positivos, como se muestra en la figura IV.1.1,1.a.
2. Bloqueando los semiciclos negativos y disparándose después del principio de cada semiciclo positivo (variándose el ángulo de

conducción). Cuando se opera de esta manera, se dispone solo de una parte de la potencia total, como se puede observar en la figura IV.1.1,1.b.

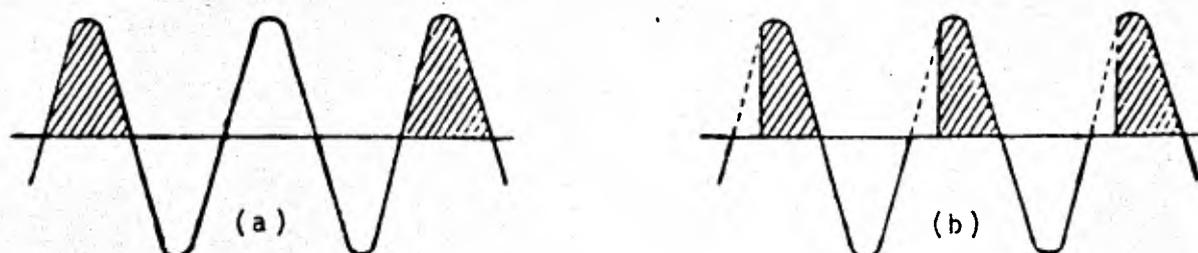


Figura IV.1.1,1. Funcionamiento en corriente alterna a) Bloqueando los semiciclos negativos y algunos positivos b) Bloqueando los negativos y variando el ángulo de conducción de positivos

En corriente directa, el SCR puede bloquear la conducción de corriente mediante el tipo de conmutación llamada forzada, lográndose esto conjuntamente con otros tipos de dispositivos, tales como capacitores y bobinas.

Lo anterior es mostrado en la figura IV.1.1,2.

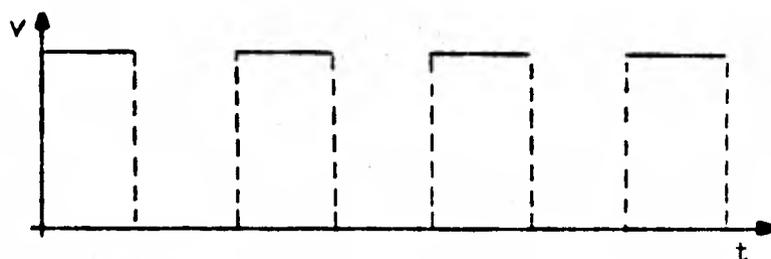


Figura IV.1.1,2. Funcionamiento en corriente directa del SCR.

El SCR es una estructura del tipo P-N-P-N, pudiendo ser visualizado en mejor forma como un arreglo de dos transistores (uno PNP y el otro NPN), interconectados de tal manera que forman un par de transistores con retroalimentación regenerativa.

La figura IV.1.1,3. muestra el arreglo mencionado anteriormente, indicándose las corrientes correspondientes.

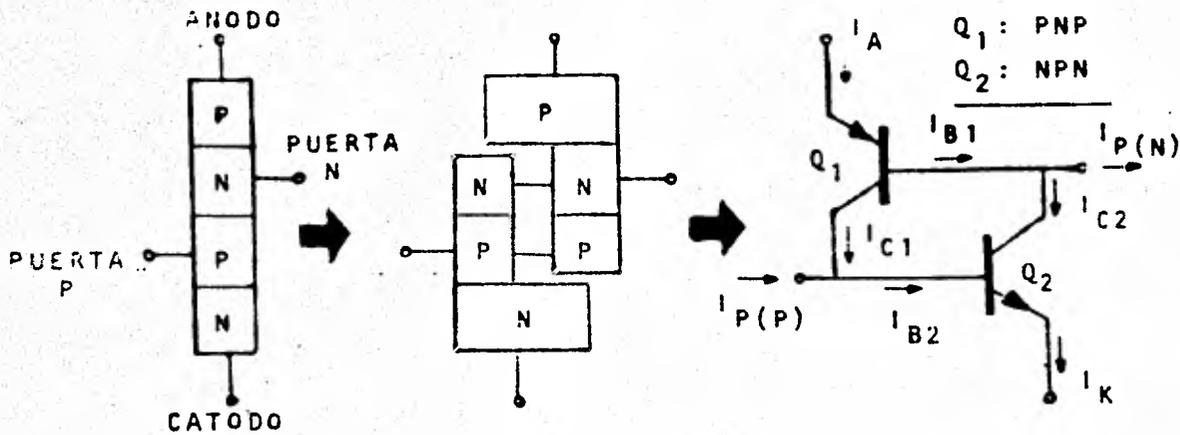


Figura IV.1.1,3 Analogía de un SCR con dos transistores.

Se dice que es una retroalimentación regenerativa por que al introducir una corriente pequeña a la puerta (gate) o base del transistor  $T_2$ , éste la amplifica y la dirige a la base del transistor  $T_1$ , el cual la amplifica de nuevo y la regresa a la base de  $T_2$ , creándose una trayectoria cerrada de corriente amplificada sucesivamente, la que provoca la saturación de los transistores. Esto permite un flujo de corriente considerable de ánodo a cátodo, limitada únicamente por la impedancia de carga. Esto ocurre en pequeñas fracciones de segundo (alrededor de un microsegundo).

El símbolo del tiristor es mostrado en la figura IV.1.1,4 indicándose el ánodo, cátodo y puerta o gate.

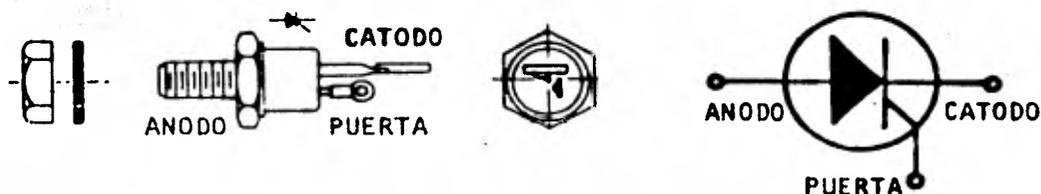


Figura IV.1.1,4. Forma física y símbolo del SCR.

Las dos terminales principales son el ánodo y el cátodo y la-

terminal de control que es la puerta (del inglés gate).

Una vez aplicada una señal de mando a la puerta, el dispositivo permite una circulación de corriente en forma unidireccional, de ahí el nombre de rectificador controlado de silicio SCR.

Las funciones de los SCR's o tiristores son las siguientes:

- a) RECTIFICACION.- Aprovecha la propiedad de funcionamiento unidireccional, es decir, realiza las funciones de un diodo.
- b) INTERRUPCION DE CORRIENTE .- Como interruptor el tiristor puede reemplazar a los dispositivos mecánicos.
- c) REGULACION .- La posibilidad de ajustar el tiempo requerido de cebado, permitiendo ésto emplearlo para regular la potencia o la corriente media de salida.
- d) AMPLIFICACION.- Como la corriente de mando es mucho menor que la corriente principal, existe un fenómeno de amplificación de corriente o de potencia. En algunos casos esta ganancia es de utilidad.

La figura IV.1.1,5 muestra algunos tiristores de diferentes capacidades.

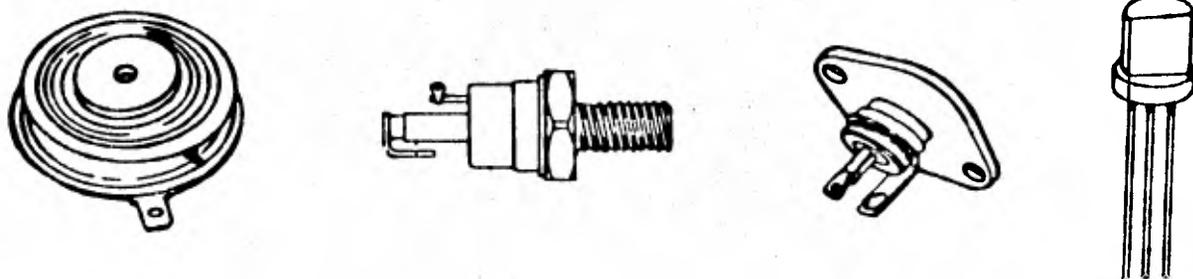


Figura IV.1.1,5. Tiristores de diferentes capacidades.

#### IV.1.2. METODOS DE DISPARO DEL SCR (tiristor)

Como se planteó al principio de este capítulo, para pasar del estado de bloqueo al de conducción es necesario aumentar la corriente del dispositivo. Por lo tanto un método de disparo será todo aquél que produzca un aumento en la corriente del dispositivo, de los cuales los más importantes son;

- a) VOLTAJE .- El aumento del voltaje ánodo-cátodo produce un aumento en la corriente de fuga hasta un punto donde se provoca una conducción repentina de corriente y la disminución de voltaje entre cátodo y ánodo. Este tipo de disparo es utilizado para diodos de cuatro capas o Diacs.
- b) DERIVADA DEL VOLTAJE .- Una unión P-N presenta una cierta capacidad "C", la cual ante un aumento brusco del voltaje ánodo-cátodo del SCR se carga con una corriente  $I = C \frac{dV}{dt}$ . Si esta corriente es suficientemente elevada el SCR se dispara.
- c) TEMPERATURA .- En un transistor de silicio la corriente de fuga se duplica aproximadamente cada ocho grados centígrados de aumento de temperatura. El tiristor en este caso también se puede disparar.
- d) EFECTO TRANSISTOR .- Esta es la clásica forma de gobernar un-

tiristor; se inyecta una corriente a la puerta del tiristor y ocurre una regeneración en el modo convencional, como anteriormente se mostró al explicar el tiristor como un arreglo de dos transistores.

#### e) ENERGIA RADIAN

TE.

.- (Efecto fotoeléctrico). Los rayos luminosos penetran en la estructura cristalina provocando un aumento en la corriente -- del dispositivo semiconductor, cuando ésta llega a un nivel dado, produce el disparo del SCR. Esta forma de disparo hace posible que los tiristores puedan ser -- activados por luz. El prototipo de esta clase especial de tiristores accionados por luz son los fototiristores llamados LAR's, los cuales tienen una ventana en la región de puerta (es un lente cristalino que permite la entrada de luz).

#### IV.1.3 CARACTERISTICAS DEL TIRISTOR.

Para un buen entendimiento de lo que es un tiristor, se pueden dividir sus características en:

- a) Características estáticas.
- b) Características de mando.
- c) Características dinámicas.
- d) Características térmicas.

a) Características Estáticas:

Estas características son independientes del circuito de mando, de tal manera que no interviene en la definición de las mismas, la corriente de puerta.

En la figura IV.1.3,1 se representa la característica principal del tiristor.

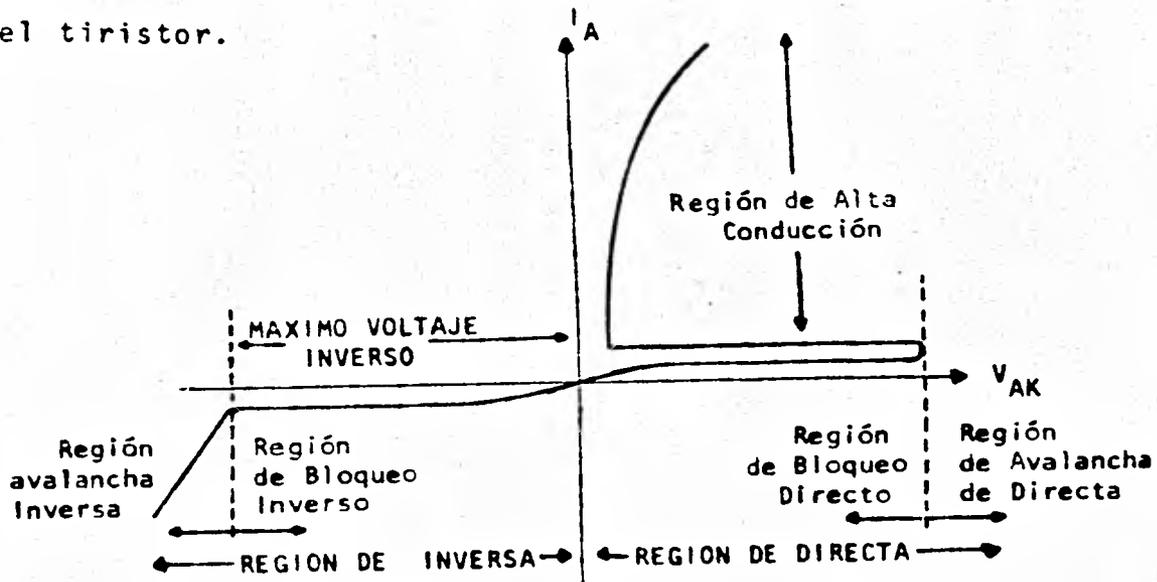


Figura IV.1.3,1. Característica estática del SCR ó tiristor.

De la figura anterior se observa que cuando el voltaje ánodo-cátodo es cero, la corriente también lo es.

Al crecimiento del voltaje en sentido de la región directa se le designa con el nombre de  $V_F$  (del inglés forward) y al voltaje de sentido inverso se le designa con el nombre de  $V_R$  (del inglés reverse.).

En la zona de bloqueo directo, a medida de que se incrementa el voltaje directo, la corriente de fuga no se incrementa en la misma medida, hasta que se alcanza el punto de ruptura de no conducción -- por efecto avalanche. En este punto la corriente de fuga se incrementa rápidamente hasta que el dispositivo presenta una total conduc---

ción (presenta una resistencia de muy bajo valor). La alta conducción se mantiene con la previsión de que la corriente de ánodo se mantenga por arriba de un mínimo llamado corriente de mantenimiento. Cuando ésto no ocurre, el dispositivo entra en la zona de bloqueo directo, incrementándose el voltaje ánodo-cátodo, cortándose la conducción de corriente.

En la zona de bloque inverso, el dispositivo presenta una característica análoga a la de un diodo convencional de silicio.

Al aplicar un voltaje inverso al dispositivo, se observa la existencia de una débil corriente de fuga inversa  $I_R$  (del inglés reverse). Este valor de corriente de fuga se mantiene constante a medida que el valor del voltaje inverso se incrementa, hasta llegar a un punto en el cual la corriente alcanza valores elevados en forma brusca provocando la destrucción del dispositivo. Tal situación se alcanza para un valor de voltaje inverso llamado voltaje inverso máximo  $V_{RM}$  (del inglés maximum reverse voltage).

Para valores nominales de operación el voltaje del dispositivo no debe sobrepasar este voltaje máximo, no obstante en algunas ocasiones como son las provocadas por un transitorio, el dispositivo puede alcanzar el voltaje máximo por fracciones de segundo, llamándose voltaje accidental  $V_{RSM}$  (del inglés maximum reverse surge voltage). De lo anterior se puede deducir claramente que el tiristor es solo conductor en el primer cuadrante.

Hasta ahora se ha considerado una forma de disparo del tiristor que es por aumento de la tensión ánodo-cátodo. La operación típica de cebado consiste en la aplicación de un voltaje de polarización menor que el necesario para el disparo por efecto avalancha y

éste se aplica a la puerta del tiristor.

b) Características de mando.

Estas características están referidas al control del dispositivo y a su cebado o disparo. La característica más importante se refiere a la curva que relaciona el voltaje de puerta o gate y la corriente de la misma, la cual se presenta en la figura IV.1.3,2.

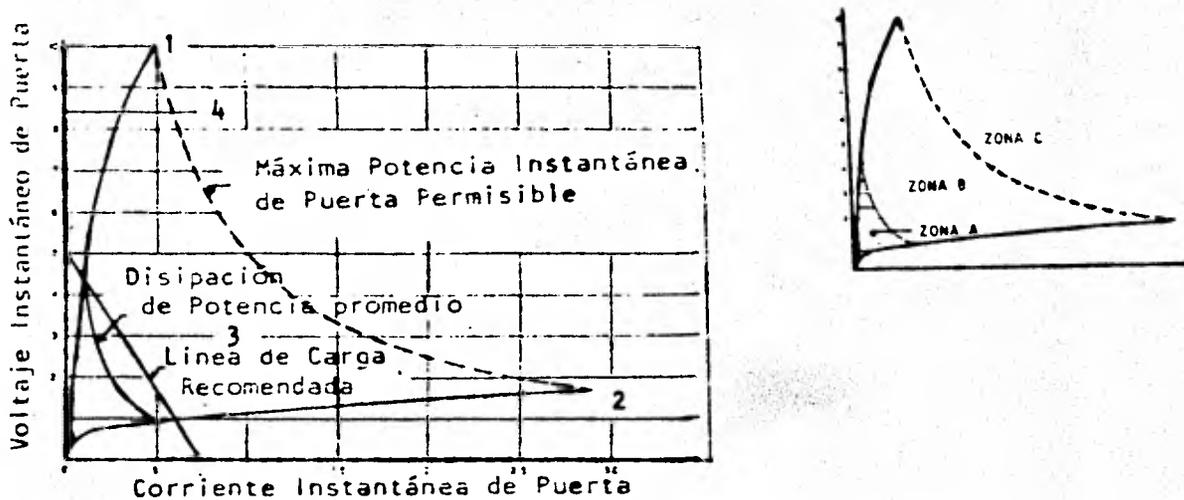


Figura IV.1.3,2. Característica de mando del SCR.

Debido a la dispersión, para una familia de tiristores, sus características de mando están comprendidas entre las dos curvas mostradas en la figura anterior, la superior para una resistencia máxima y la inferior para una resistencia mínima. La curva de resistencia máxima está señalada con el número 1, la curva de resistencia mínima está señalada con el número 2; el número 3 corresponde al lugar geométrico de los puntos tales que producen el disparo del dispositivo y cuya potencia es permisible. El número 4 corresponde a la recta del voltaje pico máximo admisible  $V_{GF}$ .

La zona de cebado de disparo preferente será la encerrada por

las cuatro curvas mencionadas encontrándose localizadas en el -- primer cuadrante. En el tercer cuadrante el voltaje de puerta no debe exceder los valores especificados por el fabricante.

De lo anterior es posible diferenciar 3 zonas en la gráfica de  $I_G - V_G$  que son:

- ZONA A                      Zona de disparo incierto. En esta zona el - disparo depende de la corriente de puerta y dicha zona disminuye con el aumento de tempe- ratura.
- ZONA B                      Zona de disparo seguro. Es la zona limitada por las cuatro curvas mencionadas anterior- mente, cualquier punto dentro de esta zona provoca el disparo del dispositivo.
- ZONA C                      Zona prohibida. En esta zona se encuentra - los puntos que pueden propiciar una posible destrucción del dispositivo.

La gráfica de la figura IV.1.3,3 muestra los efectos que produce en la curva característica  $V_{A-K} - I_A$  los disparos por - puerta con diferentes corrientes.

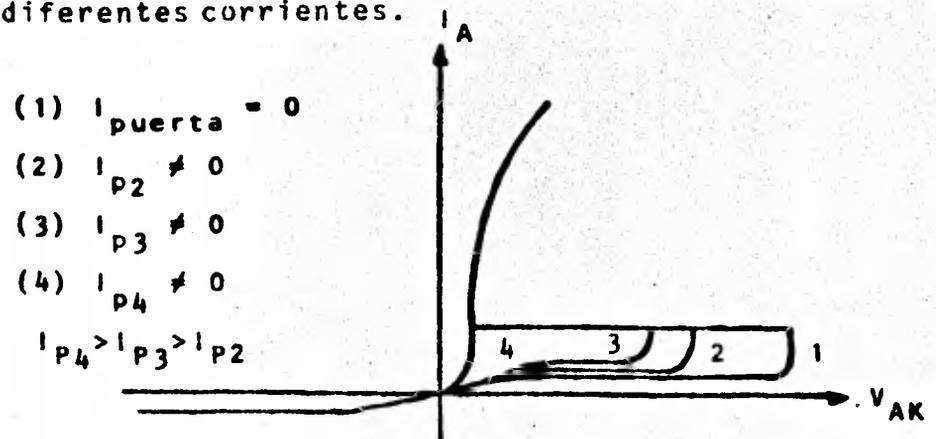


Figura IV.1.3,3. Efecto del control por puerta en la gráfica  $V_{A-K} - I_A$ .

## c) Características Dinámicas:

Estas características describen al dispositivo en funcionamiento. Podemos definir los siguientes parámetros:

## VOLTAJE INVERSO

## ACCIDENTAL

Se refiere al voltaje inverso que se puede presentar ocasionalmente entre ánodo y cátodo y que el dispositivo resiste sin sufrir daño, siempre y cuando no se repita en el ciclo subsecuente. Se representa como  $V_{FSM}$ .

## CORRIENTE DIRECTA

## ACCIDENTAL

## TAL

Es el máximo valor de la corriente ánodo-cátodo admisible que se puede presentar en forma accidental. Este valor es proporcionado por el fabricante. Se representa como  $I_{FSM}$ .

## CORRIENTE DE

## ENGANCHE

Es la corriente de ánodo mínima que provoca el paso de corriente por el tiristor, el cual pasa el estado de bloqueo al de conducción. Su valor es de dos a tres veces la corriente de mantenimiento. Se representa como  $I_L$ .

## CORRIENTE DE

## MANTENIMIENTO

Es la corriente mínima necesaria de ánodo que debe circular para mantener al dispo-

positivo en estado de conducción.

El voltaje de enganche y de mantenimiento son los correspondientes a las mismas corrientes sobre la gráfica característica.

Las corrientes que se manejan en un circuito anódico en régimen permanente pueden ser:

- a) De corriente continua
- b) De corriente alterna
- c) De forma pulsante arbitraria

A esto se le debe adicionar los transitorios que se presentan en el circuito.

La gráfica que se muestra la figura IV. 1. 3, 4 es necesaria para conocer la temperatura máxima de la carcasa para los circuitos de corrientes continua y alterna, de una, tres y seis fases, para cargas resistivas e inductivas entre 50 y 400 Hz.

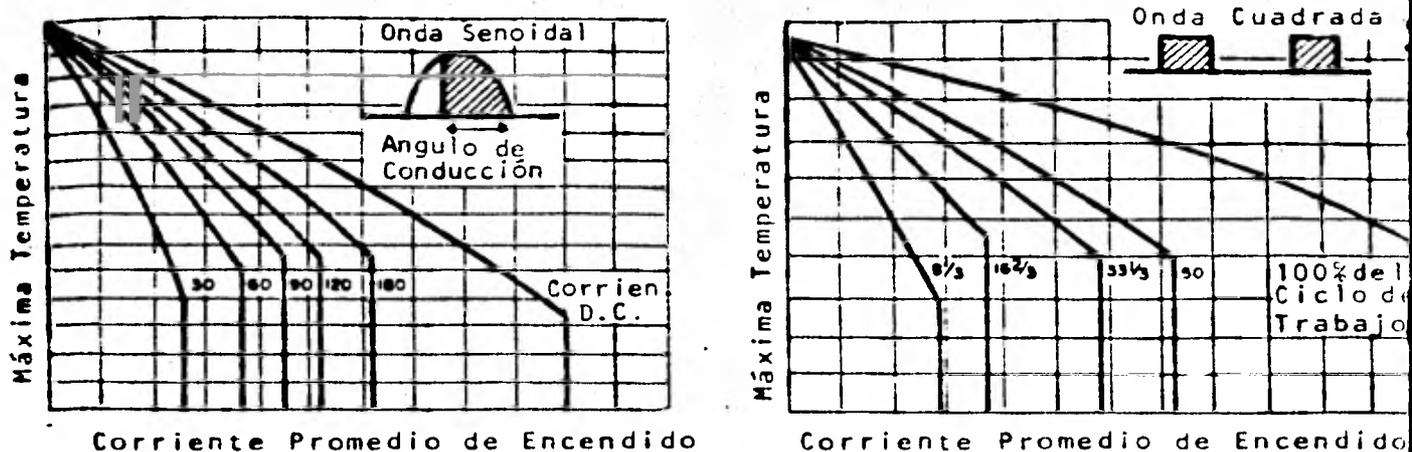


Figura IV.1.3,4. Gráficas para conocer la temperatura máxima de carcasa en función de la corriente promedio del estado de conducción o de encendido.

Estas curvas incluyen todos los efectos disipativos del dispositivo así como los de los elementos disipadores. Además, todas las curvas terminan aproximadamente en puntos que corresponden a iguales valores de corriente eficaz.

Régimen transitorio.- Cuando se presentan sobrecargas transitorias, no repetitivas, como podría ser el caso de un corto circuito, el dispositivo admite exceder la temperatura de las juntas por breves instantes.

En estos casos los valores permitidos de corriente se especifican de la siguiente forma:

- 1) La curva correspondiente a la figura IV.1.3,5.

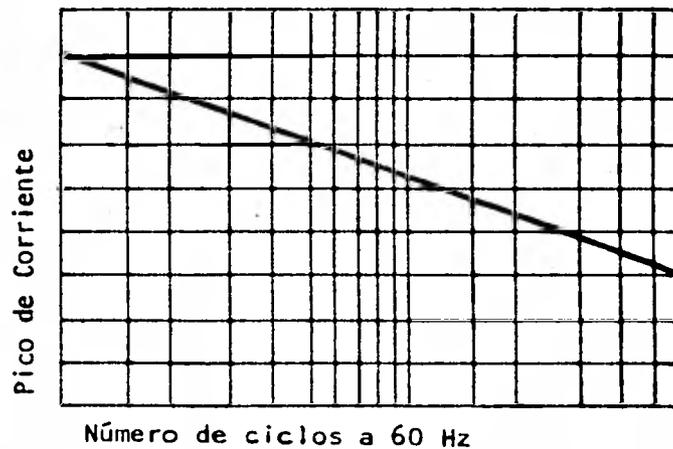


Figura IV.1.3,5. Pico de corriente accidental no repetitiva en función del número de ciclos.

Sobre el eje de las ordenadas se dan los valores de corriente rectificadora de pico en función del número de ciclos de la sobrecarga. La corriente máxima instantánea corresponde para un ciclo y coincide con la especificada por el vendedor.

2) Dando la capacidad de sobrecorriente ( $I_F^2 T$ ) la cual se aplica para duraciones de corrientes instantáneas menores que un período. Para tiempos tan breves, el tiristor se puede considerar como una resistencia con una capacidad térmica fija que no disipa al ambiente.

$I_F$  se expresa en amperes eficaces sobre el intervalo de tiempo T en segundos.

Límites de frecuencia. Según el tiempo de apertura o disparo los tiristores se dividen en:

- a) TIRISTORES LENTOS.- Considerable tiempo de disparo
- b) TIRISTORES RAPIDOS- Con un tiempo de disparo del orden de los 100 microsegundos; no exigen por sus condiciones de utilización (Red de 60 Hz) características especiales de apertura.

Rara vez, en el caso de los tiristores rápidos, la frecuencia supera a los 10,000 Hz. El hecho de trabajar en altas frecuencias impone fuertes variaciones a la  $\frac{dI}{dT}$ . La frecuencia de trabajo elevada conduce a que el dispositivo no esté en posición de disipar la cantidad de calor requerido para su funcionamiento normal, producido por la  $\frac{dI}{dT}$ , ya que no tiene tiempo para disipar esta energía.

Lo mencionado anteriormente aunado a las limitaciones en el tiempo de encendido, lleva a la disminución de la capacidad de conducción del dispositivo con el aumento de temperatura. Por lo tanto, un tiristor reduce su capacidad de conducción al aumentar la frecuencia de trabajo. Si opera a 50 HZ y 200 Amperes, a 500

HZ operará a 90 Amperes, a 2000 HZ operará a 50 Amperes, y así sucesivamente.

d) Características térmicas:

Como todo semiconductor, la temperatura de operación de la juntura P-N es la limitación esencial de los tiristores. La temperatura máxima admisible en dicha juntura varía de 125 a 150 grados centígrados según sea el tipo de tiristor. Generalmente se especifican rangos de temperatura de juntura de operación ( $T_J$ ) y almacenamiento ( $T_S$ ).

La energía eléctrica disipada en el tiristor, independientemente del sentido en que circule la corriente, aparece en forma de energía térmica en las uniones, de manera tal que esa potencia perdida se refleja como calentamiento de la juntura.

En términos reales esta cantidad de energía disipada en forma de calor es insignificante con respecto a la energía total -- manejada por el dispositivo, pero lo importante a tener en cuenta en estos casos no es tanto el valor absoluto de pérdida de -- energía, sino el calentamiento producido en las junturas. En adición a lo anterior no hay que olvidar que el nivel energético a partir del cual se produce la elevación de temperatura de la --- unión está fijado por la temperatura ambiente. Teniendo en cuenta que las temperaturas de trabajo industrial son del orden de los 50 a 60 grados centígrados y que la máxima temperatura soportada por el tiristor es de 125 grados centígrados, se deberá proveer al dispositivo de un disipador, capaz de asegurar su refrigeración eficaz.

Para otros casos, se hace necesario aplicar una refrigeración de carácter forzado (corriente de convección del aire ambiental) para el manejo de grandes potencias.

De lo anterior se pueden definir las siguientes magnitudes térmicas características:

#### TEMPERATURA DE UNION " $T_j$ "

Esta temperatura no es posible medirla, por lo que es necesario determinarla en función de la temperatura ambiente y de las magnitudes eléctricas manejadas. Cuando el dispositivo funciona en régimen permanente se establece un equilibrio térmico entre las uniones y el aire ambiente, es decir, la energía térmica radiada en cada segundo por el radiador compensa exactamente la potencia disipada en las juntas. La cantidad de calor que se desprende del cristal es proporcional a la diferencia existente entre la temperatura de la unión y la del ambiente. Por analogía con la ley de Ohm, a esta diferencia de temperatu

ras se le puede llamar diferencia de potencial térmico y definir una corriente de conducción térmica como la cantidad de calor que escapa del disipador.

A partir de lo anterior se puede entender el significado de resistencia térmica; resistencia que determina la circulación térmica entre la unión y el ambiente, siendo sus dimensiones °C/W.

#### TEMPERATURA DE CAPSULA

La temperatura que se mide en la cápsula que encierra al cristal en el punto de más temperatura, es decir, el más próximo a la unión, pero accesible externamente.

Potencia disipada y resistencia térmica.- La potencia disipada en la unión de un tiristor depende de:

- a) Pérdidas por conducción directa
- b) Pérdidas por conmutación (cebado y extinción)
- c) Pérdidas por corriente de fuga en estado de bloqueo directo.
- d) Pérdidas por corriente de fuga en estado -

de bloqueo inverso

e) Pérdidas en el circuito de puerta

El fabricante suele suministrar una familia de curvas que proporcionan la potencia media disipable aceptada en función -- del ángulo de conducción, cuando se trabaja con un voltaje senoidal y con una frecuencia hasta de 400 HZ.

Las curvas mostradas en la figura IV.1.3,6 están representando una forma de evaluación de las pérdidas por conducción -- directa, que son las más importantes. Estas curvas corresponden a cargas resistivas, pudiéndose extender éstas a corrientes con forma de onda rectangular que tenga igual valor medio a igual -- factor de servicio.

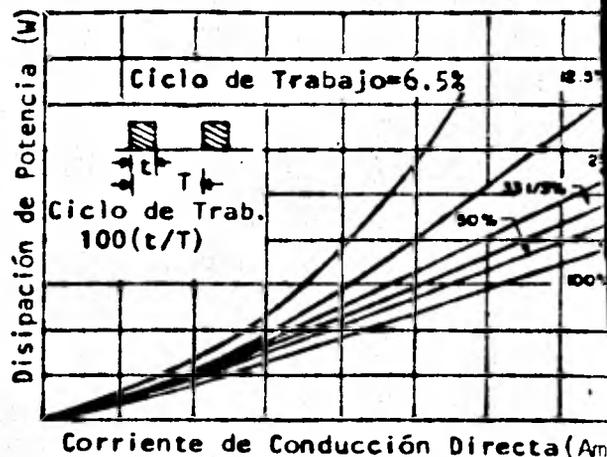
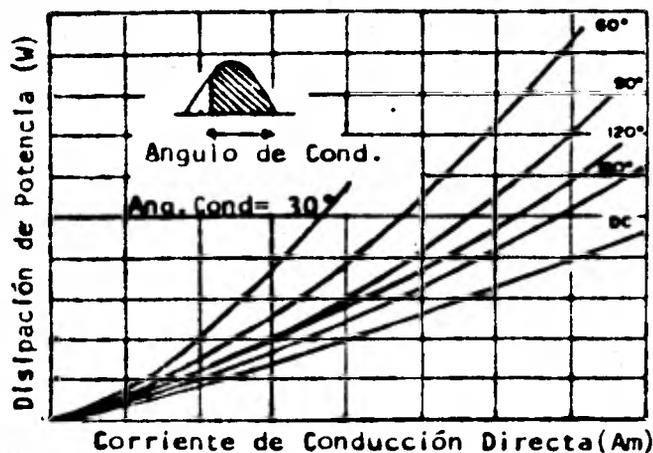


Figura IV.1.3,6. Disipación máxima de potencia en estado de conducción de un SCR, en onda senoidal y onda cuadrada.

**Resistencia térmica.**- El calor debido a las pérdidas de potencia descritas anteriormente incrementan la temperatura de la juntura y la carcasa del tiristor.

La relación existente entre los distintos parámetros para calcular la temperatura de la juntura está dada por la ecuación IV.1.3,1

$$T_{Jmax} = T_{amax} + P_{max} (R+R_{jh}) \quad \text{IV.1.3,1}$$

$T_{Jmax}$ : Temperatura media máxima de la juntura (en grados centígrados)

$T_{amax}$  Temperatura máxima ambiental de operación (en grados centígrados)

$P_{max}$  Máxima potencia media de pérdidas, posible de disipar a la temperatura ambiente (en Watts)

$R_{th}$ : Resistencia térmica entre la juntura y el disipador (en grados centígrados por Watt)

$R$ : Resistencia térmica del disipador externo (en grados centígrados por Watt)

La diferencia de temperaturas entre la juntura y el disipador está dada por la ecuación I.V.1.3,2

$$T_{JH} = T_{Jmax} - T_{hmax} \quad \text{IV.1.3,2}$$

Por lo tanto, de las ecuaciones anteriores se deduce que:

$$T_{hmax} = T_{max} + R P_{max} \quad \text{IV.1.3,3}$$

Expresión que permite determinar la "R" necesaria del disipador.

#### IV.2.1 TRANSISTOR UNIJUNTURA UJT. (UNIJECTION TRANSISTOR).

Un capacitor y una resistencia describen un circuito simple de disparo, dependiendo éste de las características de cada SCR usado. Pero en adición a esto, el nivel de potencia en el circuito de control es alto debido a que el total de la corriente de disparo fluye a través de la resistencia. Por tal razón este circuito no representa un buen método de disparo.

Mientras tanto, existen una multitud de semiconductores y circuitos los cuales producen pulsos de disparo adecuados, haciendo a los circuitos conmutadores automáticos y autoprogramados.

Un ejemplo de estos semiconductores es el transistor unijuntura UJT, el cual será utilizado esencialmente como un generador de pulsos de disparo para los SCR's del circuito inversor.

El UJT tiene tres terminales que son; EMISOR (E), BASE UNO ( $B_1$ ) y BASE DOS ( $B_2$ ). Entre base uno y base dos la juntura tiene las características de una resistencia ordinaria. Esta resistencia es llamada resistencia interbase  $R_{BB}$  la cual a  $25^\circ\text{C}$  tiene valores entre  $4.7\text{K}\Omega$  y  $9.1\text{K}\Omega$ .

En la figura IV.2.1,1 se muestra al UJT como se esbozó anteriormente consistiendo de una barra semiconductor tipo N con una juntura ubicada en la zona intermedia de tipo P.

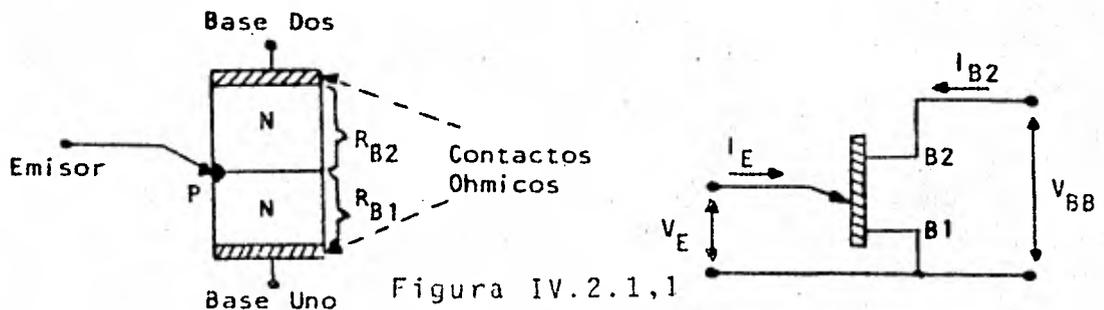


Figura IV.2.1,1

Las condiciones normales de polarización para un UJT típico se indican en la figura IV.2.1,2. Si el voltaje de emisor  $V_E$ , es menor que el voltaje pico de emisor  $V_p$ , el emisor se encontrará polarizado inversamente y solo una pequeña corriente de fuga  $I_{E0}$  fluirá. Cuando  $V_E$  es igual a  $V_p$  y la corriente de emisor  $I_E$  es igual a la corriente de pico  $I_p$  el UJT se dispara. Bajo las condiciones de disparo o de estado ON, la resistencia entre el emisor y la base uno es muy baja, por lo tanto dicha corriente deberá ser limitada por una resistencia externa colocada en la base uno.

El voltaje pico del UJT varía en proporción al voltaje interbase  $V_{BB}$ , de acuerdo con la ecuación IV.2.1,1

$$V_p = n V_{BB} + V_D \quad \text{IV.2.1,1}$$

Donde:

$n$  = Relación intrínseca entre contactos.

$V_{BB}$  = Voltaje interbases.

$V_D$  = Tensión de diodo polarizado en directa, el cual es igual a 0.5 V a 25°C dependiendo éste del tipo de UJT.

El valor de  $n$  es igual a la ecuación número IV.2.1,2.

$$n = \frac{R_{B1}}{R_{BB}} \quad \text{IV.2.1,2}$$

el cual varía entre 0.51 y 0.82.

El valor de  $V_p$  depende de la temperatura; éste decrece entre -3 mV y -2 mV por cada grado centígrado de aumento en la temperatura.

$R_{BB}$  aumenta su valor con un aumento en la temperatura, -

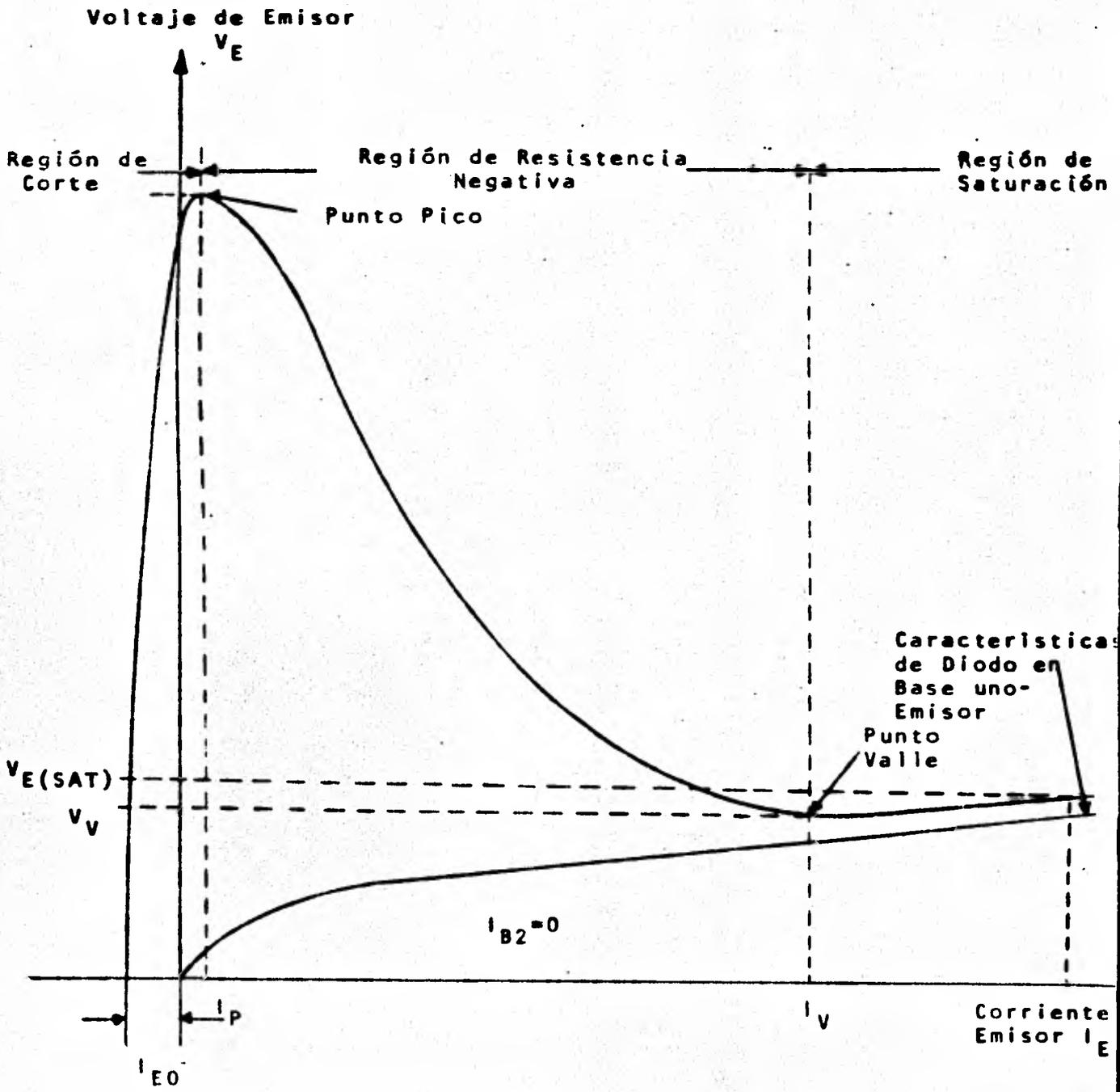


Figura IV.2.1,2. Gráfica de comportamiento del UJT.

$\eta$  permanece constante ya que  $R_{B1}$  y  $R_{B2}$  varían en igual sentido.

$V_D$  sufre también una disminución con los incrementos de -- temperaturas, pero es posible compensar estas variaciones mediante el aprovechamiento del coeficiente de temperatura positivo de  $R_{BB}$ .

Si se utiliza una resistencia externa en Base Dos, las variaciones de  $R_{BB}$  causarán que  $V_{BB}$  se incremente con la temperatura. Si esta resistencia externa se escoge correctamente, este incremento de  $V_{BB}$  compensará al decremento de  $V_D$  y por lo tanto al decremento del voltaje pico  $V_p$ ; para temperaturas de  $-40^\circ\text{C}$  a  $100^\circ\text{C}$  se usará la ecuación IV.2.1,3 para determinar la resistencia externa en Base Dos, la cual se llamará  $R_{B2ex}$ :

$$R_{B2ex} = \frac{10,000}{\eta V_1} \quad \text{IV.2.1,3}$$

donde  $V_1$  es el voltaje de alimentación.

Como fue mencionado anteriormente para limitar la corriente que circula del emisor a la base 1, es necesario colocar una resistencia externa que se llamará  $R_{B1ex}$  y se determina por la ecuación IV.2.1,4, que a continuación se muestra.

$$R_{B1ex} = \frac{V_{GTmax}(R_{BBmax} + R_{B2})}{V_1 - V_{GTmax}} \quad \text{IV.2.1,4}$$

donde  $V_{GTmax}$  es el máximo valor del voltaje aplicado a la puerta o gate que no dispara al SCR.

Un circuito típico de utilización del UJT para el disparo de los SCR's es mostrado en la figura IV.2.1,3, en la cual el condensador  $C_1$  se carga a través de  $R_1$  hasta que el voltaje de emisor alcanza el valor de  $V_p$ , disparándose en ese momento el --

UJT, descargándose  $C_1$  a través de la resistencia  $R_{B1ex}$ . Cuando el voltaje de emisor alcanza aproximadamente 2 volts, el emisor deja de conducir bloqueándose el UJT para comenzar nuevamente el ciclo.

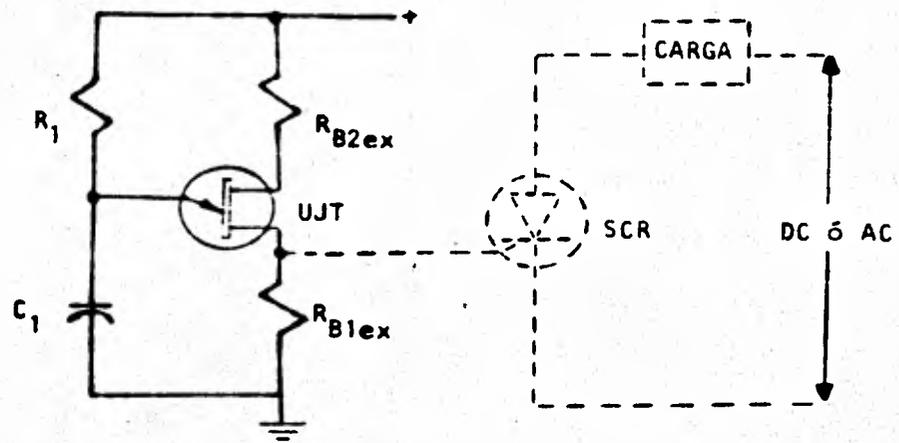


Figura IV.2.1.3. Circuito típico de disparo del UJT.

El período de oscilación  $T$  es prácticamente independiente - del voltaje de alimentación y de la temperatura, el cual está dado por la ecuación IV.2.1.5:

$$T = \frac{1}{f} = R_1 C_1 \log_e \frac{1}{1-\eta} = 2.3 R_1 C_1 \log_{10} \frac{1}{1-\eta} \quad \text{IV.2.1.5}$$

Para un valor nominal de la relación intrínseca  $\eta$  de 0.63 - el período será;  $T = R_1 C_1$ .

### IV.3.1 CIRCUITO INVERSOR

Como se mencionó anteriormente uno de los métodos de conmutación es la conmutación forzada, la cual es empleada en los circuitos inversores ya que se trabaja con corriente directa, impidiéndose la conmutación natural como ocurre en el caso de la corriente alterna. La puerta o gate pierde todo poder de control una vez que el SCR ha sido disparado y la corriente ánodo-cátodo ha excedido la corriente de enganche. Medios externos tienen que ser aplicados para parar el flujo de corriente por el dispositivo, siendo tales, la interrupción de corriente y la conmutación forzada.

La conmutación forzada se puede clasificar de la siguiente forma:

**CLASE A** Autoconmutación por carga resonante. Cuando un SCR es disparado, la corriente de ánodo fluye y carga al condensador con la polaridad mostrada. La corriente del condensador intentará fluir en dirección inversa a la corriente anódica apagando al SCR. Lo anterior es mostrado en la figura IV.3.1,1.

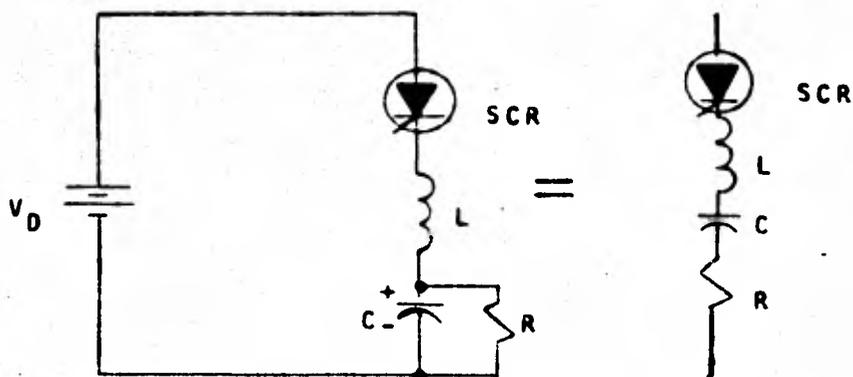


Figura IV.3.1,1. Autoconmutación por carga resonante.

**CLASE B** Autoconmutación por un circuito LC. Después de que el pulso de disparo es aplicado, el capacitor se carga con la polaridad indicada en la figura IV.3.1,2. Cuando el SCR se dispara, la corriente fluye en dos direcciones:

- 1<sup>a</sup>. La corriente de carga que fluye a través de la resistencia "R".
- 2<sup>a</sup>. La corriente que fluye por el circuito resonante LC y carga al condensador "C" con polaridad inversa. La corriente inversa del circuito LC tratará de fluir a través del SCR en oposición a la corriente de carga.

El SCR se apagará cuando la corriente del circuito LC sea igual a la corriente de carga.

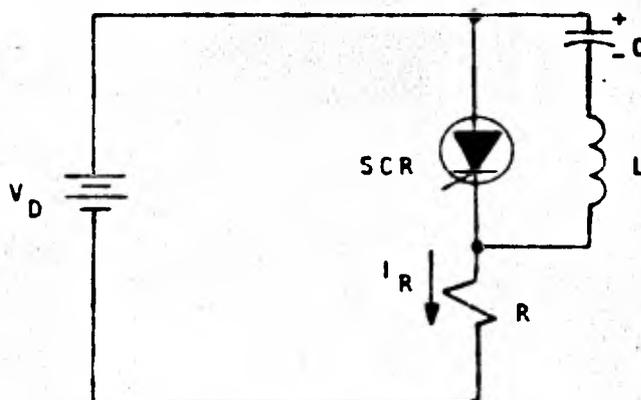


Figura IV.3.1,2. Autoconmutación por un circuito LC.

**CLASE C** Conmutación de un SCR mediante un circuito LC ó C en conjunto con otro SCR adicional. Asumiendo que el SCR<sub>2</sub> está en conducción, el capacitor "C" se carga con la polaridad mostrada en la figura-IV.3.1,3. La conmutación se logra cuando se dispara el SCR<sub>1</sub>, el cual conecta a "C" en paralelo con el SCR<sub>2</sub> (en este momento el SCR<sub>1</sub> figura como un corto circuito), apagándose el SCR<sub>2</sub> debido a que la corriente del condensador se opone a la corriente de carga. Se hace notar que los dos SCR's conducen corriente de carga, pero no simultáneamente.

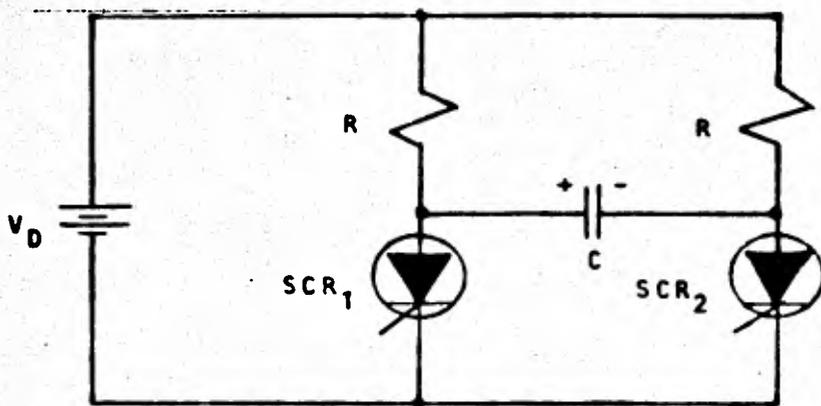


Figura IV.3.1,3. Conmutación de un SCR mediante un circuito LC ó C en conjunto con otro SCR adicional.

**CLASE D** Conmutación de un SCR por un circuito LC ó C auxiliado por otro SCR. El circuito anterior utilizado para representar la conmutación clase C puede ser modificado para mostrar la conmutación cla

se D en el cual, solo el  $SCR_1$  conduce corriente de carga mientras que el  $SCR_2$  actúa como un auxiliar del  $SCR_1$ .

El  $SCR_2$  deberá ser disparado primero para cargar al condensador a través de él y cuando éste se acaba de cargar el  $SCR_2$  se apaga debido a la falta de corriente.

Cuando el  $SCR_1$  es disparado la corriente fluye en dos trayectorias que son:

1<sup>a</sup>. La corriente de carga que fluye por la resistencia "R".

2<sup>a</sup>. La corriente de conmutación que fluye por C,  $SCR_1$ , L y por el diodo D, la carga de C es de polaridad inversa y retenida por la acción del diodo D. Cuando se requiere,  $SCR_2$  se dispara conectando en paralelo el condensador y el  $SCR_1$  apagándolo (esto se debe a que el  $SCR_2$  en este momento se presenta como un corto circuito). Lo anterior se muestra la figura IV.3.1,4

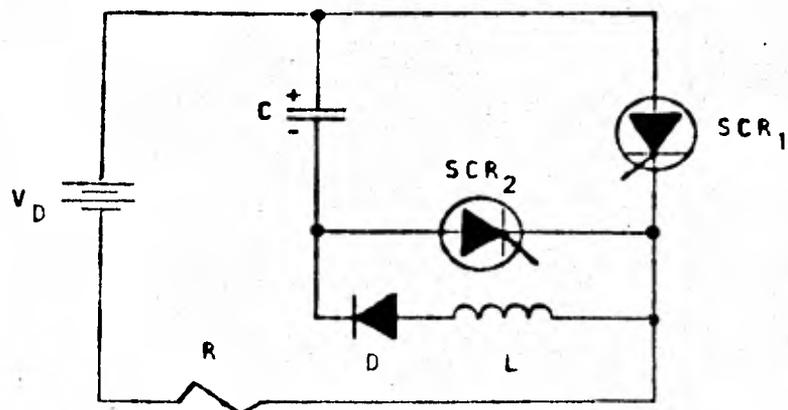


Figura IV.3.1,4. Conmutación de un SCR por un circuito LC ó C auxiliado por otro SCR

## CLASE E

Pulso externo para conmutación del SCR. Cuando el SCR es disparado, la corriente fluirá por la resistencia de carga. Para apagar el SCR se aplica un pulso para poner en conducción al transistor  $Q_1$ , conectado éste a la fuente de voltaje  $E_2$  en paralelo con SCR, apagándolo.  $Q_1$  es mantenido en conducción el tiempo que dura el SCR en el estado de no conducción o apagado. Lo anterior es mostrado en la figura IV.3.1,5.

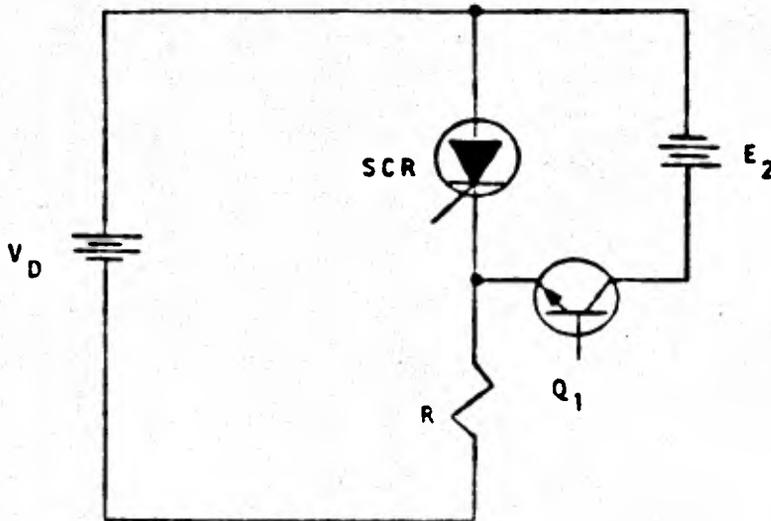


Figura IV.3.1,5 Pulso externo para conmutación del SCR.

Como se puede observar de las anteriores figuras los capacitores o condensadores juegan un papel muy importante dentro de los circuitos inversores, por lo tanto, sus características deben ser cuidadosamente consideradas.

Las propiedades de los capacitores enunciados a continua---

ción, son importantes dentro de un criterio de diseño.

1. La vida del capacitor deber ser larga a temperatura de operación ambiente.
2. Las pérdidas de potencia en el capacitor deben ser bajas por dos razones:
  - a) Para prevenir temperaturas internas altas, - las cuales disminuyen la vida del capacitor.
  - b) Para mantener la alta eficiencia el circuito que emplea tiristores.

Es importante para un buen diseño de este tipo de circuitos electrónicos, considerar el capacitor como una parte de suma importancia en ellos, por lo que todos los condensadores de conmutación deben ser de trabajo pesado, con conexiones internas para permitir el manejo de altas corrientes, con una forma de hojuela extendida, la cual le permite presentar una baja inductancia y un mínimo de resistencia llamada Resistencia Serie Equivalente.

En adición a los tipos de conmutación forzada se puede mencionar el tipo de conmutación llamada "natural", presentándose ésta con el uso de corriente alterna, en la cual al llegar la onda senoidal de corriente por debajo de la corriente de mantenimiento, se apaga el tiristor dejando de conducir corriente a la carga.

### IV.3.2 CLASIFICACION DE LOS CIRCUITOS INVERSORES

La clasificación de los circuitos inversores se lleva a cabo en base al método de conmutación o en otras palabras al método de apagar al tiristor.

La figura IV.3.2,1 muestra la clasificación de los circuitos inversores.

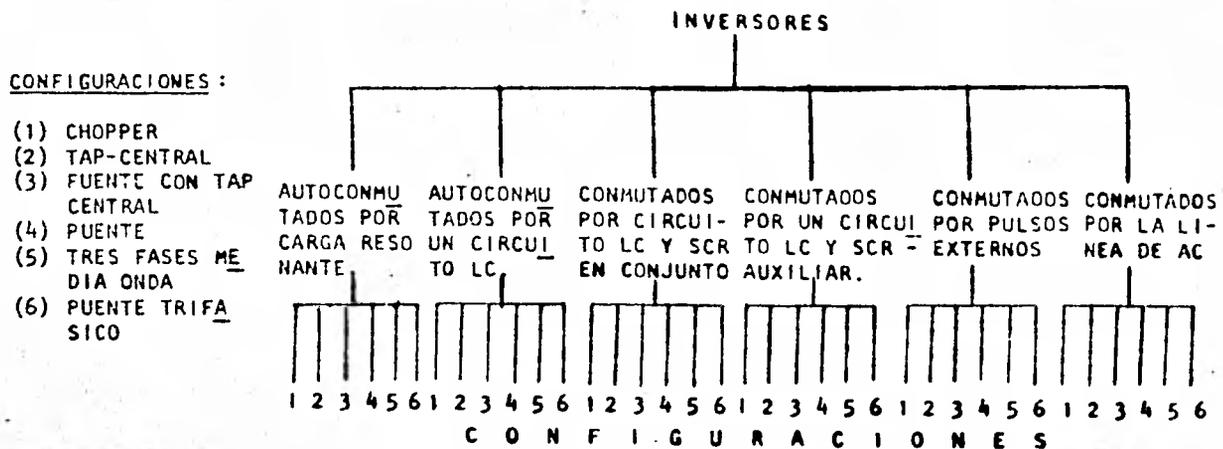


Figura IV.3.2,1. Clasificación de los circuitos inversores.

Las propiedades de los inversores, según su clase son:

**CLASE A** Autoconmutado por carga resonante. Estos inversores son especialmente utilizados para altas frecuencias de operación, como por ejemplo 1000 Hz, en la cual el circuito L-C resonante maneja la corriente de carga total. La corriente a través de SCR es casi senoidal.

**CLASE B** Autoconmutado por un circuito LC; el gran mérito de ésta clase es la simplicidad del circuito. -- Cuando son usados reactores saturables, es necesario tener pericia para el diseño de estos componentes y la manufactura de ellos deberá ser --

checada minuciosamente.

- CLASE C** Conmutación de un SCR mediante un circuito LC o C en conjunto con otro SCR adicional. Un ejemplo de este tipo de inversores, es el inversor Murray-Bedford. Con ayuda de ciertos accesorios, ésta clase es muy usada con gran eficiencia a frecuencias abajo de los 1000 HZ.
- CLASE D** Conmutación por un circuito LC o C auxiliados por un SCR auxiliar. Este tipo de inversores son muy versátiles. La energía de conmutación puede estar lista para ser transferida a la carga y así aumentar la eficiencia.
- CLASE E** Fuente de pulsos externa para conmutación. Este tipo de inversores ha sido descuidado y olvidado el cual puede tener una eficiencia alta, en vista de que utiliza unicamente la energía necesaria para la conmutación, la que es suministrada por una fuente externa.
- CLASE F** Conmutación por la línea de AC. El uso de este tipo de inversores está limitado a aquellas aplicaciones, donde una gran cantidad de potencia alterna, está disponible. La eficiencia de éstos es muy alta.

Los circuitos rectificadores son diseñados con varias configuraciones, tales como los de media onda, de onda completa, -

puente, etc. Los circuitos inversores pueden ser agrupados en una forma análoga.

La figura IV.3.2,2 muestra los diferentes tipos de configuraciones, en la cual los métodos de disparo y conmutación tuvieron que ser omitidos para tener una clara visión de los mismos.

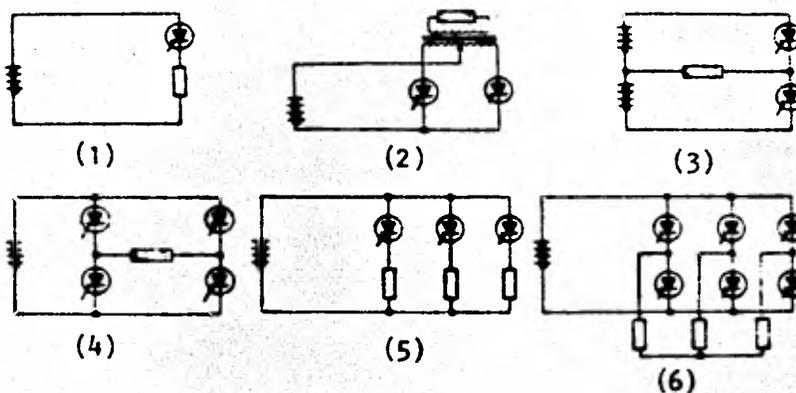


Figura IV.3.2,2. Tipos de Configuraciones. (1) Chopper (2) Tap-Central (3) Fuente con tap-central (4) Puente (5) Tres fases media onda (6) Puente Trifásico. En esta figura se puede apreciar claramente que de corriente directa, se puede obtener corriente monofásica, trifásica etc.

Por lo anteriormente expuesto se escogió el inversor CLASE C, MURRAY-BEDFOR, ya que es uno de los más usados, y por trabajar con gran eficiencia abajo de los 1000 Hz.

### IV.3.3. CIRCUITO INVERSOR CLASE C, MURRAY-BEDFORD

Este circuito está basado en el método del capacitor conmutador paralelo.

El término capacitor conmutador paralelo, es usado para indicar que en un circuito inversor se utiliza un capacitor para conmutar a los SCR's en paralelo con la carga.

En la figura IV.3.3,1 el capacitor no está directamente en paralelo con la carga, pero éste circuito simplificado demuestra la acción de la conmutación mencionada.

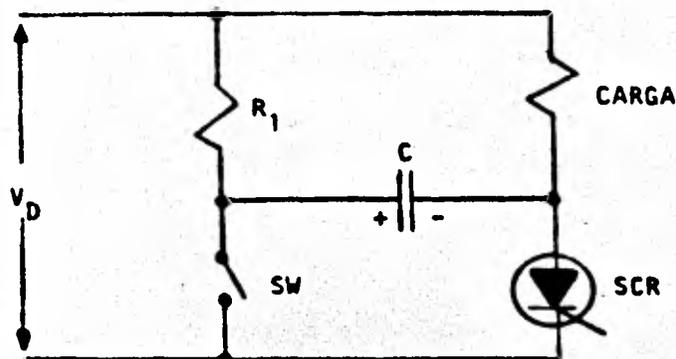


Figura IV.3.3,1. Capacitor Conmutador Paralelo "C".

Cuando el SCR de la figura anterior es disparado, el capacitor se cargará con la polaridad mostrada exponencialmente, aprovechando la fuente de voltaje de D-C cuando el contacto  $SW$  es cerrado, el capacitor es conectado en paralelo con el SCR en una dirección que suministra el mencionado SCR un voltaje negativo ánodo-cátodo, de tal modo, que desvía la corriente de carga al capacitor, apagándose el SCR. El tamaño del capacitor y el voltaje al cual es cargado, deberán ser suficientes para desviar la máxima corriente de carga del SCR, para el intervalo de tiempo -

requerido para que éste recupere su habilidad de no conducción.

Un circuito en el cual se aplica el método del capacitor - conmutador paralelo, es el que se muestra en la figura IV.3.3,2, detallando voltajes y corrientes. Este circuito constituye la base del inversor, que como se mencionó anteriormente, es un clase "C" MURRAY-BEDFORD.

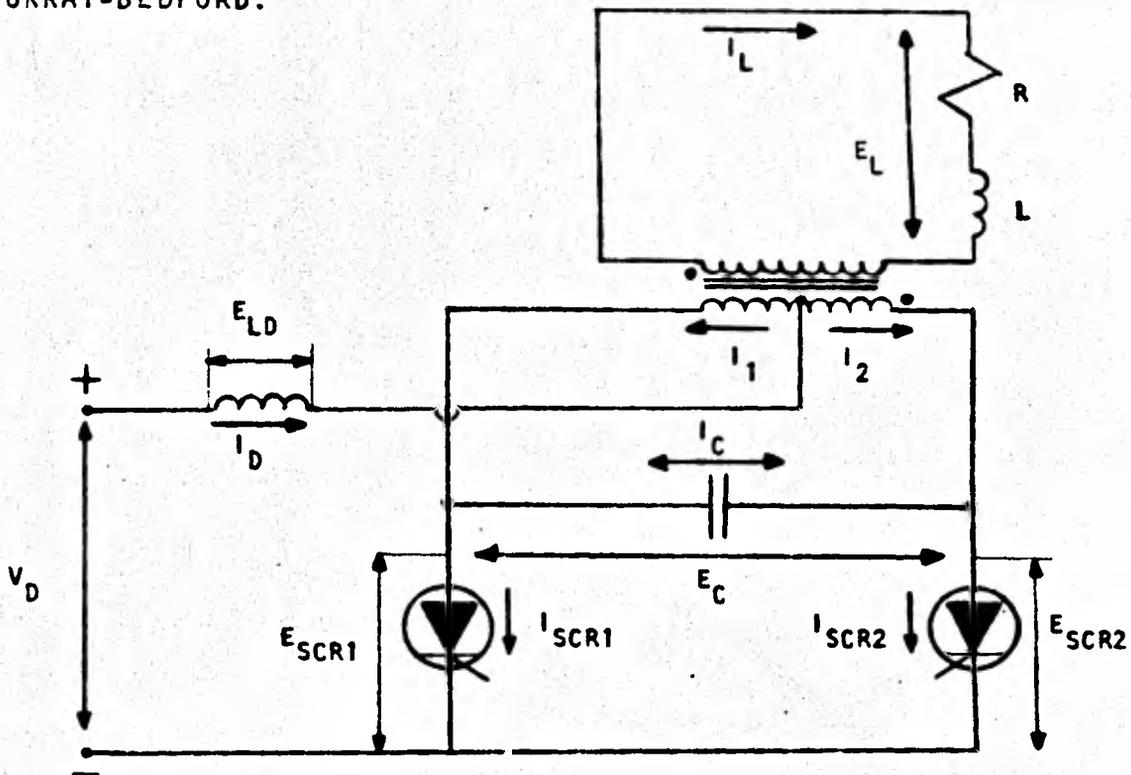


Figura IV.3.3,2. Circuito inversor clase C, Murray-Bedford.

La conmutación se lleva a cabo mediante la acción del capacitor conmutador. Esta conmutación se inicia cuando uno de los SCR's es disparado, estando el otro previamente en conducción. El reactor de corriente directa previene corrientes excesivas en el capacitor durante los intervalos de switcheo.

Un método para entender el circuito de la figura anterior -

es considerando, que la corriente de directa es switchheada por la acción de los SCR's de una mitad de transformador a la otra mitad del devanado primario del transformador (como se puede ver en la figura anterior, el transformador presenta un tap-central en el primario). La fuente de d-c suministra corriente en forma alternativa a las dos mitades del primario del transformador, -- produciendo fuerzas magnetomotrices de polaridad opuesta. Esto es equivalente a una corriente alterna en el primario de un transformador sencillo, ésto es, sin tap-central. Por lo anterior el secundario del transformador entrega una corriente alterna a la carga.

En general para el circuito de la figura anterior, el reactor de d-c es lo suficientemente grande para prevenir variaciones cíclicas en la corriente de d-c o de alimentación. Cuando la corriente es conmutada de un SCR al otro, en el secundario se presenta una corriente con forma de onda cuadrada. Durante el período de conducción de cada SCR, el voltaje promedio o average de cada mitad del primario del transformador con tap-central, deberá ser igual al voltaje de la fuente de d-c para las condiciones de estado estable.

El problema que se debe afrontar en el diseño de éste circuito inversor es el manejo de cargas inductivas, ya que con la adición de éstas cargas, ocurren varios cambios en el mencionado circuito, el cual opera normalmente con cargas resistivas.

Si no se tomaran precauciones para la operación del inversor con cargas reactivas, causarían éstan transitorios de alto voltaje, dando como resultado una pérdida de eficiencia y po--

tencia, poniéndose en peligro los componentes.

Considerando en la figura IV.3.3,3 que el SCR<sub>1</sub> está conduciendo, la corriente fluye en el primario del transformador como lo muestra la flecha "a" y en el secundario como lo muestra la flecha "b".

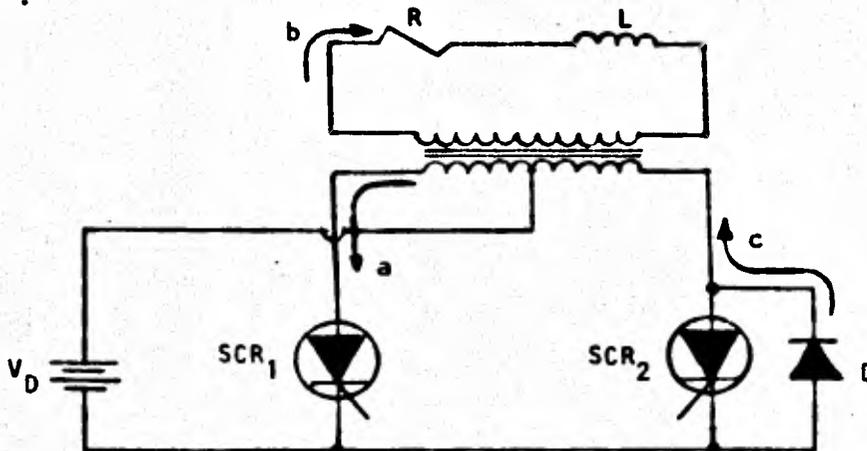


Figura IV.3.3,3. Efecto de compensación de cargas inductivas.

Cuando  $SCR_1$  es apagado, la corriente sigue fluyendo por el efecto de la carga inductiva. Si no fuera provisto el secundario de una trayectoria para la corriente, se presentaría un pico de voltaje (transitorio) excesivo.

Un medio conveniente de proveer una trayectoria de circulación de corriente en el primario, es colocando un diodo convencional en paralelo con  $SCR_2$ . Ahora la corriente "c" señalada en el dibujo anterior tiene una trayectoria de circulación, esto magnéticamente representa la continuación de la trayectoria de la corriente "a"

La  $\frac{dV}{dT}$  que el circuito aplica al SCR se incrementa grandemente. La figura IV.3.3,4 muestra el efecto de un diodo en para

lelo con un SCR, sobre la forma de onda de voltaje. En dicha figura se podrá ver que el voltaje a través del SCR es retenido a un pequeño voltaje negativo, mientras está fluyendo una corriente por el diodo. Cuando la corriente deja de fluir por el diodo, el voltaje del SCR se incrementa hasta un valor alto. Como este transitorio es muy rápido (aproximadamente de  $1\mu\text{Seg.}$ ), el valor de la  $\frac{dV}{dt}$  puede ser muy alta.

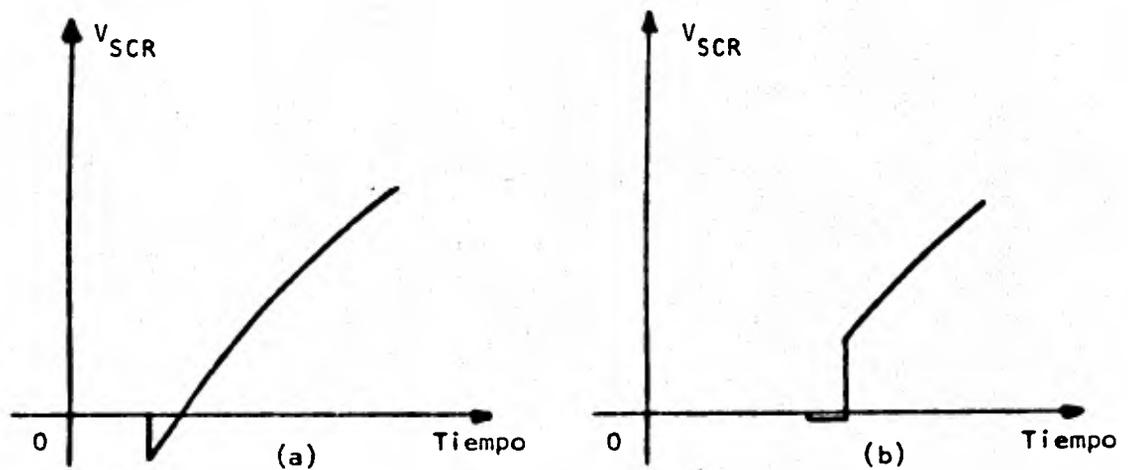


Figura IV.3.3,4. Forma de onda a través del SCR<sub>2</sub>. (a) Sin diodo a través del SCR (b) Con diodo a través del SCR.

Por lo anterior, en algunos casos es conveniente usar una inductancia para hacer el acoplamiento del diodo con el SCR. Con esta conexión de los diodos y los SCR's, el alto voltaje de la  $\frac{dV}{dt}$  y el bajo voltaje correspondiente al voltaje inverso pueden ser anulados.

#### IV.3.4 FILTRO PARA LA ELIMINACION DE ARMONICAS

Para la eliminación de armónicas que provienen del circuito inversor, se consideró colocar un filtro tipo "T" a la salida del mencionado circuito. La figura IV.3.4,1 muestra este tipo de filtro, el cual es extremadamente usado en conjunto con el inversor clase "C" MURRAY-BEDFORD.

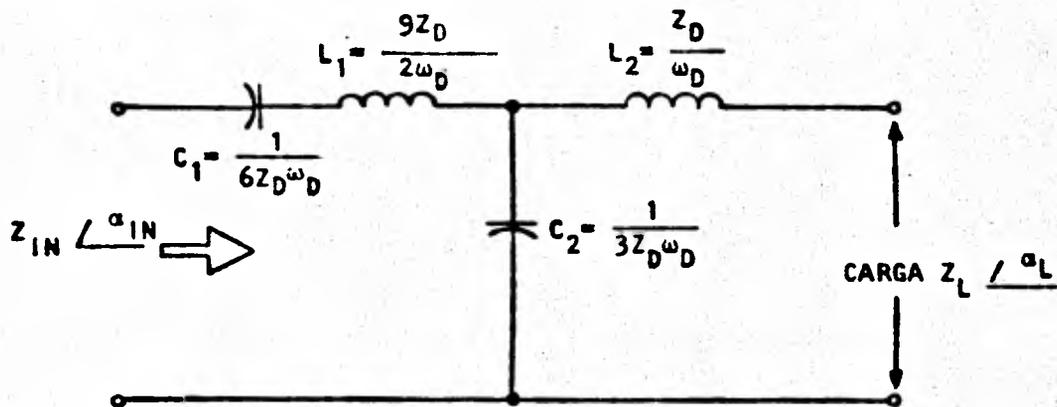


Figura IV.3.4,1. Filtro tipo "T" para eliminación de armónicas

El circuito ejecuta tres funciones importantes que son:

- Proveer una salida de voltaje con una forma de onda senoidal, eliminando esencialmente el contenido de armónicas en la carga.
- Proveer de una buena regulación de carga
- Mantener una carga capacitiva en el inversor, ayudando a compensar las variaciones del factor de potencia, cuando se añaden cargas inductivas. Además, esto permite una mejor conmutación de los SCR's.

Una forma de auxiliarse en el diseño del filtro es utilizando una impedancia de diseño que llamaremos  $Z_D$  (este valor está normalizado) y la carta Smith la que es mostrada en la figura IV.3.4,2. la cual presenta a la impedancia de entrada del filtro como una -

función de la impedancia de carga del filtro.

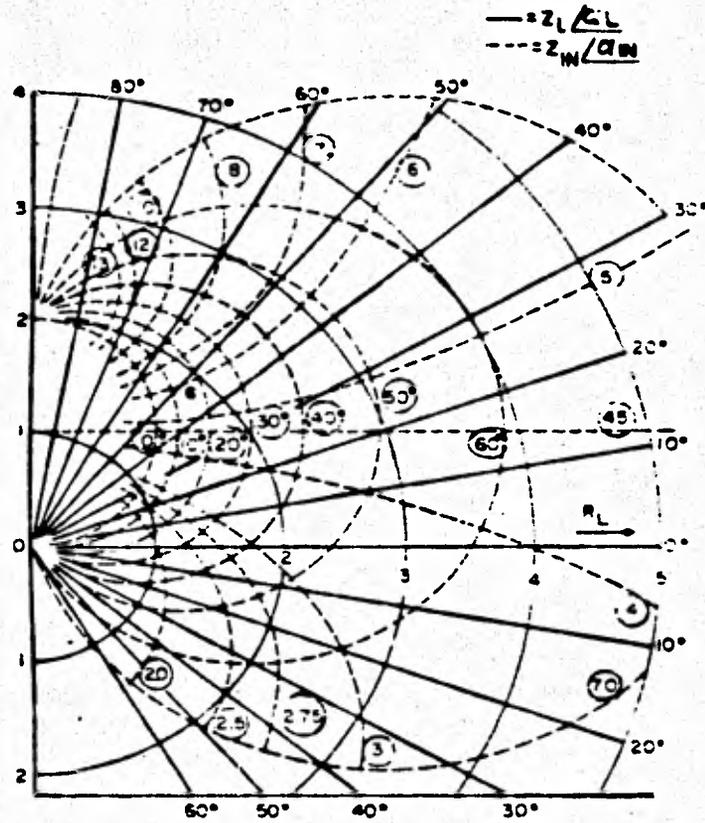


Figura IV.3.4,2. Carta Smith.

En la carta Smith se puede observar curvas continuas concéntricas en el punto (0,0), las cuales representan valores -- constantes de impedancia de carga. Las líneas radiales continuas representan valores de ángulos de fase de la carga. Se ha ce notar que todos los valores manejados en la carta Smith son normalizados o sea divididos entre la impedancia característica de diseño  $Z_D$ .

La impedancia normalizada de entrada se lee de las curvas

punteadas divergentes, las curvas punteadas con centro en (0,1) representan los valores del ángulo de fase de entrada del filtro.

Los valores de la impedancia de entrada son determinadas por la intersección de la curva de resistencia constante de la carga y por la línea radial del ángulo de fase de la carga.

#### IV.3.5 DISEÑO DEL CIRCUITO INVERSOR Y DEL FILTRO

Para el diseño del circuito inversor es necesario fijar los siguientes parámetros de diseño:

- Potencia de salida = 1000 Watts
- Voltaje de salida = 120 Volts (RMS)
- Frecuencia de salida = 60 Hz
- Factor de potencia mínimo = 0.8 atrasado
- Fuente de voltaje de D-C = 100 VDC

Adicionalmente se requiere que se diseñe primero el filtro para conocer los valores de voltaje y potencia que se requieren en el inversor.

Cabe aclarar que las fórmulas que se utilizaron fueron sacadas de los manuales de diseño de la General Electric, RCA y de la Fairchild.

#### MEMORIA DE CALCULO

Con los datos mencionados anteriormente y empezando con el diseño del filtro tendremos que la resistencia de carga será:

$$R_L = \frac{(V)^2 (f_p)^2}{P} = \frac{(120)^2 (.8)^2}{1000} = 9.216 \Omega$$

La reactancia de carga  $X_L$  es igual a:

$$X_L = \frac{R_L}{f_p} \sqrt{1 - (f_p)^2} = \frac{9.216}{0.8} \sqrt{1 - (0.8)^2} = 6.912 \Omega$$

El módulo de la impedancia de carga es:

$$|Z_L| = \sqrt{(R_L)^2 + (X_L)^2} = 11.52 \Omega$$

El ángulo de fase de la carga es:

$$\angle Z_L = \cos^{-1} 0.8 = 36.87^\circ$$

Para la utilización de la carta Smith, encontraremos la impedancia característica de diseño  $Z_D$ :

$$Z_D = \frac{|Z_L|}{2} = \frac{11.52}{2} = 6$$

La frecuencia de diseño  $\omega_D$  es:

$$\omega_D = 2(\pi)f = 2(3.1416)(60) = 377 \text{ rad/seg.}$$

De la figura IV.3.4,1 se procederá a calcular los valores - referentes a la misma.

$$C_1 = \frac{1}{6Z_D \omega_D} = \frac{1}{(6)(6)(377)} = 73.68 \times 10^{-6} = 73.68 \mu\text{f}$$

$$C_2 = \frac{1}{3Z_D \omega_D} = \frac{1}{(3)(6)(377)} = 147.36 \times 10^{-6} = 147.36 \mu\text{f}$$

$$L_1 = \frac{9Z_D}{2\omega_D} = \frac{9(6)}{2(377)} = .0716 \text{ Hy} = 71 \text{ mHys.}$$

$$L_2 = \frac{Z_D}{\omega_D} = \frac{6}{377} = .0159 \text{ Hy} = 15.9 \text{ mHys.}$$

De la impedancia de carga calculada tendremos;

$$Z_L = R_L + jX_L = 9.216 + j 6.912 = 11.52 \angle 36.87^\circ$$

Normalizando la impedancia de carga se tendrá que:

$$Z_n = \frac{Z_L}{Z_0} = \frac{11.52}{6} = 1.92 \angle 36.87^\circ$$

De la carta Smith se pueden encontrar los valores de la impedancia de entrada del filtro los cuales son:

$$Z_{in-n} = 4.9 \angle -25^\circ$$

Se puede notar que el valor anterior es normalizado, obteniéndose el valor real, multiplicándolo por el valor de la impedancia característica de diseño  $Z_0$  y es:

$$Z_{in} = (4.9)(6) \angle -25^\circ = 29.4 \angle -25^\circ = 26.6 - j 12.42 \Omega$$

Notese que el valor negativo es porque el filtro presenta una impedancia capacitiva

De la expresión anterior se puede notar que la resistencia de entrada del filtro es:

$$R_{in} = 26.6 \Omega$$

Por lo tanto el voltaje de entrada del filtro, el cual debe ser suministrado por el inversor, para asegurar un voltaje de salida del filtro de 120 Volts es:

$$E_{SQ} = \frac{\sqrt{2}}{4} \sqrt{|Z_{in}| \left| \frac{P_0}{R_{in}} \right|^{1/2}} \text{ volts} = 200 \text{ Volts}$$

Para el transformador se tiene que la relación de vueltas entre el primario y el secundario es:

$$n = \frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{100}{200} = 2$$

La potencia de entrada al inversor, asumiendo una eficiencia del mismo de 90% es:

$$P_1 = 1000 \times \frac{100}{90} = 1110 \text{ Watts}$$

La corriente promedio por cada SCR es:

$$I_{av} = \frac{P |Z_{in}|}{2E_D R_{in}} = 5.52 \text{ Amperes}$$

El voltaje pico inverso que deberá soportar cada SCR es:

$$V_{pico} < 2.5 E_D = 2.5 (100) = 250 \text{ Volts}$$

Por lo que quiere decir que el voltaje pico no sobrepasará a los 250 Volts.

De los manuales, donde se obtuvo la información anterior, especifican que deben prevenirse daños a los circuitos y en especial a los SCR's, seleccionándolos de una mayor capacidad, ya que en arranques de motores domésticos y en general al encender una unidad eléctrica, se presentan transitorios hasta de 6 veces el valor nominal de la corriente de la unidad.

Por lo anterior se seleccionó el SCR C138E10E de la General Electric, del cual se anexan hojas de especificaciones.

El C138E10E tiene un tiempo máximo de apagado  $t_a$  (tiempo de duración del estado de conducción al estado de apagado) de  $10 \mu\text{seg}$  y una  $\frac{dV}{dt} = 200 \text{ Volts}/\mu\text{seg}$ .

Para asegurar el tiempo de apagado de los SCR's, se seleccionó un  $t_a = 12 \mu\text{seg}$ . y una corriente pico  $I_{pico} = 10 \text{ Amperes}$ .

De lo anterior, el reactor de D-C se calculó de la siguiente forma:

$$L_i = \frac{6E_D t_a}{\pi I_{pico}} = \frac{6(100)(12)}{3.1416(10)} = 229.18 \times 10^{-6} \text{ Henrys.}$$

# SCR

**C138,9**  
285

The General Electric C138 and C139 Series of Silicon Controlled Rectifiers are reverse blocking triode thyristor semiconductor devices designed primarily for high-frequency power switching applications which require blocking voltages from 500 to 800 volts and load currents up to 35 amperes RMS, at frequencies up to 25 kHz. Refer to C140 and C141 series for blocking voltages from 100 to 400 volts.

The C138, C139 family of inverter SCR's utilizes a new voltage rating system which, for the first time allows high voltage blocking capability with the short turn-off time characteristics of a low blocking voltage SCR.

Equipment designers can use the C138 and C139 SCR's in demanding applications such as: choppers, inverters, regulated power supplies, cycloconverters, ultrasonic generators, high frequency lighting, sonar transmitters, radar transmitters, and induction heaters.



## MAXIMUM ALLOWABLE RATINGS

Type (1)	Repetitive Peak Off-State Voltage, $V_{DRM}$ (2)(3). $T_C = -65^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$	Peak or DC Switching Voltage $V_{DM}$ or $V_D$ (2)(3) $T_C = -65^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$	Repetitive Peak Reverse Voltage $V_{RRM}$ (2)(3) $T_C = -65^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$	Non-Rep. Peak Reverse Voltage $V_{RSM}$ (2)(4) $T_C = -65^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$
C139E10E, C139E20E	500 Volts	500 Volts	500 Volts	600 Volts
C138E10E, C138E20E	500	500	50	-
C139M10M, C139M20M	600	600	600	720
C138M10M, C138M20M	600	600	50	-
C139S10M, C139S20M	700	600	600	720
C138S10M, C138S20M	700	600	50	-
C139N10M, C139N20M	800	600	600	720
C138N10M, C138N20M	800	600	50	-

RMS On-State Current,  $I_T(RMS)$  . . . . . 35 Amperes (all conduction angles)

Critical Rate-of-Rise of On-State Current,  $di/dt$ : (5)

Gate triggered operation:

Switching from 500 volts (500 volt types) . . . . . 100 Amperes per microsecond

Switching from 600 volts (600, 700, 800 volt types) . . . . . 100 Amperes per microsecond

Peak One Cycle Surge (non-rep) On-State Current,  $I_{TSM}$  . . . . . 200 Amperes

Peak Rectangular Pulse Surge (non-rep) On-State Current (5.0 Msec,  $t_r=50\mu\text{sec}$ )  $I_{TSM}$  . . . . . 180 Amperes

$I^2t$  (for fusing), for times  $\geq 0.5$  milliseconds . . . . . 165 Ampere<sup>2</sup> seconds

Peak Gate Power Dissipation,  $P_{GM}$  . . . . . 40 Watts for 100 Microseconds

Average Gate Power Dissipation,  $P_G(AV)$  . . . . . 1.0 Watts

Peak Reverse Gate Voltage,  $V_{GM}$  . . . . . 10 Volts

Storage Temperature,  $T_{STG}$  . . . . .  $-65^\circ\text{C}$  to  $+150^\circ\text{C}$

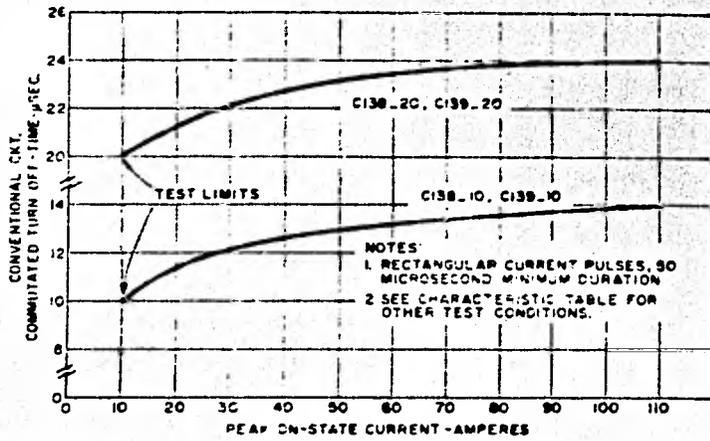
Operating Temperature,  $T_j$  . . . . .  $-65^\circ\text{C}$  to  $+125^\circ\text{C}$

Maximum Stud Torque . . . . . 30 Lb-in (35 Kg-cm)

## CHARACTERISTICS

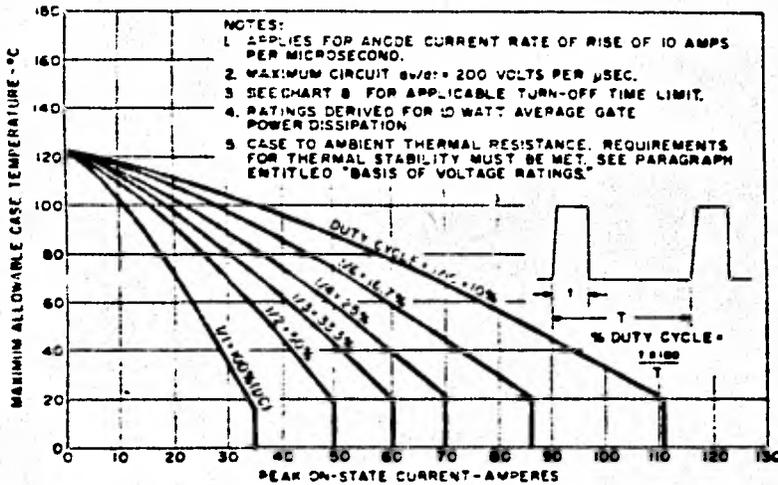
Test	Symbol	Min.	Max.	Units	Test Conditions
Peak Off-State Current (2)(6) C139E10E, C139E20E C138E10E, C138E20E C139M10M, C139M20M C138M10M, C138M20M C139S10M, C139S20M C138S10M, C138S20M C139N10M, C139N20M C138N10M, C138N20M	$I_{ORM}$	-	4.7	mA	$T_C = -65^\circ\text{C to } +125^\circ\text{C}$ $V_{ORM} = 500$ Volts Peak 500 " " 600 " " 600 " " 700 " " 700 " " 800 " " 800 " "
Peak Reverse Current (2)(6) C139E10E, C139E20E C138E10E, C138E20E C139M10M, C139M20M C138M10M, C138M20M C139S10M, C139S20M C138S10M, C138S20M C139N10M, C139N20M C138N10M, C138N20M	$I_{RRM}$	-	8.5	mA	$T_C = -65^\circ\text{C to } +125^\circ\text{C}$ $V_{RRM} = 500$ Volts Peak 50 " " 600 " " 50 " " 600 " " 50 " " 600 " " 50 " "
Critical Rate of Rise of Off-State Voltage	$dv/dt$	200	-	Volts. $\mu\text{sec}$	$T_C = 125^\circ\text{C}$ , Rated $V_{ORM}$ , Gate Open Circuited, Exponential Waveform
D.C. Gate Trigger Current	$I_{GT}$	-	180 500	mA dc	$T_C = 25^\circ\text{C}$ , $V_D = 6$ Vdc, $R_L = 4$ ohms $T_C = -65^\circ\text{C}$ , $V_D = 6$ Vdc, $R_L = 2$ ohms
D.C. Gate Trigger Voltage	$V_{GT}$	- 0.25	3.0 4.5	Vdc	$T_C = 25^\circ\text{C}$ , $V_D = 6$ Volts, $R_L = 4$ ohms $T_C = -65^\circ\text{C}$ , $V_D = 6$ Volts, $R_L = 2$ ohms $T_C = 125^\circ\text{C}$ , Rated $V_{ORM}$ , $R_L = 500$ ohms
Peak On-State Voltage	$V_{TM}$	-	4.0	Volts	$T_C = 25^\circ\text{C}$ , $I_{TM} = 100$ A Peak, $\geq 1. \leq 2$ msec. wide pulse. Duty cycle $\leq 2\%$ .
Holding Current	$I_M$	-	150 350	mA dc	Anode Source Voltage = 24 Vdc Peak Initiating On-State Current = 3A, 0.1 to 10 msec pulse. $T_C = 25^\circ\text{C}$ , Gate source = 10V, Open Circuit, 20 ohms, 100 $\mu\text{sec}$ pulse $T_C = -65^\circ\text{C}$ , Gate source = 20V, Open Circuit, 20 ohms, 100 $\mu\text{sec}$ pulse.
Pulse Circuit Commutated Turn-Off Time C138 - 10, C139 - 10, Types C138 - 20, C139 - 20, Types	$t_{off}$ (pulse)	-	10 20	$\mu\text{sec}$ $\mu\text{sec}$	$T_C = 115^\circ\text{C}$ , $I_{TM} = 100$ A Peak Approximate- ly Sinusoidal Current Waveform. See Chart for time references. On-State Current Pulse Time to peak ( $t_2 - t_1$ ) = 1.0 $\mu\text{sec}$ , On-State Current Pulse Base ( $t_3 - t_1$ ) = 2.0 $\mu\text{sec}$ (+0.5 - 0 $\mu\text{sec}$ ). Repetition Rate = 400 PPS, PRV ( $t_4$ ) = 250 Volts max, Reverse voltage: $t_{tr}$ : C138 (with inv. para. diode) = 1 Volt, C139 = 30 Volts, Peak Off-State Voltage ( $t_6$ ) = Rated $V_{ORM}$ , Peak Off-State Voltage ( $t_6$ ) equals: 500 Volts for 500 Volt types; 600 Volts for 600, 700 and 800 Volt types, Rate of Rise of Re-applied Off-State Voltage (Linear Ramp): ( $t_6$ to $t_8$ ) = 200 Volts per $\mu\text{sec}$ , Gate Trigger Pulse = 20 Volts, 20 ohms, Gate Trigger Pulse Width (90% points) = 1.5 $\mu\text{sec}$ , Gate Trigger Pulse Rise Time (10% to 90%) = 0.1 $\mu\text{sec}$ , Gate Bias during Turn-Off time interval = 0 Volts, 20 ohms.





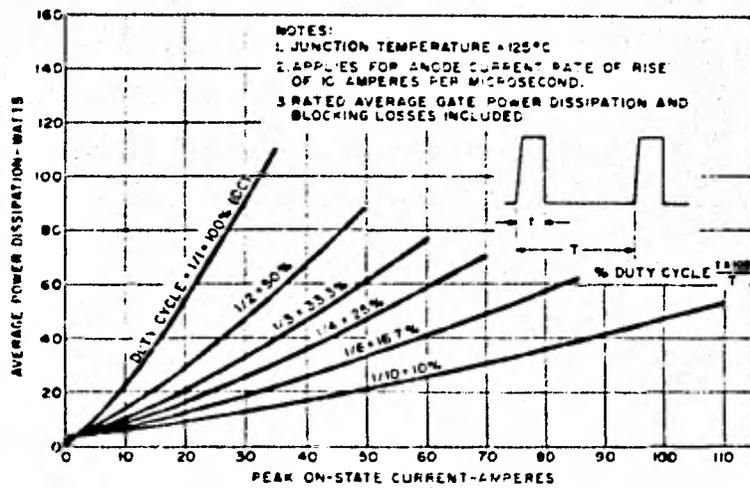
This chart gives the guaranteed maximum turn-off time of the C138 and C139 as a function of the on-state current. The use of this chart is necessary for rectangular anode current pulses of the specified pulse width and frequency.

8. Maximum Conventional Circuit-Commutated Turn-Off Time vs Peak On-State Current



This chart is used when the SCR is carrying rectangular current with no significant turn-on switching duty.

9. Maximum Allowable Case Temperature For Rectangular Current Waveform



This chart provides a rapid means of determining SCR dissipation with low values of di/dt.

10. Average Power Dissipation For Rectangular Current Waveform

Checando que la  $\frac{dV}{dt}$  no sea rebasada, con la corriente seleccionada, se procedió a calcular la misma:

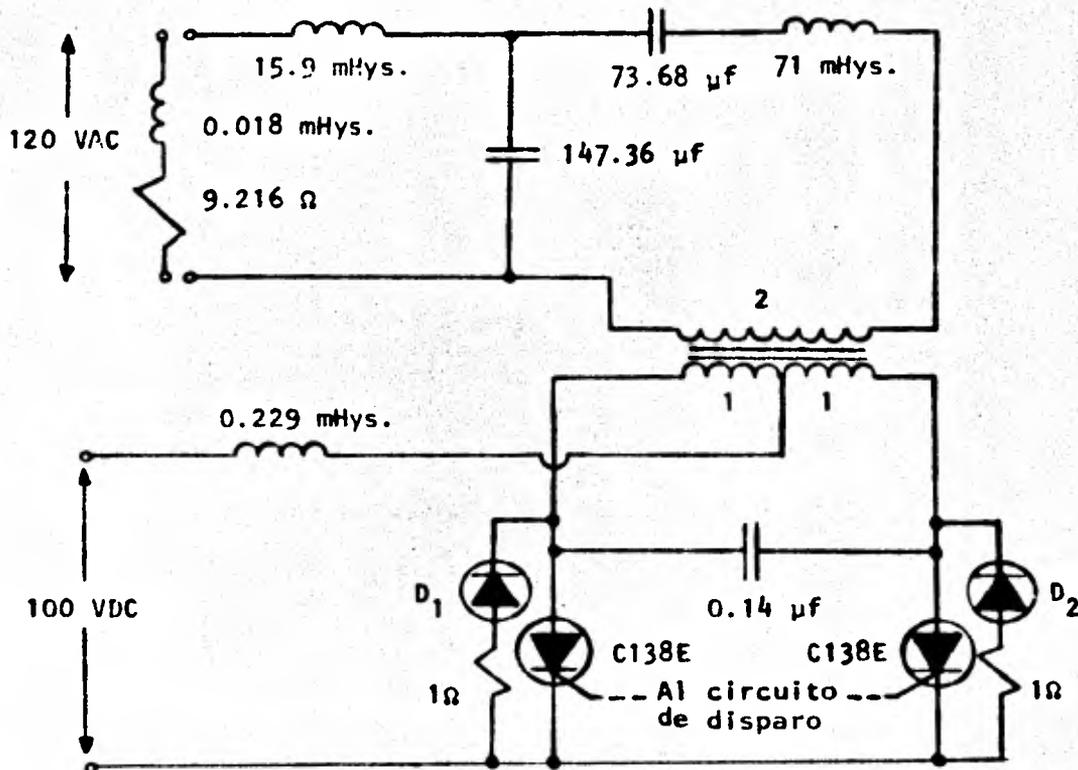
$$\frac{dV}{dt} = \frac{3.44 E_D^2}{L_i I_{pico}} = \frac{3.44(100)^2}{229.18 \times 10^{-6} (10)} = 15 \text{ Volts}/\mu\text{seg.}$$

La cual es permisible.

El Condensador para la conmutación de los SCR's es:

$$C_i = \frac{3t_a I_{pico}}{8 \eta E_D} = \frac{3(12)(10)}{8 \eta 100} = 0.14 \times 10^{-6} \text{ farads o } 0.14 \mu\text{f}$$

De todos los calculos anteriores, el circuito inversor quedó como lo muestra la figura IV.3.5,1.



- NOTA: Es recomendable que  $D_1$  y  $D_2$  se seleccionen de la misma capacidad que los tífistores en cuanto a corriente.

Figura IV.3.5,1. Circuito inversor diseñado para la conversión de DC, proveniente de las fotoceldas, a AC.

#### IV.4.1 CIRCUITO DE CONTROL O DE DISPARO DEL INVERSOR

Para el disparo de los SCR's del circuito inversor, es necesario un circuito adicional que llamaremos de control o de disparo, en el cual intervienen los transistores unijuntura mencionados en la sección IV.2.1.

Para el circuito mencionado, los manuales de la "Texas Instruments" y de la "General Electric" recomiendan, para un disparo efectivo, la utilización de un "Multivibrador Astable" para la generación de pulsos con una frecuencia de 60 Hz.

Los pulsos del Multivibrador, a la frecuencia mencionada, permitirán a los transistores unijuntura enviar varios pulsos de disparo a los SCR's durante el tiempo de duración de cada pulso del multivibrador.

El diseño del multivibrador estará en base al circuito mostrado en la figura IV.4.1,1.

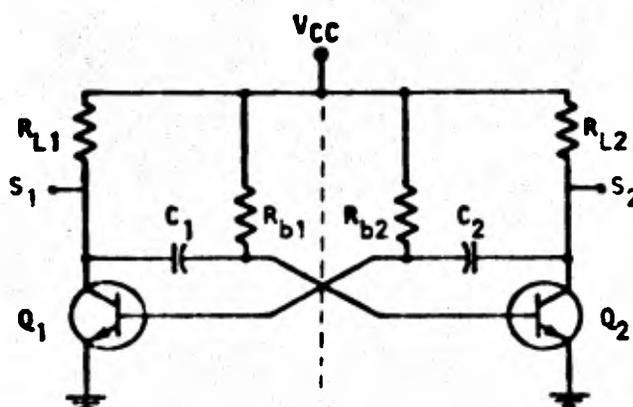


Figura IV.4.1,1. Circuito Multivibrador Astable .

La línea punteada divide al circuito en dos partes simétricas, esto es,  $Q_1=Q_2$ ,  $C_1=C_2$ ,  $R_{b1}=R_{b2}$  y  $R_{L1}=R_{L2}$ . Lo anterior es con el propósito de contar con dos pulsos  $S_1$  y  $S_2$ , de la misma magnitud y du-

ración de tiempo.

Para poder contar con un tiempo de respuesta corto del multi - vibrador, es recomendable manejar corrientes de saturación relativamente pequeñas.

La pendiente de la recta de carga del transistor seleccionado, que es el 2N3416 de la General Electric, y que es representada sobre la grafica  $V_{CE}-I_C$  mostrada en la figura IV.4.1,2, se calcula -- por medio de la ecuación IV.4.1,1.

$$V_{CC} - V_{CE(sat)} = R_L I_C(sat) \quad \text{IV.4.1,1.}$$

Donde :

$$V_{CC} = 28 \text{ Volts}$$

$$V_{CE(sat)} = 0.3 \text{ Volts para el 2N3416}$$

$$I_C(sat) = 27.9 \text{ mAmps.}$$

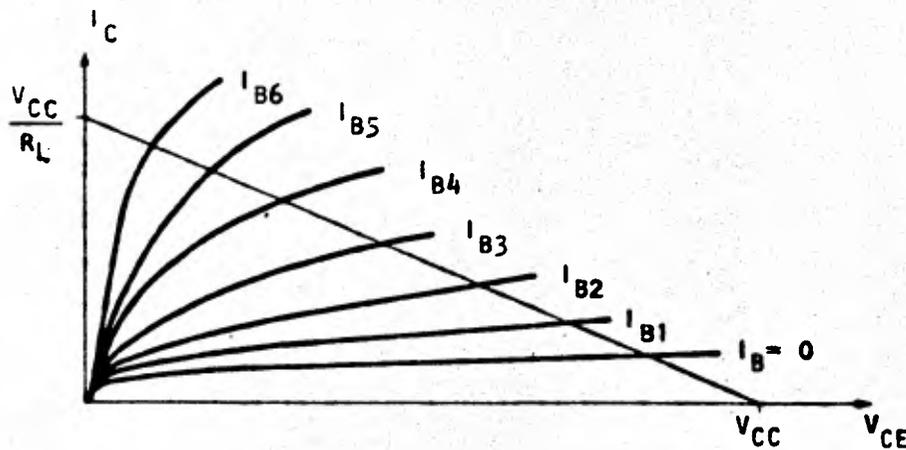


Figura IV.4.1,1. Gráfica  $V_{CE}-I_C$ , mostrándose la recta de carga. -

Las resistencias  $R_{L1}$  y  $R_{L2}$  pueden ser obtenidas de la ecuación-IV.4.1,1, como se muestra a continuación:

$$28 - 0.3 = R_L (27.9 \times 10^{-3})$$

$$R_L = \frac{28 - 0.3}{27.9 \times 10^{-6}} = 1 \text{ K}\Omega$$

Por lo tanto  $R_{L1}$  y  $R_{L2}$  serán igual a  $R_L$  o sea, igual a  $1 \text{ K}\Omega$ , las cuales definirán los puntos principales de trabajo para el multivibrador, que como se sabe, son saturación y corte.

Para calcular la corriente de base  $I_B$ , la tomaremos de la relación  $I_C(\text{sat}) = I_B(\text{sat}) \times \beta_{\text{min}}$ . Para estos transistores la  $\beta_{\text{min}}$  es igual a 75, por lo tanto:

$$I_B(\text{sat}) = \frac{27 \times 10^{-3}}{75} = 0.36 \text{ mAmps.}$$

Sin embargo, para asegurar la saturación de los transistores  $Q_1$  y  $Q_2$  se escogerá una corriente de base mayor a la obtenida anteriormente, la cual será de  $0.45 \text{ mAmps}$ .

La ecuación IV.4.1,2 nos permitirá calcular las resistencias de base  $R_{b1}$  y  $R_{b2}$ , siendo mostrada a continuación.

$$V_{CC} - V_{BE(\text{sat})} = I_B R_B \quad \text{IV.4.1,2}$$

De donde;

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE(\text{sat})}}{I_B(\text{sat})} = \frac{28 - 0.83}{0.45 \times 10^{-3}} = 60 \text{ K}\Omega$$

Por lo tanto  $R_{b1}$  y  $R_{b2}$  serán igual a  $R_B$  esto es, igual a  $60 \text{ K}\Omega$

Como siguiente paso, se seleccionarán los condensadores  $C_1$  y mediante la ecuación IV.4.1,3.

$$R_B C = \frac{t_{\text{off}}}{\ln 2} = 1.44 t_{\text{off}} \quad \text{IV.4.1,3}$$

Como el sistema de disparo es el que fija la frecuencia de operación del inversor a  $60 \text{ Hz}$  o ciclos por segundo, tendremos un ci

clo en  $1/60$  de segundo. El multivibrador envía dos pulsos, de las salidas  $S_1$  y  $S_2$ , en cada ciclo del inversor o sea, en  $1/60$  de segundo, siendo la duración de los pulsos de las salidas  $S_1$  y  $S_2$  igual a  $1/120$  de segundo.

De lo anterior, el tiempo  $t_{off}$  o tiempo entre dos pulsos de la salida  $S_1$ , que es el mismo para la salida  $S_2$ , será igual a  $1/120$  de segundo. De la ecuación IV.4.1,3 tendremos:

$$C = \frac{1.44 \left( \frac{1}{120} \right)}{60 \times 10^{-3}} = 2 \times 10^{-7} \text{ farads.}$$

Por lo tanto,  $C_1$  y  $C_2$  serán igual a  $C$  o sea, igual a  $2 \mu\text{farads}$ .

De los calculos anteriormente expuestos, las formas de onda del circuito multivibrador serán las mostradas en la figura IV.4.1,3.

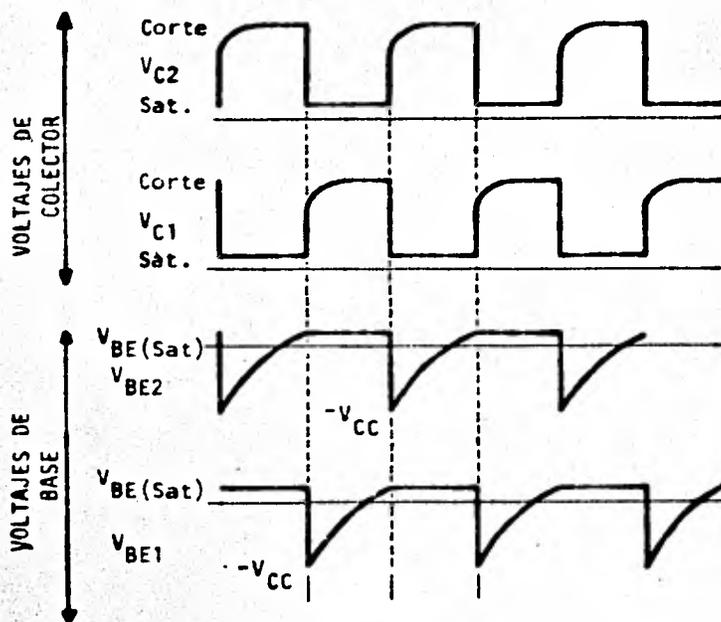
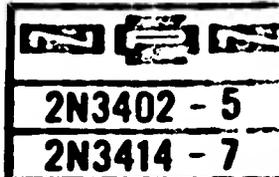


Figura IV.4.1,3. Formas de onda del circuito Multivibrador

Las características de los transistores  $Q_1$  y  $Q_2$  serán mostradas a continuación.

# Silicon Transistors

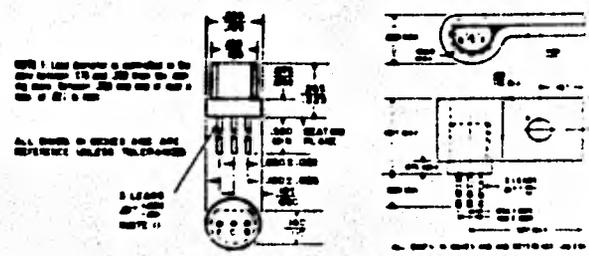
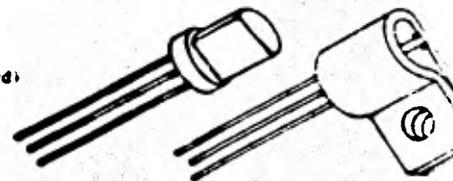


2N3638 SEE GES363  
2N3649-58 SEE C140 SERI

The General Electric Types 2N3402-2N3405 and 2N3414-2N3417 are NPN silicon planar epitaxial passivated transistors intended for general purpose industrial circuits. These transistors are especially suited for high level linear amplifiers or medium speed switching circuits in industrial control applications

## absolute maximum ratings: (25°C) (unless otherwise specified)

	2N3402,3 2N3414,15	2N3404,5 2N3416,17
<b>Voltage</b>		
Collector to Emitter	$V_{ce0}$ 25	50 V
Emitter to Base	$V_{be0}$ 5	5 V
Collector to Base	$V_{cb0}$ 25	50 V
<b>Current</b>		
Collector (Steady State)*	$I_c$ 500	500 ma
<b>Dissipation</b>		
Heatsink @ 25°C (2N3402-5)**	$P_T$ 300	mW
Total Power (Free Air @ 25°C)†	$P_T$ 500	mW
(2N3402-5)		
Total Power (Free Air @ 25°C)‡	$P_T$ 360	mW
(2N3414-17)		
Total Power (Free Air @ 65°C)‡	$P_T$ 300	mW
(2N3414-17)		
<b>Temperature</b>		
Storage	$T_{stg}$ -55 to +150	°C
Operating	$T_j$ +150	°C
Lead Soldering, $\frac{1}{16}$ " $\pm$ $\frac{1}{32}$ " from case for 10 seconds max.	$T_L$ -200	°C



\*Determined from power limitations due to saturation voltage at this current.  
†Derate 7.2 mw/°C increase in case temperature above 25°C.

‡Derate 4.47 mw/°C increase in ambient temperature above 25°C.  
§Derate 2.67 mw/°C increase in ambient temperature above 25°C.

## electrical characteristics: (25°C)

(unless otherwise specified)

### DC CHARACTERISTICS

	2N3402,3 2N3414,5	2N3404,5 2N3416,7
Collector Cutoff Current ( $V_{ce} = 25V$ ) ( $V_{be} = 25V, T_a = 100^\circ C$ )	$I_{c0}$	0.1 15
Collector Cutoff Current ( $V_{ce} = 50V$ ) ( $V_{be} = 50V, T_a = 100^\circ C$ )	$I_{c0}$	0.1 15
Emitter Cutoff Current ( $V_{eb} = 5V$ )	$I_{e0}$	0.1 0.30
Collector Saturation Voltage ( $I_b = 3\text{ ma}, I_c = 50\text{ ma}$ )	$V_{ce(sat)}$	0.30 0.85
Base Saturation Voltage ( $I_b = 3\text{ ma}, I_c = 50\text{ ma}$ )	$V_{be(sat)}$	0.85

Forward Current Transfer Ratio ( $V_{ce} = 4.5V, I_c = 2\text{ ma}$ )

### SMALL SIGNAL CHARACTERISTICS

Forward Current Transfer Ratio Collector Voltage,  $V_{ce} = 4.5V$ , Frequency of measurement = 1000 cps

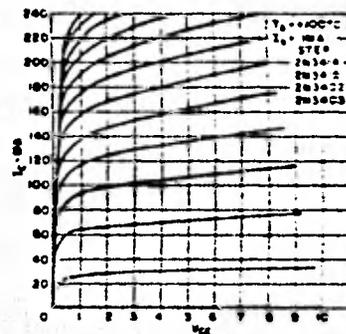
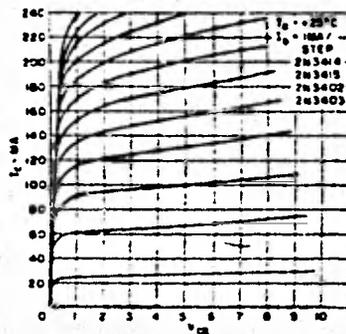
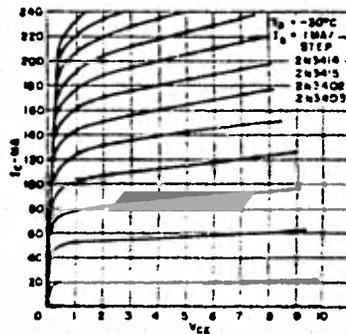
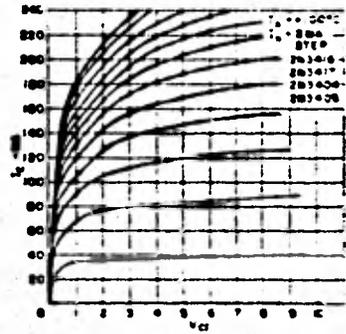
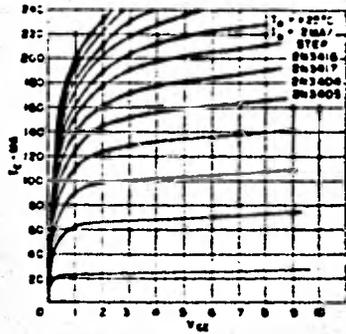
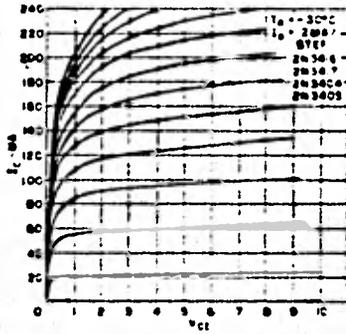
$V_{ce} = 10V; I_c = 1\text{ ma}; f = 1\text{ Kc}; T_a = 25^\circ C$

	2N3402,4 2N3414,6	2N3403,5 2N3415,7
Forward Current Transfer Ratio	75	180
Input Impedance	2N3402: 5100 2N3414: 21	2N3403: 4200 2N3415: 10
Output Admittance	2N3402: 14 2N3414: .27	2N3403: 21 2N3415: .45
Voltage Feedback Ratio	2N3402: 180 2N3414: 330	2N3403: 150 2N3415: 300

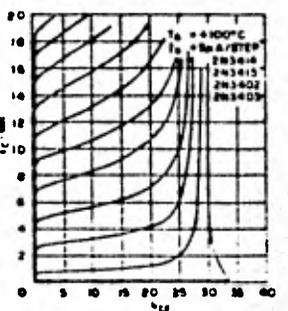
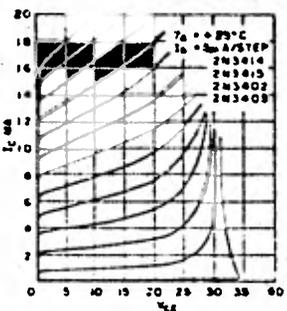
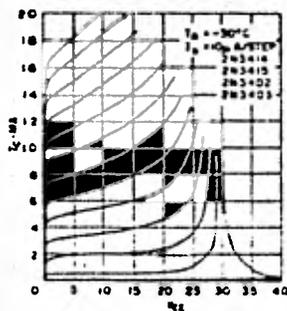
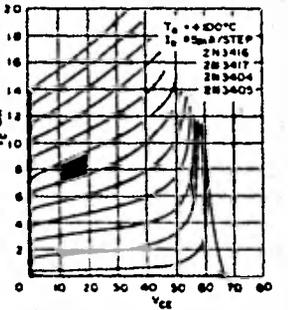
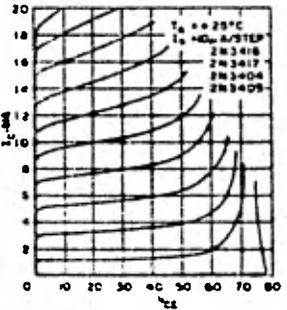
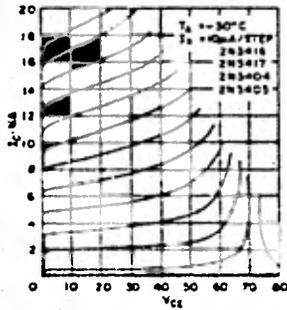
2N3402-5  
2N3414-7

# Typical Common Emitter Collector Current Characteristic Curves

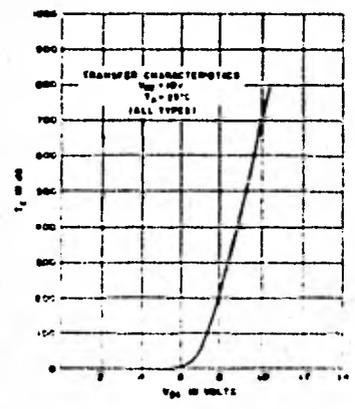
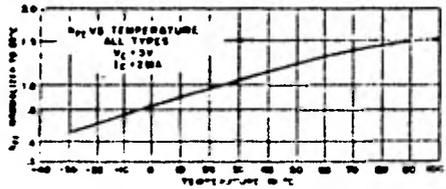
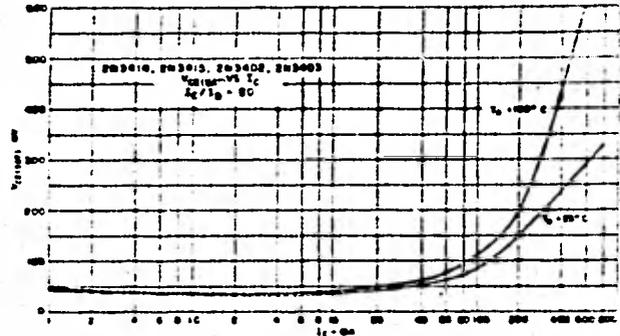
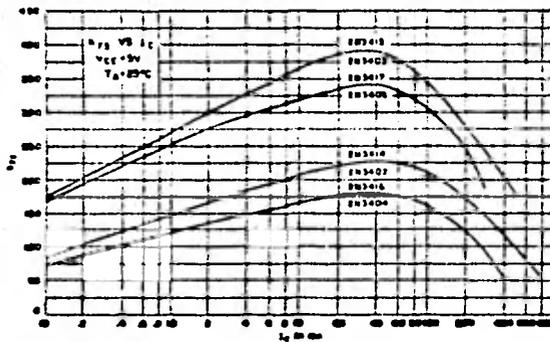
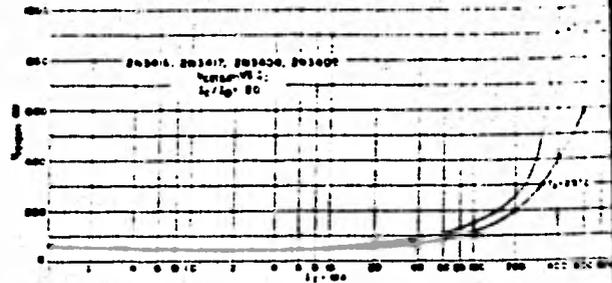
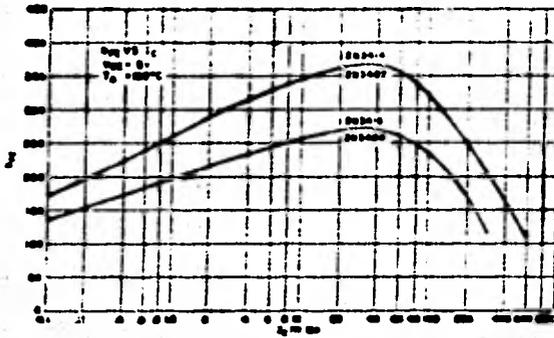
295



## Typical Common Emitter Characteristic Curves



**2N3402-5**  
**2N3414-7**



El segundo paso para el diseño del circuito de disparo, es seleccionar el circuito del UJT. El transistor UJT escogido para el voltaje utilizado (28 Volts) es el 2N2647, el cual tiene las siguientes características:

Corriente de Emisor (RMS)	50 mAmp.
Potencia Disipada	300 mWatts.
Corriente Pico de Emisor	2 Amp.
Voltaje Inverso de Emisor	30 Volts
Voltaje Interbase $V_{BB}$	35 Volts
Relación Intrínseca $n$	$0.68 < n < 0.82$ $n_{típica} = 0.77$
Resistencia Interbase $R_{BB}$	$4.7K\Omega < R_{BB} < 9.1K\Omega$ $R_{BBtípica} = 6.7 K\Omega$

Así mismo, se anexan las hojas de especificaciones.

- Cálculo de  $R_{B2ex}$ .

$$R_{B2ex} = \frac{10000}{n V_{BB}} = \frac{10000}{0.77(28)} = 462 \Omega$$

- Cálculo de  $R_{B1ex}$

$$V_{Gm\acute{a}x} \geq \frac{V_{BB}}{R_{BBm\acute{i}n} + R_{B2ex} + R_{B1ex}} \cdot R_{B1ex}$$

$$R_{B1ex} \leq \frac{V_{Gm\acute{a}x} (R_{BBm\acute{i}n} + R_{B2ex})}{V_{BB} - V_{Gm\acute{a}x}}$$

Donde  $V_{Gm\acute{a}x}$  es el valor máximo del voltaje aplicado a la puerta o gate del SCR que no dispara al mismo, cuyo valor aproximado es de 0.25 Volts.

Por lo tanto  $R_{B1ex}$  es igual a:

$$R_{B1ex} = \frac{0.25 (4700 + 462)}{28 - 0.25} = 47 \Omega$$

- Cálculo de  $C_{ujt}$

Para obtener el valor de  $C_{ujt}$ , se calculará primero el valor de  $V_{BB}$ , mediante:

$$V_{BB} = \frac{V_{CC} R_{BB}}{R_{BB} + R_{Blex} + R_{B2ex}} = \frac{(28)(6700)}{6700 + 47 + 462} = 26 \text{ Volts}$$

Con este valor y auxiliados por la gráfica de la figura 25 de las hojas de datos anexas del manual de la General Electric, referentes al UJT, se obtiene un valor normalizado de  $V_{BB}$  de 1.3. Con este valor y el de  $R_{Blex}$  se encuentra  $C_{ujt}$  en la figura 24 de la hoja mencionada, siendo su valor de:

$$C_{ujt} = 0.15 \text{ } \mu\text{farads}$$

- Cálculo de  $R_{ujt}$

De la ecuación IV.4.1.4 se tendrá que para colocar 10 pulsos de disparo del UJT, dentro de cada pulso del multivibrador deberá tenerse una frecuencia de 1200 Hz, como se muestra en la figura IV.4.1.4.

$$T = \frac{1}{f} = R_{ujt} C_{ujt} \ln \frac{1}{1-n}$$

Donde:

$$f = 1200 \text{ Hz}$$

$$C_{ujt} = 0.15 \times 10^{-6}$$

$$n = 0.77$$

Por lo tanto  $R_{ujt}$  será igual a:

$$R_{ujt} = \frac{1}{f C_{ujt} \ln \frac{1}{1-n}} = \frac{1}{(1200)(0.15) \ln 4.35} = 3.8 \text{ K}\Omega$$

# Silicon Unijunction Transistors



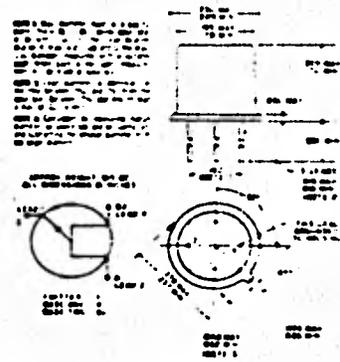
The General Electric 2N2646 and 2N2647 Silicon Unijunction Transistors have an entirely new structure resulting in lower saturation voltage, peak-point current and valley current as well as a much higher base-one peak pulse voltage. In addition, these devices are much faster switches.

The 2N2646 is intended for general purpose industrial applications where circuit economy is of primary importance, and is ideal for use in firing circuits for Silicon Controlled Rectifiers and other applications where a guaranteed minimum pulse amplitude is required. The 2N2647 is intended for applications where a low emitter leakage current and a low peak point emitter current (trigger currents) are required (i.e. long timing applications), and also for triggering high power SCR's.



## absolute maximum ratings: (25°C) (unless otherwise specified)

Power Dissipation (Note 1)	300 mw
RMS Emitter Current	50 ma
Peak Emitter Current (Note 2)	2 amperes
Emitter Reverse Voltage	30 volts
Interbase Voltage	35 volts
Operating Temperature Range	-65°C to +125°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C



## electrical characteristics: (25°C) (unless otherwise specified)

PARAMETER	2N2646			2N2647			Units
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
Intrinsic Standoff Ratio ( $V_{BB} = 10V$ )	0.54	0.69	0.75	0.68	0.77	0.82	
Interbase Resistance ( $V_{BB} = 3V, I_E = 0$ )	4.7	6.7	9.1	4.7	6.7	9.1	KΩ
Emitter Saturation Voltage ( $V_{BB} = 10V, I_E = 50\text{ ma}$ )		2			2		volts
Modulated Interbase Current ( $V_{BB} = 10V, I_E = 50\text{ ma}$ )		24			27		ma
Emitter Reverse Current ( $V_{BB} = 30V, I_{B1} = 0$ )		.001	12		.001	.200	ma
Peak Point Emitter Current ( $V_{BB} = 25V$ )		0.8	5		1.0	2	ma
Valley Point Current ( $V_{BB} = 20V, R_{B1} = 100Ω$ )	4	5		8	9	18	ma
Base-One Peak Pulse Voltage (Note 3)							volts
SCR Firing Conditions (See Figure 26, back page)	3.0	5.5		6.0	9.5		

- Derate 3.0 MW/°C increase in ambient temperature. The total power dissipation (available power to Emitter and Base-Two) must be limited by the external circuitry.
- Capacitor discharge—10μF or less, 30 volts or less.
- The Base-One Peak Pulse Voltage is measured in the circuit below. The specification on the 2N2646 and 2N2647 is used to ensure a minimum pulse amplitude for applications in SCR firing circuits and other types of pulse circuits.
- The intrinsic standoff ratio,  $\eta$ , is essentially constant with temperature and interbase voltage.  $\eta$  is defined by the equation:  

$$\eta = \frac{V_P}{V_{BB} + V_P}$$
 Where  $V_P$  = Peak Point Emitter Voltage  
 $V_{BB}$  = Interbase Voltage  
 $V_D$  = Junction Diode Drop (Approx. .3V)

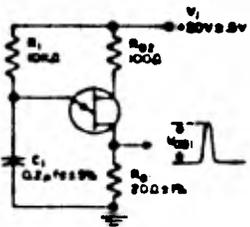


FIGURE 1

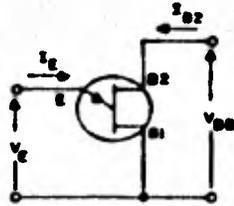


FIGURE 2  
Unijunction Transistor Symbol with Nomenclature used for voltage and currents.

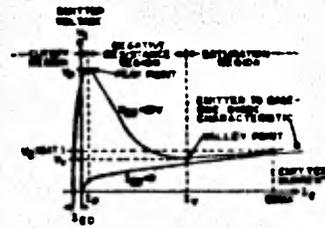


FIGURE 3  
Some Emitter Characteristics curves showing important parameters and interbase points (referenced to one zero).

T<sub>A</sub> = 125°C

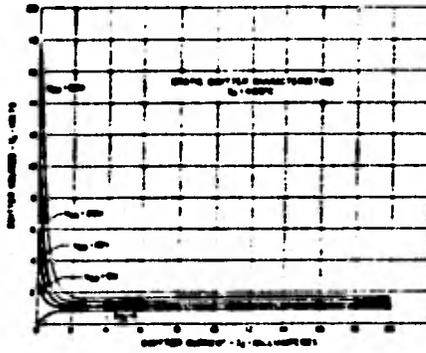


FIGURE 4

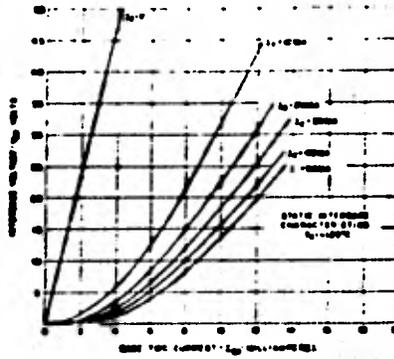


FIGURE 5

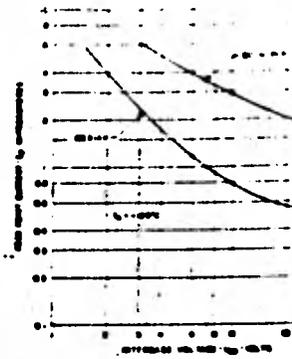


FIGURE 6

T<sub>A</sub> = 25°C

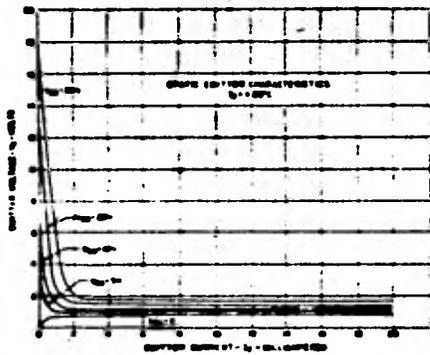


FIGURE 7

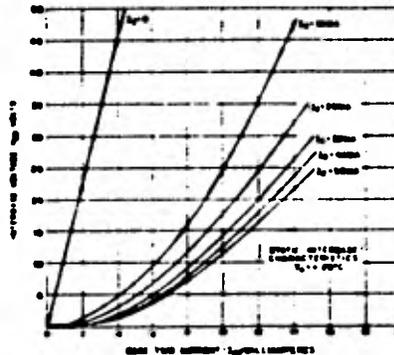


FIGURE 8

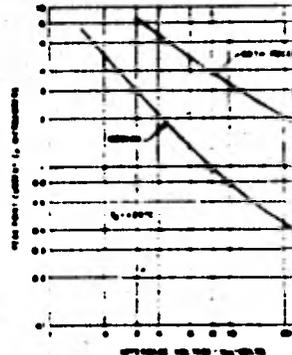


FIGURE 9

T<sub>A</sub> = -55°C

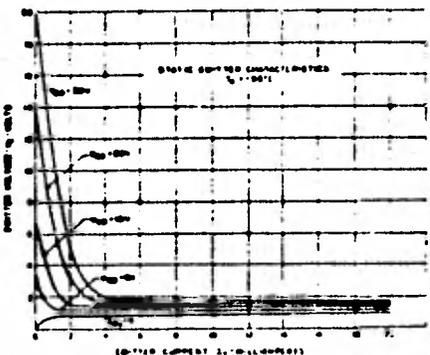


FIGURE 10

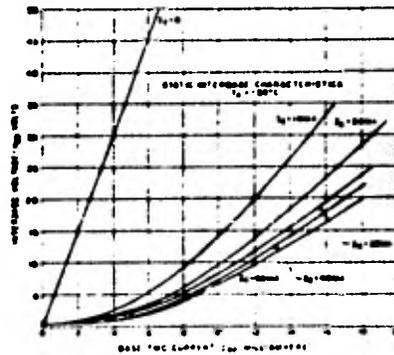


FIGURE 11

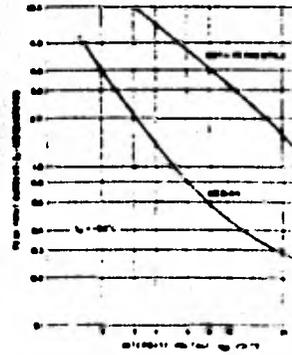


FIGURE 12

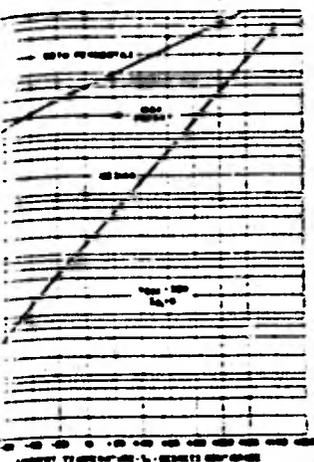


FIGURE 13

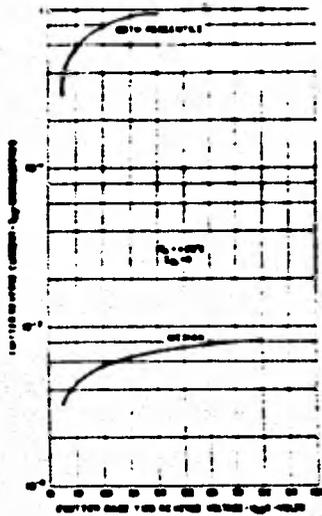


FIGURE 14

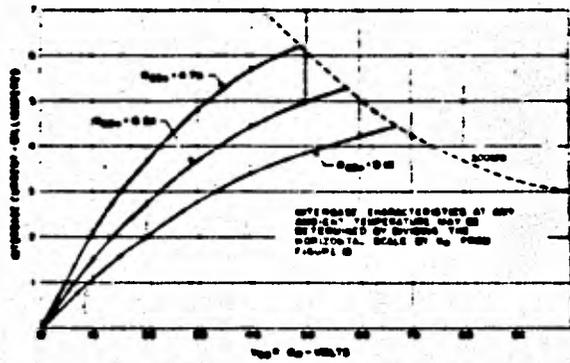


FIGURE 15

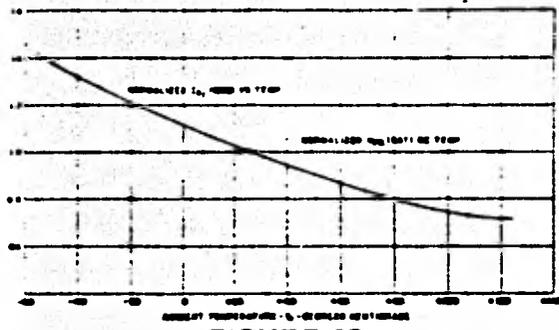


FIGURE 16

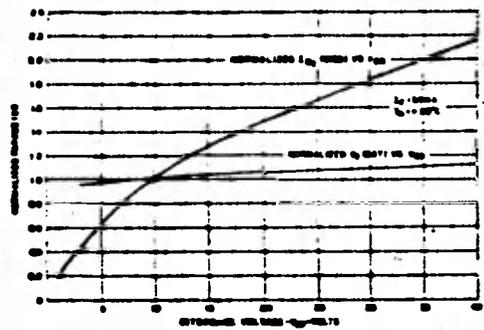


FIGURE 17

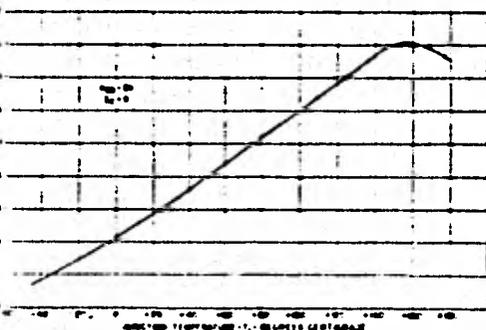


FIGURE 18

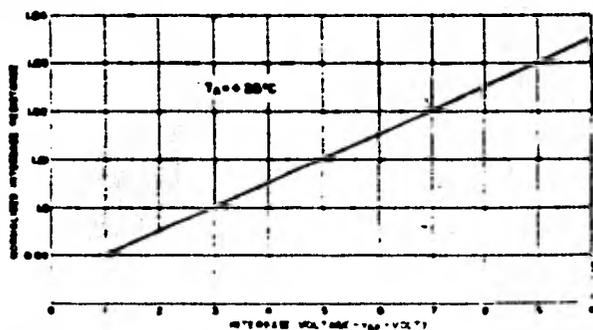


FIGURE 19

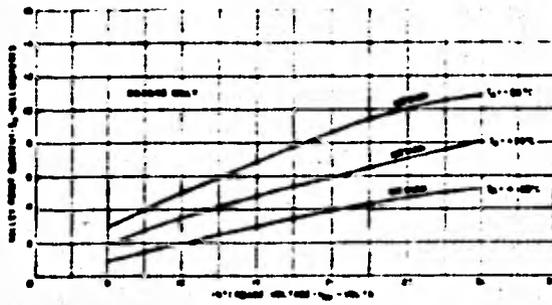


FIGURE 20

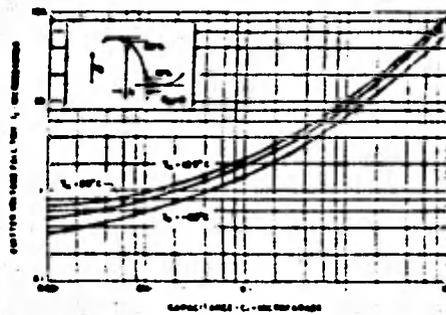


FIGURE 22

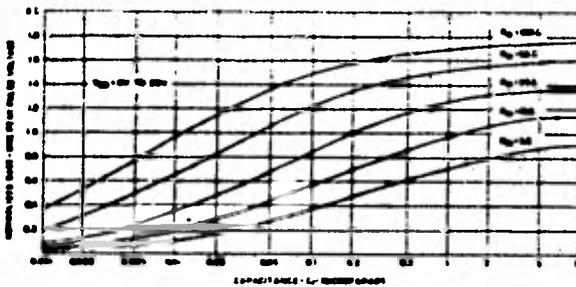


FIGURE 24

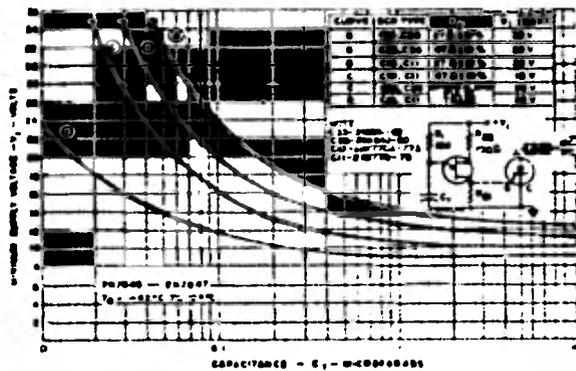


FIGURE 26A-Both types- Lo & med. SCR's

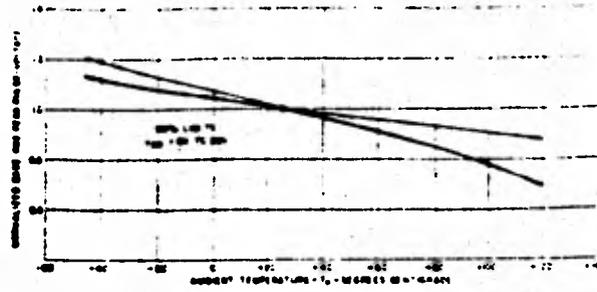


FIGURE 21

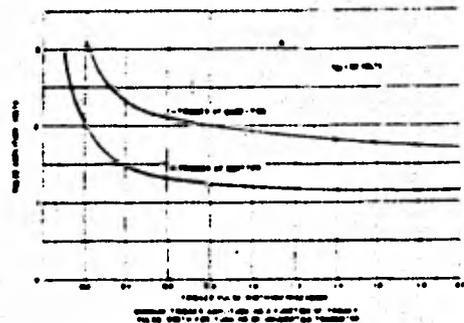


FIGURE 23

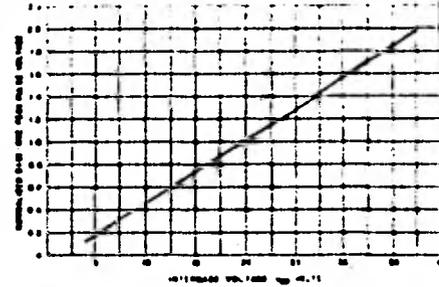


FIGURE 25

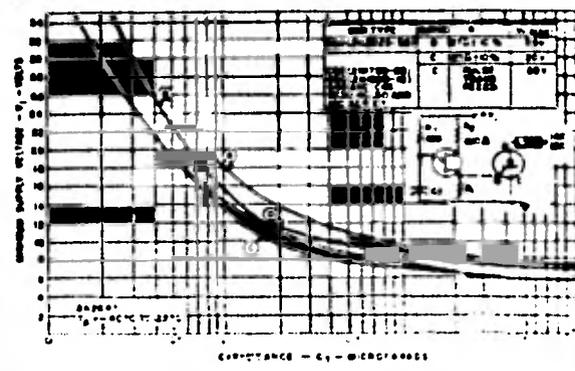


FIGURE 26B-2N2647-HI Current SCR's

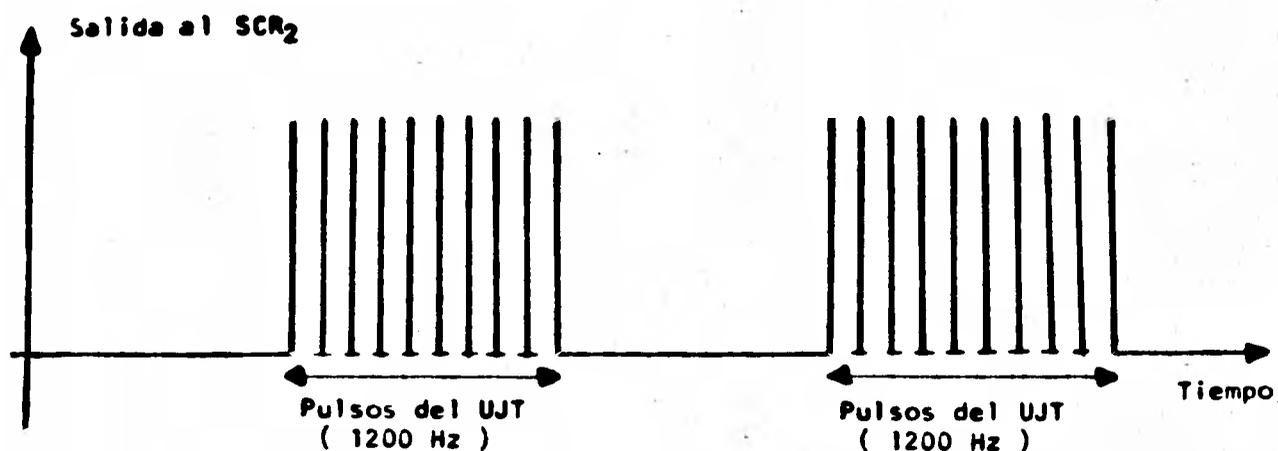
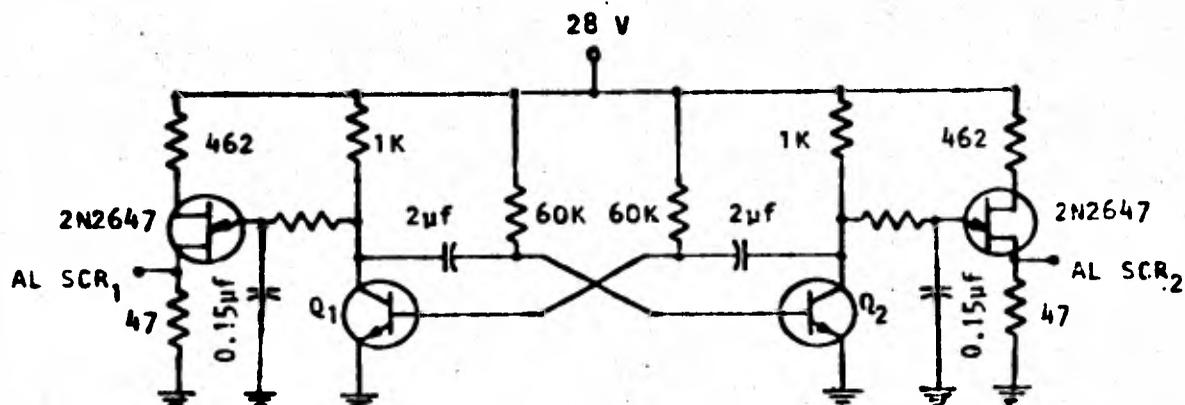


Figura IV.4.1.4. Forma de onda de la salida al SCR<sub>2</sub>.

De los cálculos anteriormente efectuados para el circuito de control o de disparo, la figura IV.4.1.5 muestra el arreglo total del circuito mencionado.



Q<sub>1</sub> y Q<sub>2</sub>: Transistores NPN 2N3416

Figura IV.4.1.5. Circuito de disparo de los SCR's del Inversor.

A P E N D I C E A

PROGRAMAS PARA EL DISEÑO Y SIMULACION.

- A.1. SOLAR I
- A.2. SOLAR II
- A.3. SOLAR III
- A.4. SOLAR IV
- A.5. SOLAR V

ESTOS PROGRAMAS SE DISEÑARON PARA EFECTUARLOS EN UNA CALCULA\_  
LADORA TEXAS INSTRUMENT TI-59 Y UNA IMPRESORA PC-100C.

### A.1 PROGRAMA SOLAR I

#### Descripción del programa:

Este programa sirve para calcular los siguientes parámetros:

La declinación (DECL), el ángulo de incidencia (TETA), la longitud del día (LD), la relación de la radiación directa sobre una superficie inclinada a la radiación sobre una superficie horizontal (RB), la relación de la radiación total horaria a la radiación total media diaria (RT), la componente difusa de la radiación horaria (ID), la componente directa de la radiación horaria (IB), y la radiación total horaria sobre una superficie inclinada (IT).

#### Instrucciones para su uso:

Introducir	Oprimir la tecla	Resultado
1) Día del año (n).	→ A →	DECL *
2) Hora del día (Hrs. Min.)	→ B →	TETA
		→ LD
		→ RB
		→ RT
		→ ID **
		→ IB **
		→ IT **

#### Introducir en la memoria:

00 → Reflectancia del suelo ( $\rho$ ).

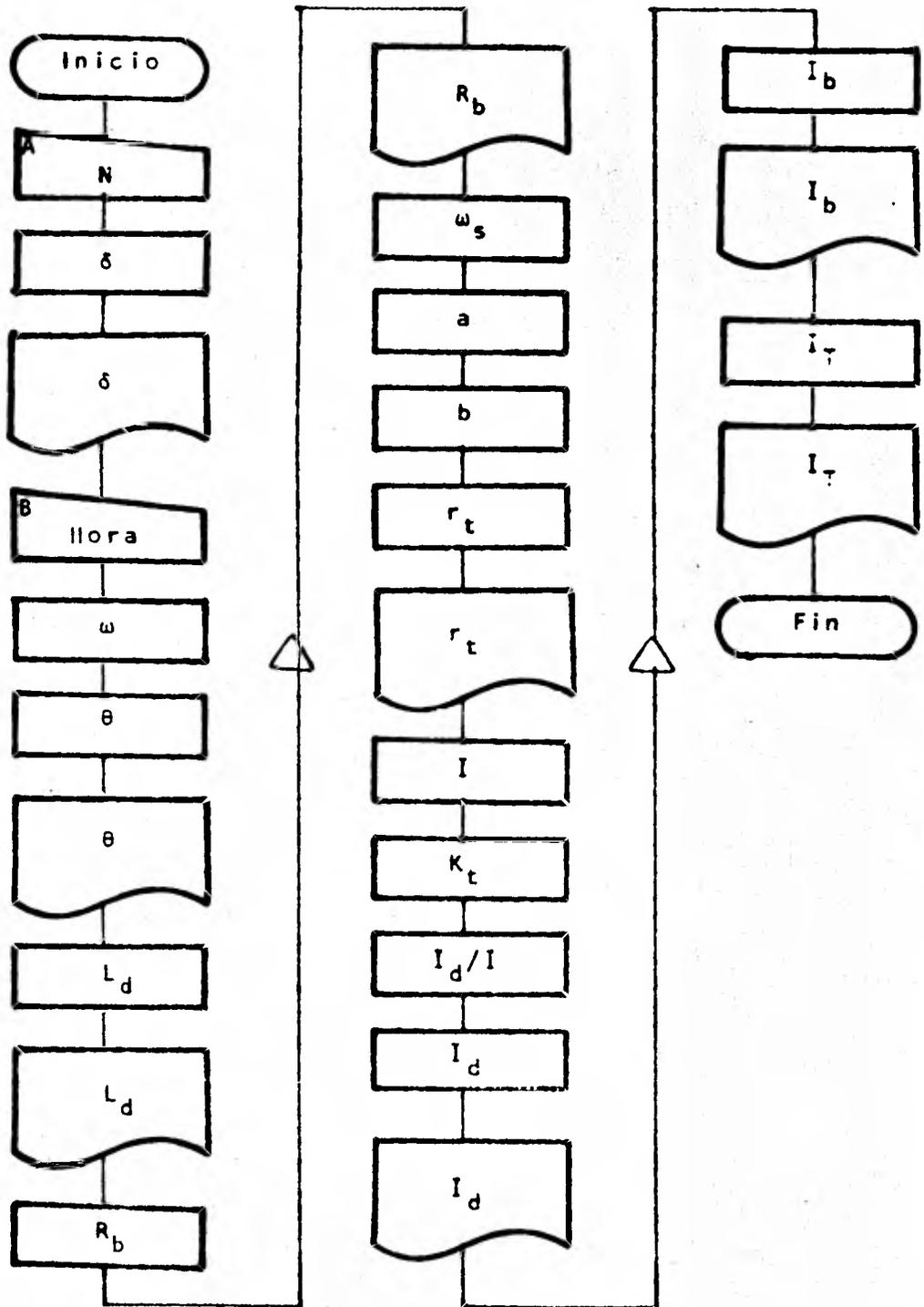
- 03 → Latitud del lugar ( $\phi$ ) ( $^{\circ}$ )
- 04 → Inclinación del colector ( $\beta$ ) ( $^{\circ}$ )
- 05 → Angulo azimutal de la superficie ( $\gamma$ ) ( $^{\circ}$ )
- 14 → Radiación total media diaria (promedio mensual, H) ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )

Utilizar una partición de 799 pasos y 19 memorias.

\* Se calcula una sola vez para un periodo de un día.

\*\* ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )

DIAGRAMA DE FLUJO  
SOLAR I



000	76	LBL	049	43	RCL	099	65	+
001	11	A	050	06	06	100	43	RCL
002	42	STD	051	88	DMS	101	02	02
003	01	01	052	75	-	102	39	CDS
004	01	1	053	01	1	103	65	X
005	06	6	054	02	2	104	43	RCL
006	01	1	055	54	)	105	03	03
007	07	7	056	65	X	106	39	CDS
008	01	1	057	01	1	107	65	X
009	05	5	058	05	5	108	43	RCL
010	02	2	059	95	=	109	04	04
011	07	7	060	42	STD	110	39	CDS
012	69	DP	061	09	09	111	65	X
013	04	04	062	03	3	112	43	RCL
014	53	(	063	07	7	113	09	09
015	53	(	064	01	1	114	39	CDS
016	02	2	065	07	7	115	85	+
017	08	8	066	03	3	116	43	RCL
018	04	4	067	07	7	117	02	02
019	85	+	068	01	1	118	39	CDS
020	43	RCL	069	03	3	119	65	X
021	01	01	070	69	DP	120	43	RCL
022	54	)	071	04	04	121	03	03
023	55	+	072	43	RCL	122	38	SIN
024	03	3	073	02	02	123	65	X
025	06	6	074	38	SIN	124	43	RCL
026	05	5	075	65	X	125	04	04
027	65	X	076	43	RCL	126	38	SIN
028	03	3	077	03	03	127	65	X
029	06	6	078	38	SIN	128	43	RCL
030	00	0	079	65	X	129	05	05
031	54	)	080	43	RCL	130	39	CDS
032	38	SIN	081	04	04	131	65	X
033	65	X	082	39	CDS	132	43	RCL
034	02	2	083	75	-	133	09	09
035	03	3	084	43	RCL	134	39	CDS
036	93	.	085	02	02	135	85	+
037	04	4	086	38	SIN	136	43	RCL
038	05	5	087	65	X	137	02	02
039	95	=	088	43	RCL	138	39	CDS
040	69	DP	089	03	03	139	65	X
041	06	06	090	39	CDS	140	43	RCL
042	42	STD	091	65	X	141	04	04
043	02	02	092	43	RCL	142	38	SIN
044	91	R/S	093	04	04	143	65	X
045	76	LBL	094	38	SIN	144	43	RCL
046	12	8	095	65	X	145	05	05
047	42	STD	096	43	RCL	146	38	SIN
048	06	06	097	05	05	147	65	X
			098	39	CDS	148	43	RCL



298 65 X  
 299 43 RCL  
 300 10 10  
 301 39 COS  
 302 94 +/-  
 303 85 +  
 304 43 RCL  
 305 10 10  
 306 38 SIN  
 307 54 )  
 308 35 1/X  
 309 65 X  
 310 53 ( )  
 311 43 RCL  
 312 09 09  
 313 39 COS  
 314 75 -  
 315 43 RCL  
 316 10 10  
 317 39 COS  
 318 54 )  
 319 65 X  
 320 53 ( )  
 321 43 RCL  
 322 09 09  
 323 39 COS  
 324 65 X  
 325 43 RCL  
 326 12 12  
 327 85 +  
 328 43 RCL  
 329 11 11  
 330 54 )  
 331 65 X  
 332 89 R  
 333 55 +  
 334 02 2  
 335 04 4  
 336 95 =  
 337 42 STO  
 338 13 13  
 339 69 DP  
 340 06 06  
 341 02 2  
 342 04 4  
 343 01 1  
 344 06 6  
 345 69 DP  
 346 04 04  
 347 43 RCL

348 14 14  
 349 65 X  
 350 43 RCL  
 351 13 13  
 352 95 =  
 353 42 STO  
 354 15 15  
 355 53 ( )  
 356 53 ( )  
 357 53 ( )  
 358 03 3  
 359 06 6  
 360 00 0  
 361 65 X  
 362 43 RCL  
 363 01 01  
 364 55 +  
 365 03 3  
 366 06 6  
 367 05 5  
 368 54 )  
 369 39 COS  
 370 65 X  
 371 93 .  
 372 00 0  
 373 03 3  
 374 03 3  
 375 85 +  
 376 01 1  
 377 54 )  
 378 65 X  
 379 53 ( )  
 380 43 RCL  
 381 07 07  
 382 55 +  
 383 43 RCL  
 384 08 08  
 385 54 )  
 386 65 X  
 387 04 4  
 388 93 .  
 389 08 8  
 390 07 7  
 391 00 0  
 392 08 8  
 393 54 )  
 394 35 1/X  
 395 65 X  
 396 43 RCL  
 397 15 15

398 95 =  
 399 42 STO  
 400 16 16  
 401 32 X:T  
 402 93 .  
 403 03 3  
 404 04 4  
 405 09 9  
 406 09 9  
 407 77 GE  
 408 33 X<sup>2</sup>  
 409 93 .  
 410 03 3  
 411 05 5  
 412 22 INV  
 413 77 GE  
 414 34 FX  
 415 76 LBL  
 416 34 FX  
 417 93 .  
 418 07 7  
 419 04 4  
 420 09 9  
 421 09 9  
 422 77 GE  
 423 35 1/X  
 424 93 .  
 425 07 7  
 426 05 5  
 427 22 INV  
 428 77 GE  
 429 45 YX  
 430 76 LBL  
 431 33 X<sup>2</sup>  
 432 01 1  
 433 75 -  
 434 93 .  
 435 02 2  
 436 04 4  
 437 09 9  
 438 65 X  
 439 43 RCL  
 440 16 16  
 441 95 =  
 442 42 STO  
 443 17 17  
 444 76 LBL  
 445 35 1/X  
 446 01 1  
 447 93

448	05	5		497	04	4
449	05	5		498	03	3
450	07	7		499	07	7
451	75	-		500	69	DP
452	01	1		501	04	04
453	93	.		502	43	RCL
454	08	8		503	19	19
455	04	4		504	65	X
456	65	X		505	43	RCL
457	43	RCL		506	08	08
458	16	16		507	85	+
459	95	=		508	43	RCL
460	42	STO		509	18	18
461	17	17		510	65	X
462	76	LBL		511	53	(
463	45	YX		512	01	1
464	93	.		513	85	+
465	01	1		514	43	RCL
466	07	7		515	03	03
467	07	7		516	39	CDS
468	42	STO		517	54	)
469	17	17		518	55	+
470	43	RCL		519	02	2
471	17	17		520	65	+
472	65	X		521	43	RCL
473	43	RCL		522	00	00
474	15	15		523	65	X
475	95	=		524	53	(
476	42	STO		525	43	RCL
477	18	18		526	19	19
478	69	DP		527	85	+
479	06	06		528	43	RCL
480	02	2		529	18	18
481	04	4		530	54	)
482	01	1		531	65	X
483	04	4		532	53	(
484	69	DP		533	01	1
485	04	04		534	75	-
486	43	RCL		535	43	RCL
487	15	15		536	03	03
488	75	-		537	39	CDS
489	43	RCL		538	54	)
490	18	18		539	55	+
491	95	=		540	02	2
492	42	STO		541	95	=
493	19	19		542	69	DP
494	69	DP		543	06	06
495	06	06		544	91	R/S
496	02	2				

## A.2 PROGRAMA SOLAR II

## Descripción del programa:

Este programa calcula la radiación solar absorbida ("S") - considerando; la absorción de energía en las cubiertas, los efectos de polvo y sombra sobre el colector.

Calcula el producto  $(\tau\alpha)_b = (TAUB)$ ,  $(\tau\alpha)_d = (TAUD)$ ,  $(\tau\alpha)_g = (TAUG)$ ; y el producto efectivo  $(\tau\alpha)_e$  considerándolo como :  $1.01 (\tau\alpha)$ , para cada componente.

## Instrucciones para su uso:

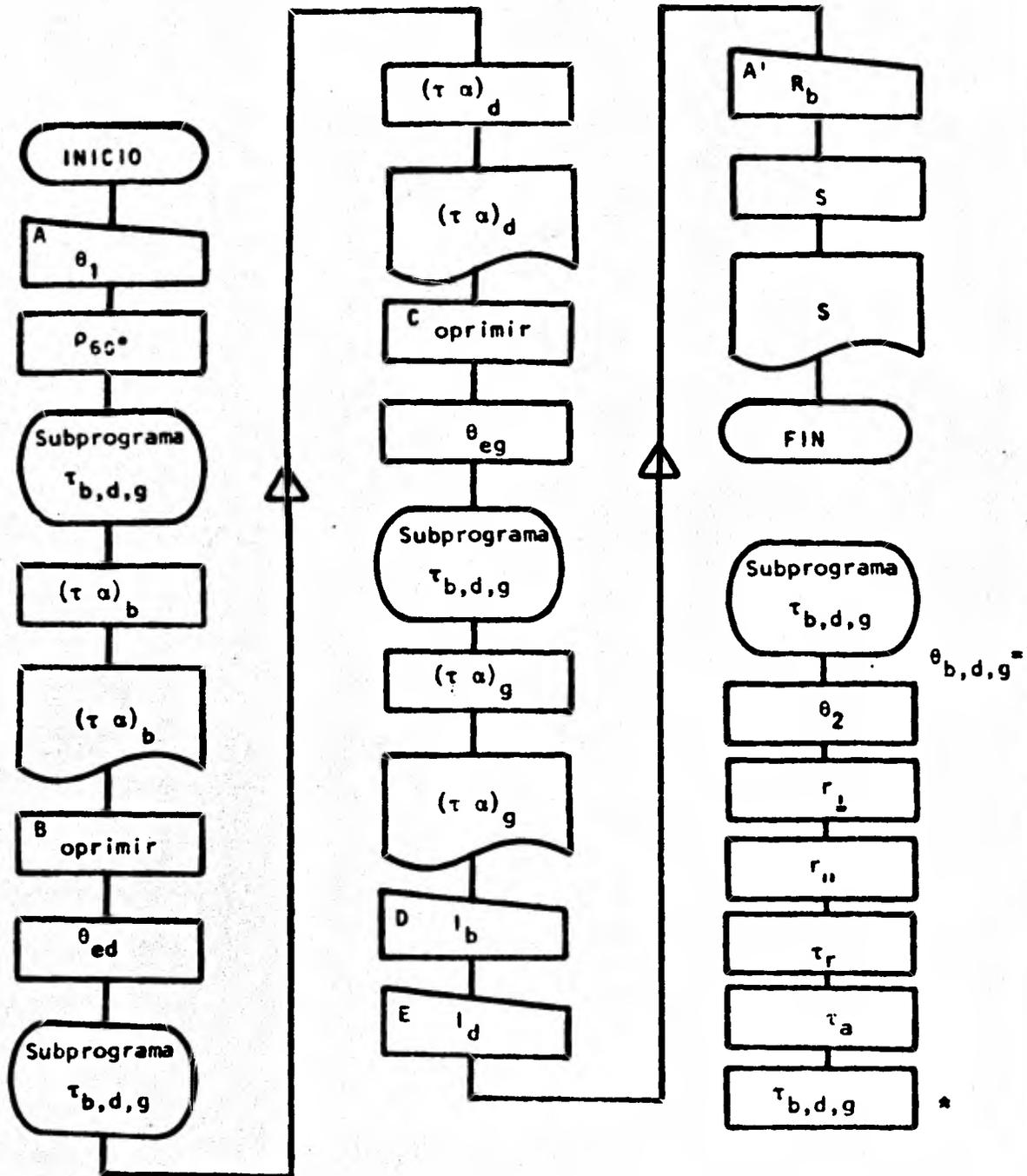
Introducir	Oprimir la tecla	Resulta
1) Angulo de incidencia (TETA)	→ A	→ TAUB
	→ B	→ TAUD
	→ C	→ TAUG
2) Radiación horaria directa (IB) $\{MJ/m^2\}$	→ D	
3) Radiación horaria difusa (ID) $\{MJ/m^2\}$	→ E	
4) Relación de radiación (RB)	→ A'	→ "S" $\left\{\frac{MJ}{m^2}\right\}$

## Introducir en la memoria:

- 05 → Número de cubiertas (N).
- 07 → Valor del producto KL.
- 13 → Absortancia de la placa ( $\alpha$ ).
- 15 → Inclinação del colector ( $\beta$ ) ( $^\circ$ ).
- 18 → Relectancia del suelo ( $\rho$ ).

Utilizar una partición de 479 pasos y 59 memorias.

DIAGRAMA DE FLUJO  
SOLAR II



\* Según sea el caso

000	76	LBL	050	54	)	100	01	1
001	11	R	051	35	1/X	101	93	.
002	86	STF	052	87	IFF	102	05	5
003	00	00	053	00	00	103	02	2
004	42	STD	054	00	00	104	06	6
005	01	01	055	59	59	105	54	)
006	42	STD	056	22	INV	106	22	INV
007	10	10	057	71	SBR	107	38	SIN
008	32	X:T	058	91	R/S	108	42	STD
009	06	6	059	42	STD	109	02	02
010	00	0	060	14	14	110	53	(
011	22	INV	061	00	0	111	43	RCL
012	67	EQ	062	03	3	112	02	02
013	33	X²	063	07	7	113	75	-
014	61	GTD	064	01	1	114	43	RCL
015	00	00	065	03	3	115	01	01
016	26	26	066	04	4	116	54	)
017	91	R/S	067	01	1	117	38	SIN
018	76	LBL	068	01	1	118	33	X²
019	33	X²	069	04	4	119	55	+
020	00	0	070	69	DP	120	53	(
021	32	X:T	071	04	04	121	53	(
022	43	RCL	072	43	RCL	122	43	RCL
023	12	12	073	14	14	123	02	02
024	67	EQ	074	69	DP	124	85	+
025	45	YX	075	06	06	125	43	RCL
026	71	SBR	076	91	R/S	126	01	01
027	34	FX	077	76	LBL	127	54	)
028	53	(	078	45	YX	128	38	SIN
029	53	(	079	06	6	129	33	X²
030	01	1	080	00	0	130	54	)
031	75	-	081	42	STD	131	95	=
032	53	(	082	01	01	132	42	STD
033	01	1	083	71	SBR	133	03	03
034	75	-	084	34	FX	134	53	(
035	43	RCL	085	42	STD	135	43	RCL
036	13	13	086	12	12	136	02	02
037	54	)	087	43	RCL	137	75	-
038	65	X	088	10	10	138	43	RCL
039	43	RCL	089	61	GTD	139	01	01
040	12	12	090	11	R	140	54	)
041	54	)	091	91	R/S	141	30	TAN
042	55	+	092	76	LBL	142	33	X²
043	53	(	093	34	FX	143	55	+
044	43	RCL	094	53	(	144	53	(
045	09	09	095	53	(	145	53	(
046	65	X	096	43	RCL	146	43	RCL
047	43	RCL	097	01	01	147	02	02
048	13	13	098	38	SIN	148	85	+
049	54	)	099	55	+	149	43	RCL

150	01	01		199	54	)		249	93	.
151	54	)		200	65	*		250	01	1
152	30	TAN		201	43	RCL		251	03	3
153	33	X <sup>2</sup>		202	04	04		252	08	8
154	54	)		203	54	)		253	08	8
155	95	=		204	54	)		254	65	*
156	42	STD		205	55	+		255	43	RCL
157	04	04		206	02	2		256	15	15
158	53	(		207	95	=		257	85	+
159	53	(		208	42	STD		258	93	.
160	01	1		209	06	06		259	00	0
161	75	-		210	43	RCL		260	00	0
162	43	RCL		211	07	07		261	01	1
163	03	03		212	94	+/-		262	04	4
164	54	)		213	55	+		263	09	9
165	55	+		214	43	RCL		264	07	7
166	53	(		215	02	02		265	65	*
167	01	1		216	39	ODS		266	43	RCL
168	85	+		217	95	=		267	15	15
169	53	(		218	22	INV		268	33	X <sup>2</sup>
170	02	2		219	23	LN <sub>X</sub>		269	95	=
171	65	*		220	42	STD		270	42	STD
172	43	RCL		221	08	08		271	01	01
173	05	05		222	65	*		272	71	SBR
174	75	-		223	43	RCL		273	00	00
175	01	1		224	06	06		274	26	26
176	54	)		225	95	=		275	42	STD
177	65	*		226	42	STD		276	16	16
178	43	RCL		227	09	09		277	03	3
179	03	03		228	43	RCL		278	07	7
180	54	)		229	08	08		279	01	1
181	85	+		230	75	-		280	03	3
182	53	(		231	43	RCL		281	04	4
183	01	1		232	09	09		282	01	1
184	75	-		233	95	=		283	01	1
185	43	RCL		234	42	STD		284	06	6
186	04	04		235	11	11		285	69	DF
187	54	)		236	54	)		286	04	04
188	55	+		237	92	RTN		287	43	RCL
189	53	(		238	76	LBL		288	16	16
190	01	1		239	12	B		289	69	DF
191	85	+		240	22	INV		290	06	06
192	53	(		241	86	STF		291	91	R/S
193	02	2		242	00	00		292	76	LBL
194	65	*		243	05	5		293	13	0
195	43	RCL		244	09	9		294	22	INV
196	05	05		245	93	-		295	86	STF
197	75	-		246	06	6		296	00	00
198	01	1		247	08	8		297	09	9
				248	75	-		298	00	0

299	75	-	
300	93	.	
301	05	5	
302	07	7	
303	08	8	
304	08	8	
305	65	x	
306	43	RCL	
307	15	15	
308	85	+	
309	93	.	
310	00	0	
311	00	0	
312	02	2	
313	06	6	
314	09	9	
315	03	3	
316	65	x	
317	43	RCL	
318	15	15	
319	33	X <sup>2</sup>	
320	95	=	
321	42	STD	
322	01	01	
323	71	SBR	
324	00	00	
325	26	26	
326	42	STD	
327	17	17	
328	03	3	
329	07	7	
330	01	1	
331	03	3	
332	04	4	
333	01	1	
334	02	2	
335	02	2	
336	69	DP	
337	04	04	
338	43	RCL	
339	17	17	
340	69	DP	
341	06	06	
342	91	R/S	
343	76	LBL	
344	14	D	
345	42	STD	
346	19	19	
347	91	R/S	
348	76	LBL	
349	15	E	
350	42	STD	
351	20	20	
352	91	R/S	
353	76	LBL	
354	16	R'	
355	42	STD	
356	21	21	
357	06	6	
358	05	5	
359	03	3	
360	06	6	
361	06	6	
362	05	5	
363	69	DP	
364	04	04	
365	43	RCL	
366	19	19	
367	65	x	
368	43	RCL	
369	21	21	
370	65	x	
371	43	RCL	
372	14	14	
373	65	x	
374	01	1	
375	93	.	
376	00	0	
377	01	1	
378	85	+	
379	43	RCL	
380	20	20	
381	65	x	
382	43	RCL	
383	16	16	
384	65	x	
385	01	1	
386	93	.	
387	00	0	
388	01	1	
389	65	x	
390	53	(	
391	01	1	
392	85	+	
393	43	RCL	
394	15	15	
395	39	ODS	
396	54	)	
397	55	+	
398	02	2	
399	85	+	
400	43	RCL	
401	18	18	
402	65	x	
403	53	(	
404	43	RCL	
405	19	19	
406	85	+	
407	43	RCL	
408	20	20	
409	54	)	
410	65	x	
411	43	RCL	
412	17	17	
413	65	x	
414	01	1	
415	93	.	
416	00	0	
417	01	1	
418	65	x	
419	53	(	
420	01	1	
421	75	-	
422	43	RCL	
423	15	15	
424	39	ODS	
425	54	)	
426	55	+	
427	02	2	
428	95	=	
429	65	x	
430	93	.	
431	09	9	
432	06	6	
433	95	=	
434	69	DP	
435	06	06	
436	91	R/S	

### A.3 PROGRAMA SOLAR III

#### Descripción del programa:

Este programa sirve para analizar el comportamiento del colector, separado del sistema. Su principal uso es para encontrar los valores de  $F$  y  $F'$  los cuales se consideran constantes para un diseño específico de colector, y se utilizan para la simulación del sistema colector termotanque (ver A.4). Además se obtienen la temperatura media de la placa ( $TP,M$ ), el gasto de masa (" $M$ "), y la eficiencia del colector ( $\%EF.$ ), (éstos para un intervalo de una hora).

Si se quiere conocer el valor del calor útil, a una hora de terminada, éste se encuentra en la memoria 28.

#### Instrucciones para su uso:

Introducir	Oprimir la tecla	Resulta
1) Temperatura ambiente ( $T_a$ ) ( $^{\circ}K$ )	$\rightarrow A$	
2) Radiación solar absorbida (" $S$ ") ( $MJ/m^2$ )	$\rightarrow B$	$\rightarrow TP,M$ ( $^{\circ}C$ )
		$\rightarrow "M"$ ( $\frac{Kg}{hr}$ )
		$\rightarrow "F"$
		$\rightarrow "F' "$
3) Radiación total horaria ( $IT$ ) ( $MJ/m^2$ )	$\rightarrow A'$	$\rightarrow \%EF.$

#### Introducir en la memoria:

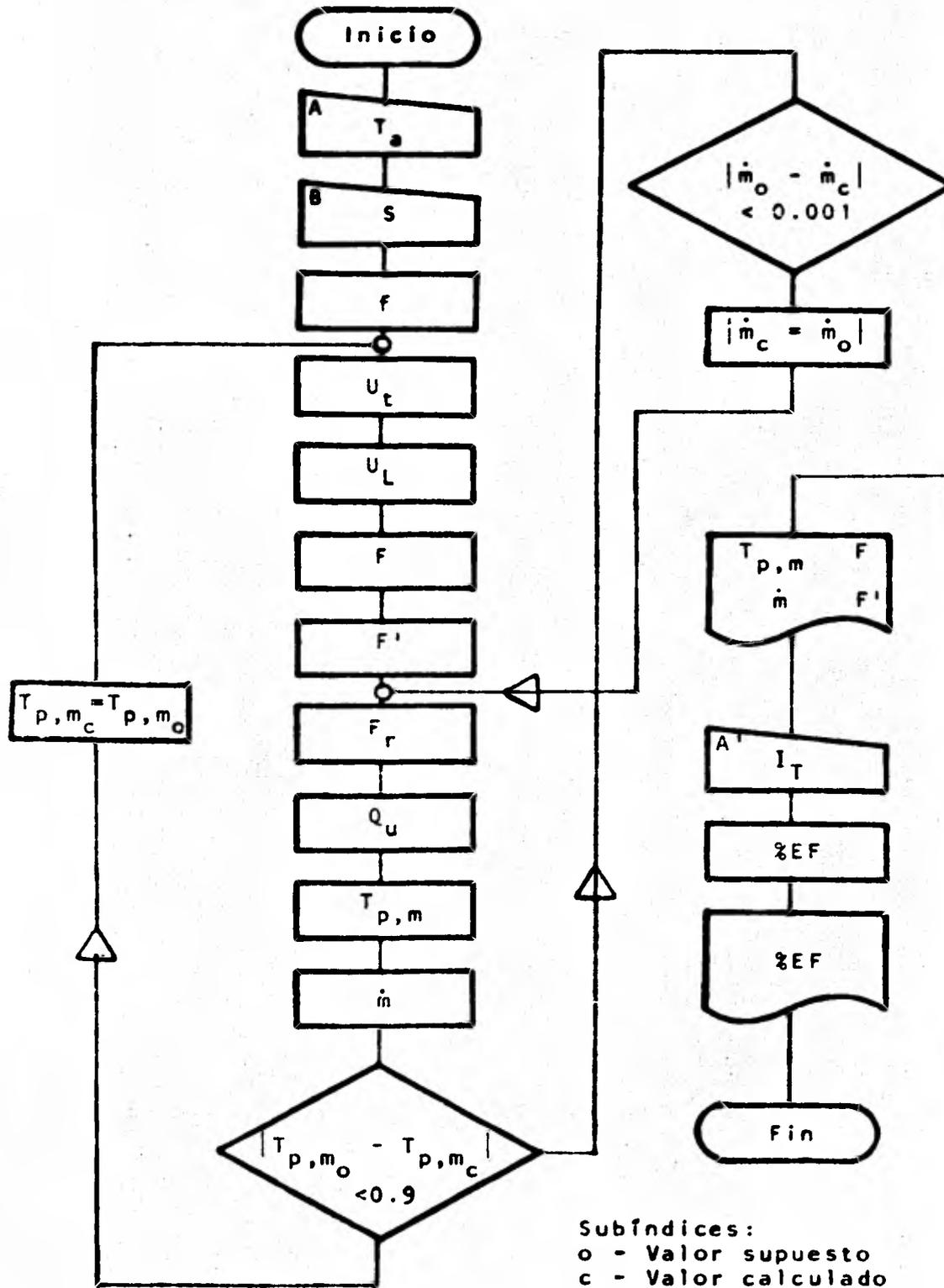
- 01  $\rightarrow$  Número de cubiertas ( $N$ ).
- 02  $\rightarrow$  Temperatura media de la placa (suponer) ( $T_{p,m}$ ) ( $^{\circ}K$ )
- 03  $\rightarrow$  Inclinação del colector ( $\beta$ ) ( $^{\circ}$ )

- 07 → Emisividad de la placa ( $\epsilon_p$ )
- 08 → Coeficiente de transferencia de calor debido al viento ( $h_w$ )  $\{W/m^2 \cdot ^\circ C\}$
- 09 → Conductividad térmica del aislante ( $k$ )  $\{W/m^2 \cdot ^\circ C\}$
- 10 → Espesor del aislamiento de la base ( $\lambda_b$ )  $\{m\}$
- 11 → Espesor del aislamiento del borde ( $\lambda_e$ )  $\{m\}$
- 12 → Area del borde ( $A$ )<sub>borde</sub>  $\{m^2\}$
- 13 → Area del colector ( $A_c$ )  $\{m^2\}$
- 15 → Conductividad térmica de la placa ( $k$ )<sub>cobre</sub>  $\{W/m^2 \cdot ^\circ C\}$
- 16 → Espesor de la placa ( $\delta$ )  $\{m\}$
- 17 → Separación entre tubos ( $W$ )  $\{m\}$
- 18 → Diámetro exterior del tubo ( $D$ )  $\{m\}$
- 21 → Conductancia de la soldadura ( $C_b$ )  $\{m^2 \cdot ^\circ C\}$
- 22 → Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el fluido y la pared interior del tubo ( $h_{fi}$ )  $\{W/m^2 \cdot ^\circ C\}$
- 24 → Gasto de masa dentro del colector ( $\dot{m}$ )  $\{Kg/seg\}$
- 27 → Temperatura del fluido a la entrada del colector  $\{^\circ C\}$
- 30 → Calor específico del fluido ( $C_p$ )  $\{J/Kg \cdot ^\circ K\}$
- 31 → Incremento de la temperatura del fluido entre la entrada y la salida del colector ( $\Delta T_f$ )  $\{^\circ K\}$

Utilizar una partición de 639 pasos y 39 memorias.

NOTA: Ya que los valores de  $F$  y  $F'$  se consideran constantes para una construcción específica de colector, es recomendable - calcularlos para condiciones promedio, es decir, evaluarlos a una hora intermedia del período de funcionamiento del colector.  $\dot{m}$  es calculado mediante el segundo método, sección II.4.2.

DIAGRAMA DE FLUJO  
SOLAR III



000	76	LBL	050	08	8	099	05	5
001	11	R	051	06	6	100	02	2
002	42	STD	052	06	6	101	00	0
003	04	04	053	65	X	102	65	X
004	91	R/S	054	43	RCL	103	53	(
005	76	LBL	055	01	01	104	01	1
006	12	B	056	54	)	105	75	-
007	42	STD	057	95	=	106	93	.
008	26	26	058	42	STD	107	00	0
009	03	3	059	05	05	108	00	0
010	07	7	060	76	LBL	109	00	0
011	03	3	061	45	YX	110	00	0
012	03	3	062	53	(	111	05	5
013	05	5	063	53	(	112	01	1
014	07	7	064	53	(	113	65	X
015	03	3	065	53	(	114	43	RCL
016	00	0	066	43	RCL	115	03	03
017	69	DP	067	02	02	116	33	X <sup>2</sup>
018	04	04	068	75	-	117	54	)
019	53	(	069	43	RCL	118	55	+
020	01	1	070	04	04	119	43	RCL
021	85	+	071	54	)	120	02	02
022	93	.	072	55	+	121	54	)
023	00	0	073	53	(	122	35	1/X
024	08	8	074	43	RCL	123	65	X
025	09	9	075	01	01	124	43	RCL
026	02	2	076	85	+	125	01	01
027	65	X	077	43	RCL	126	85	+
028	43	RCL	078	05	05	127	43	RCL
029	08	08	079	54	)	128	08	08
030	75	-	080	54	)	129	35	1/X
031	93	.	081	45	YX	130	54	)
032	01	1	082	53	(	131	35	1/X
033	01	1	083	93	.	132	85	+
034	06	6	084	04	4	133	53	(
035	06	6	085	03	3	134	53	(
036	65	X	086	65	X	135	43	RCL
037	43	RCL	087	53	(	136	07	07
038	08	08	088	01	1	137	85	+
039	65	X	089	75	-	138	93	.
040	43	RCL	090	01	1	139	00	0
041	07	07	091	00	0	140	00	0
042	54	)	092	00	0	141	05	5
043	65	X	093	55	+	142	09	9
044	53	(	094	43	RCL	143	01	1
045	01	1	095	02	02	144	65	X
046	85	+	096	54	)	145	43	RCL
047	93	.	097	54	)	146	01	01
048	00	0	098	65	X	147	65	X
049	07	7				148	43	RCL

149	08	08	198	43	RCL	248	65	X
150	54	)	199	04	04	249	53	(
151	35	1/X	200	54	)	250	43	RCL
152	85	+	201	65	X	251	17	17
153	53	(	202	53	(	252	75	-
154	53	(	203	43	RCL	253	43	RCL
155	02	2	204	02	02	254	18	18
156	65	X	205	33	X <sup>2</sup>	255	54	)
157	43	RCL	206	85	+	256	55	+
158	01	01	207	43	RCL	257	02	2
159	85	+	208	04	04	258	95	=
160	43	RCL	209	33	X <sup>2</sup>	259	42	STD
161	05	05	210	54	)	260	19	19
162	75	-	211	95	=	261	53	(
163	01	1	212	42	STD	262	43	RCL
164	85	+	213	06	06	263	19	19
165	93	.	214	43	RCL	264	22	INV
166	01	1	215	06	06	265	23	LNK
167	03	3	216	85	+	266	75	-
168	03	3	217	43	RCL	267	43	RCL
169	65	X	218	09	09	268	19	19
170	43	RCL	219	55	+	269	94	+/-
171	07	07	220	43	RCL	270	22	INV
172	54	)	221	10	10	271	23	LNK
173	55	+	222	85	+	272	54	)
174	93	.	223	43	RCL	273	55	+
175	08	8	224	09	09	274	53	(
176	08	8	225	55	+	275	43	RCL
177	75	-	226	43	RCL	276	19	19
178	43	RCL	227	11	11	277	22	INV
179	01	01	228	65	X	278	23	LNK
180	54	)	229	43	RCL	279	85	+
181	54	)	230	12	12	280	43	RCL
182	35	1/X	231	55	+	281	19	19
183	65	X	232	43	RCL	282	94	+/-
184	05	5	233	13	13	283	22	INV
185	93	.	234	95	=	284	23	LNK
186	06	6	235	42	STD	285	54	)
187	06	6	236	14	14	286	65	X
188	09	9	237	53	(	287	43	RCL
189	07	7	238	43	RCL	288	19	19
190	52	EE	239	14	14	289	35	1/X
191	08	8	240	55	+	290	95	=
192	94	+/-	241	43	RCL	291	42	STD
193	65	X	242	15	15	292	20	20
194	53	(	243	55	+	293	53	(
195	43	RCL	244	43	RCL	294	53	(
196	02	02	245	16	16	295	53	(
197	85	+	246	54	)	296	43	RCL
			247	34	IX			

297	14	14	347	65	X	396	43	RCL
298	65	X	348	43	RCL	397	14	14
299	53	(	349	14	14	398	65	X
300	43	RCL	350	65	X	399	03	3
301	18	18	351	43	RCL	400	93	.
302	85	+	352	23	23	401	06	6
303	53	(	353	55	+	402	52	EE
304	43	RCL	354	43	RCL	403	03	3
305	17	17	355	24	24	404	94	+/-
306	75	-	356	42	STD	405	65	X
307	43	RCL	357	32	32	406	53	(
308	18	18	358	55	+	407	43	RCL
309	54	)	359	43	RCL	408	27	27
310	65	X	360	30	30	409	75	-
311	43	RCL	361	54	)	410	53	(
312	20	20	362	94	+/-	411	43	RCL
313	54	)	363	22	INV	412	04	04
314	54	)	364	23	LN $\bar{X}$	413	75	-
315	35	1/X	365	94	+/-	414	02	2
316	85	+	366	85	+	415	07	7
317	43	RCL	367	01	1	416	03	3
318	21	21	368	54	)	417	54	)
319	35	1/X	369	65	X	418	54	)
320	85	+	370	43	RCL	419	54	)
321	53	(	371	24	24	420	95	=
322	89	$\pi$	372	65	X	421	42	STD
323	65	X	373	04	4	422	28	28
324	43	RCL	374	01	1	423	53	(
325	18	18	375	09	9	424	53	(
326	65	X	376	00	0	425	01	1
327	43	RCL	377	55	+	426	75	-
328	22	22	378	43	RCL	427	43	RCL
329	54	)	379	13	13	428	25	25
330	35	1/X	380	55	+	429	54	)
331	54	)	381	43	RCL	430	65	X
332	65	X	382	14	14	431	43	RCL
333	43	RCL	383	95	=	432	28	28
334	14	14	384	42	STD	433	65	X
335	65	X	385	25	25	434	01	1
336	43	RCL	386	43	RCL	435	52	EE
337	17	17	387	13	13	436	03	3
338	54	)	388	65	X	437	55	+
339	95	=	389	43	RCL	438	03	3
340	35	1/X	390	25	25	439	93	.
341	42	STD	391	65	X	440	06	6
342	23	23	392	53	(	441	55	+
343	53	(	393	43	RCL	442	43	RCL
344	53	(	394	26	26	443	13	13
345	43	RCL	395	75	-	444	55	+
346	13	13				445	43	RCL

446 14 14  
 447 55 +  
 448 43 RCL  
 449 25 25  
 450 54 )  
 451 85 +  
 452 43 RCL  
 453 27 27  
 454 85 +  
 455 02 2  
 456 07 7  
 457 03 3  
 458 95 =  
 459 42 STD  
 460 29 29  
 461 43 RCL  
 462 13 13  
 463 65 X  
 464 43 RCL  
 465 25 25  
 466 65 X  
 467 53 (   
 468 43 RCL  
 469 26 26  
 470 55 +  
 471 03 3  
 472 93 .  
 473 06 6  
 474 52 EE  
 475 03 3  
 476 94 +/-  
 477 75 -  
 478 43 RCL  
 479 14 14  
 480 65 X  
 481 53 (   
 482 43 RCL  
 483 27 27  
 484 75 -  
 485 53 (   
 486 43 RCL  
 487 04 04  
 488 75 -  
 489 02 2  
 490 07 7  
 491 03 3  
 492 54 )  
 493 54 )  
 494 54 )  
 495 55 +

496 43 RCL  
 497 30 30  
 498 55 +  
 499 43 RCL  
 500 31 31  
 501 95 =  
 502 42 STD  
 503 24 24  
 504 93 .  
 505 09 9  
 506 32 XIT  
 507 43 RCL  
 508 29 29  
 509 75 -  
 510 43 RCL  
 511 02 02  
 512 95 =  
 513 50 IXI  
 514 22 INV  
 515 77 GE  
 516 33 X²  
 517 43 RCL  
 518 29 29  
 519 42 STD  
 520 02 02  
 521 61 GTD  
 522 45 YX  
 523 76 LBL  
 524 33 X²  
 525 93 .  
 526 00 0  
 527 00 0  
 528 01 1  
 529 32 XIT  
 530 43 RCL  
 531 24 24  
 532 75 -  
 533 43 RCL  
 534 32 32  
 535 95 =  
 536 50 IXI  
 537 22 INV  
 538 77 GE  
 539 34 FX  
 540 43 RCL  
 541 29 29  
 542 42 STD  
 543 02 02  
 544 61 GTD  
 545 45 YX

546 76 LBL  
 547 34 FX  
 548 43 RCL  
 549 29 29  
 550 75 -  
 551 02 2  
 552 07 7  
 553 03 3  
 554 95 =  
 555 69 DP  
 556 06 06  
 557 06 6  
 558 05 5  
 559 03 3  
 560 00 0  
 561 06 6  
 562 05 5  
 563 69 DP  
 564 04 04  
 565 43 RCL  
 566 24 24  
 567 65 X  
 568 03 3  
 569 06 6  
 570 00 0  
 571 00 0  
 572 95 =  
 573 69 DP  
 574 06 06  
 575 06 6  
 576 05 5  
 577 02 2  
 578 01 1  
 579 06 6  
 580 05 5  
 581 69 DP  
 582 04 04  
 583 43 RCL  
 584 20 20  
 585 69 DP  
 586 06 06  
 587 06 6  
 588 05 5  
 589 02 2  
 590 01 1  
 591 06 6  
 592 05 5  
 593 06 6  
 594 05 5  
 595 69 DP

597	04	04
598	43	RCL
599	23	23
600	69	DP
601	06	06
602	91	R/S
603	76	LBL
604	16	R'
605	22	INV
606	52	EE
607	42	STD
608	33	33
609	43	RCL
610	28	28
611	55	÷
612	43	RCL
613	13	13
614	55	÷
615	43	RCL
616	33	33
617	65	×
618	01	1
619	00	0
620	00	0
621	35	=
622	42	STD
623	34	34
624	06	6
625	01	1
626	01	1
627	07	7
628	02	2
629	01	1
630	04	4
631	00	0
632	69	DP
633	04	04
634	43	RCL
635	34	34
636	69	DP
637	06	06
638	91	R/S

#### A.4 PROGRAMA SOLAR IV

##### Descripción del programa:

El programa Solar IV se utiliza para la simulación hora a hora del sistema Colector-Termotanque calculando:

Temperatura media de la placa (TP,M), Calor útil del colector ("QU"), flujo de masa en el sistema ("M"), temperatura del agua en el tanque (TEMPERATURA TANQUE), y la eficiencia del sistema (\*%EF. DEL SISTEMA\*).

##### Instrucciones para su uso:

Introducir	Oprimir la tecla	Resulta
1) Temperatura ambiente ( $T_a$ ) {°K}	→ A	
2) Radiación solar absorbida ("S") {MJ/m <sup>2</sup> }	→ B	→ TP,M {°C}
		→ "QU" {MJ}
		→ "M" { $\frac{Kg}{hr}$ }
		→ TEMPERATURA TANQUE {°C}
3) Radiación total horaria (IT) {MJ/m <sup>2</sup> }	→ A'	→ %EF. DEL SISTEMA

##### Introducir en la memoria:

00	f(s) (ver sección II.4.2 ecuación II.4.2.4 ) {m}
01	Número de cubiertas (N)
02	Temperatura media de la placa (suponer) ( $T_{p,m}$ ) {°K}
03	Inclinación del colector (B) {°}
07	Emitancia de la placa ( $\epsilon_p$ )
08	Coefficiente de transferencia de calor debido al viento ( $h_w$ ) {W/m <sup>2</sup> °C}

- 09 → Coeficiente de pérdidas por la base, más, coeficiente de -  
pérdidas por el borde ( $U_b + U_e$ ) ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
- 10 → Area del colector ( $A_c$ ) ( $m^2$ )
- 12 → Separación entre placas ( $W$ ) ( $m$ )
- 13 → Diámetro exterior de los tubos del colector ( $D$ ) ( $m$ )
- 14 → Factor de eficiencia de la aleta ( $F$ )
- 16 → Capacidad térmica del termotanque ( $W_T$ ) ( $J/^\circ C$ )
- 17 → Factor de eficiencia del colector ( $F'$ )
- 18 → Flujo de masa ( $\dot{m}$ ) ( $Kg/seg$ )
- 21 → Temperatura del agua en el tanque al iniciar la simulación  
( $T_i = T_{tanque}$ ) ( $^\circ C$ )
- 24 → Calor específico del agua ( $C_p$ ) ( $J/Kg \cdot ^\circ K$ ) ó ( $J/Kg \cdot ^\circ C$ )
- 25 → P (ver sección II.4.2 ecuación II.4.2,13)
- 29 →  $\frac{\Delta t}{mc}$  ( $^\circ C/MJ$ ) ó ( $^\circ K/MJ$ )  
donde: t - intervalo de tiempo para la simulación (1 Hr)  
m - masa de agua en el tanque  
c - calor específico del agua
- 30 → Carga de energía (L) (MJ) (En nuestro caso es la cantidad  
de calor requerida para las cuatro duchas)
- 31 → Producto, coeficiente de pérdidas del tanque por el area -  
del mismo ( $UA$ )<sub>t</sub> (MJ/ $^\circ C$ )

32 → 3717303317

36 → 5100611721

33 → 3513374135

37 → 4000161727

34 → 1300003713

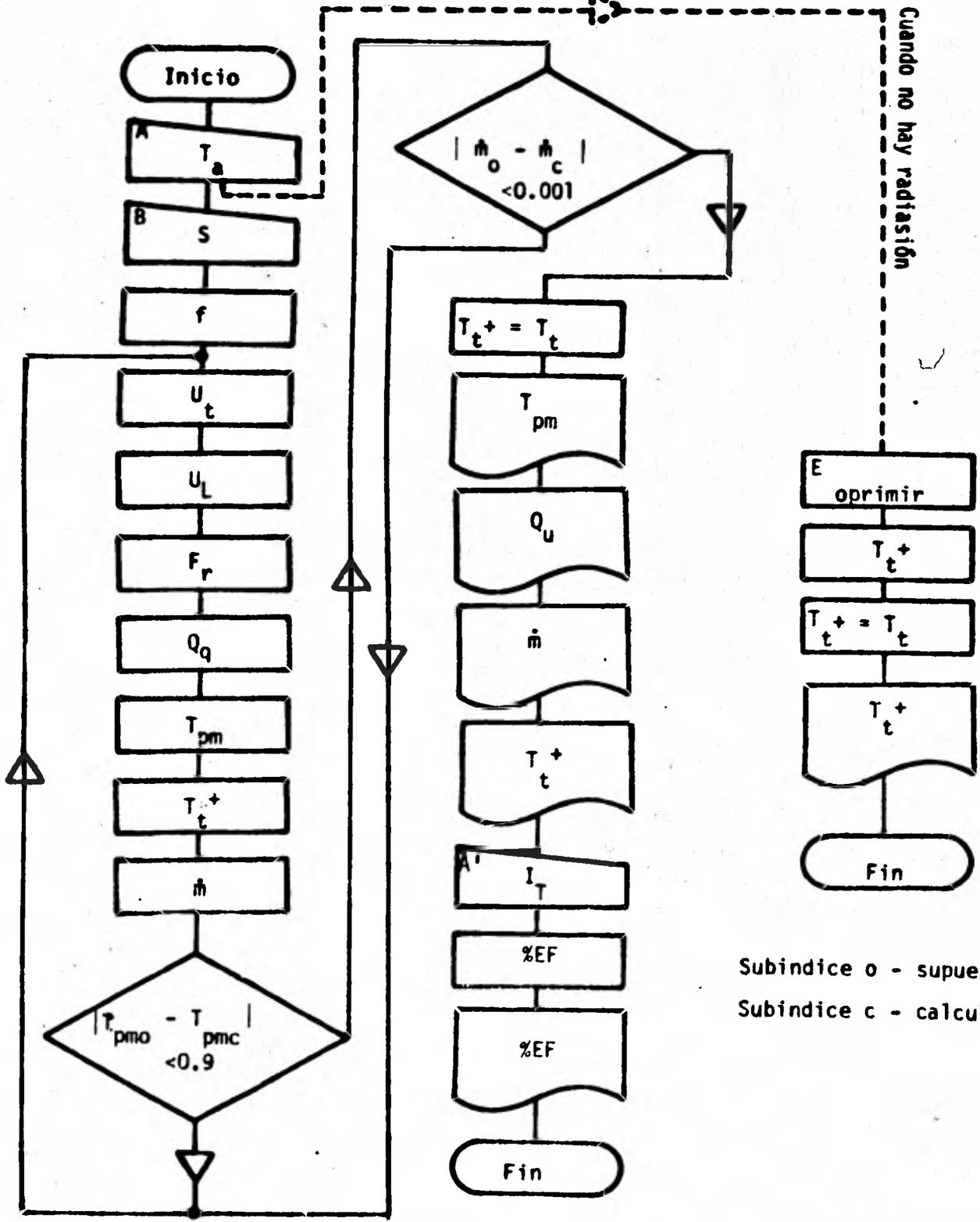
38 → 36243637

35 → 3134411700

39 → 1730130051

Utilizar una partición de 639 pasos y 39 memorias.

DIAGRAMA DE FLUJO  
SOLAR IV



Subíndice o - supuesto  
Subíndice c - calculado

Quando no hay radiación

000	76	LBL	050	08	8	099	05	5
001	11	A	051	06	6	100	02	2
002	42	STD	052	06	6	101	00	0
003	04	04	053	65	X	102	65	X
004	91	R/S	054	43	RCL	103	53	(
005	76	LBL	055	01	01	104	01	1
006	12	B	056	54	)	105	75	-
007	42	STD	057	95	=	106	93	.
008	20	20	058	42	STD	107	00	0
009	03	3	059	05	05	108	00	0
010	07	7	060	76	LBL	109	00	0
011	03	3	061	45	YX	110	00	0
012	03	3	062	53	(	111	05	5
013	05	5	063	53	(	112	01	1
014	07	7	064	53	(	113	65	X
015	03	3	065	53	(	114	43	RCL
016	00	0	066	43	RCL	115	03	03
017	69	DP	067	02	02	116	03	X <sup>2</sup>
018	04	04	068	75	-	117	54	)
019	53	(	069	43	RCL	118	55	+
020	01	1	070	04	04	119	43	RCL
021	85	+	071	54	)	120	02	02
022	93	.	072	55	+	121	54	)
023	00	0	073	53	(	122	35	1/X
024	08	8	074	43	RCL	123	65	X
025	09	9	075	01	01	124	43	RCL
026	02	2	076	85	+	125	01	01
027	65	X	077	43	RCL	126	85	+
028	43	RCL	078	05	05	127	43	RCL
029	08	08	079	54	)	128	08	08
030	75	-	080	54	)	129	35	1/X
031	93	.	081	45	YX	130	54	)
032	01	1	082	53	(	131	35	1/X
033	01	1	083	93	.	132	85	+
034	06	6	084	04	4	133	53	(
035	06	6	085	03	3	134	53	(
036	65	X	086	65	X	135	43	RCL
037	43	RCL	087	53	(	136	07	07
038	08	08	088	01	1	137	85	+
039	65	X	089	75	-	138	93	.
040	43	RCL	090	01	1	139	00	0
041	07	07	091	00	0	140	00	0
042	54	)	092	00	0	141	05	5
043	65	X	093	55	+	142	09	9
044	53	(	094	43	RCL	143	01	1
045	01	1	095	02	02	144	65	X
046	85	+	096	54	)	145	43	RCL
047	93	.	097	54	)	146	01	01
048	00	0	098	65	X	147	65	X
049	07	7				148	43	RCL

149	08	08	199	04	04	249	43	RCL
150	54	)	200	54	)	250	18	18
151	35	1/X	201	65	x	251	65	x
152	85	+	202	53	(	252	04	4
153	53	(	203	43	RCL	253	01	1
154	53	(	204	02	02	254	09	9
155	02	2	205	33	X²	255	00	0
156	65	*	206	85	+	256	55	-
157	43	RCL	207	43	RCL	257	43	RCL
158	01	01	208	04	04	258	10	10
159	85	+	209	33	X²	259	55	+
160	43	RCL	210	54	)	260	43	RCL
161	05	05	211	95	=	261	11	11
162	75	-	212	42	STD	262	95	=
163	01	1	213	06	06	263	42	STD
164	85	+	214	43	RCL	264	19	19
165	93	.	215	06	06	265	43	RCL
166	01	1	216	85	+	266	10	10
167	03	3	217	43	RCL	267	65	x
168	03	3	218	09	09	268	43	RCL
169	65	x	219	95	=	269	19	19
170	43	RCL	220	42	STD	270	65	x
171	07	07	221	11	11	271	53	(
172	54	)	222	53	(	272	43	RCL
173	55	+	223	53	(	273	20	20
174	33	.	224	43	RCL	274	75	-
175	08	8	225	10	10	275	43	RCL
176	08	8	226	65	x	276	11	11
177	75	-	227	43	RCL	277	65	x
178	43	RCL	228	11	11	278	93	3
179	01	01	229	65	x	279	93	.
180	54	)	230	43	RCL	280	06	6
181	54	)	231	17	17	281	52	EE
182	35	1/X	232	55	+	282	03	3
183	65	x	233	43	RCL	283	94	+/-
184	05	5	234	18	18	284	65	x
185	93	.	235	42	STD	285	53	(
186	06	6	236	26	26	286	43	RCL
187	06	6	237	55	+	287	21	21
188	09	9	238	43	RCL	288	75	-
189	07	7	239	24	24	289	53	(
190	52	EE	240	54	)	290	43	RCL
191	08	8	241	94	+/-	291	04	04
192	94	+/-	242	22	INV	292	75	-
193	65	x	243	23	LNX	293	02	2
194	53	(	244	94	+/-	294	07	7
195	43	RCL	245	85	+	295	03	3
196	02	02	246	01	1	296	54	)
197	85	+	247	54	)	297	54	)
198	43	RCL	248	65	x	298	54	)

299	95	=				398	53	(
300	42	STD				399	43	RCL
301	22	22				400	16	16
302	53	(				401	65	X
303	53	(				402	53	(
304	01	1				403	43	RCL
305	75	-				404	27	27
306	43	RCL				405	75	-
307	19	19				406	43	RCL
308	54	)				407	21	21
309	65	X				408	54	)
310	43	RCL				409	55	+
311	22	22				410	03	3
312	65	X				411	06	6
313	01	1				412	00	0
314	52	EE				413	00	0
315	03	3				414	85	+
316	55	+				415	43	RCL
317	03	3				416	31	31
318	93	.				417	52	EE
319	06	6				418	06	6
320	55	+				419	65	X
321	43	RCL				420	53	(
322	10	10				421	43	RCL
323	55	+				422	21	21
324	43	RCL				423	75	-
325	11	11				424	53	(
326	55	+				425	43	RCL
327	43	RCL				426	04	04
328	19	19				427	75	-
329	54	)				428	02	2
330	85	+				429	07	7
331	43	RCL				430	03	3
332	21	21				431	54	)
333	85	+				432	54	)
334	02	2				433	54	)
335	07	7				434	55	+
336	03	3				435	43	RCL
337	95	=				436	25	25
338	42	STD				437	55	+
339	23	23				438	43	RCL
340	43	RCL				439	24	24
341	21	21				440	95	=
342	85	+				441	45	YX
343	43	RCL				442	03	3
344	29	29				443	35	1/Y
345	65	X				444	95	=
346	53	(				445	42	STD
347	43	RCL				446	18	18
						447	93	.
348	22	22						
349	75	-						
350	43	RCL						
351	30	30						
352	75	-						
353	43	RCL						
354	31	31						
355	65	X						
356	53	(						
357	43	RCL						
358	21	21						
359	75	-						
360	53	(						
361	43	RCL						
362	04	04						
363	75	-						
364	02	2						
365	07	7						
366	03	3						
367	54	)						
368	54	)						
369	54	)						
370	95	=						
371	42	STD						
372	27	27						
373	43	RCL						
374	00	00						
375	94	+/-						
376	65	X						
377	53	(						
378	02	2						
379	93	.						
380	05	5						
381	94	+/-						
382	52	EE						
383	06	6						
384	94	+/-						
385	65	X						
386	43	RCL						
387	21	21						
388	85	+						
389	05	5						
390	93	.						
391	08	8						
392	03	3						
393	52	EE						
394	05	5						
395	94	+/-						
396	54	)						
397	65	X						

448	09	9	498	75	-	548	69	DP
449	32	X:T	499	02	2	549	03	03
450	43	RCL	500	07	7	550	43	RCL
451	23	23	501	03	3	551	35	35
452	75	-	502	95	=	552	69	DP
453	43	RCL	503	69	DP	553	04	04
454	02	02	504	06	06	554	98	ADV
455	95	=	505	06	6	555	69	DP
456	50	IXI	506	05	5	556	05	05
457	22	INV	507	03	3	557	43	RCL
458	77	GE	508	04	4	558	21	21
459	33	X²	509	04	4	559	99	PRT
460	43	RCL	510	01	1	560	91	R/S
461	23	23	511	06	6	561	76	LBL
462	42	STD	512	05	5	562	16	A'
463	02	02	513	69	DP	563	65	X
464	61	GTD	514	04	04	564	43	RCL
465	45	YX	515	43	RCL	565	10	10
466	76	LBL	516	22	22	566	55	+
467	33	X²	517	69	DP	567	43	RCL
468	93	.	518	06	06	568	22	22
469	00	0	519	06	6	569	55	+
470	00	0	520	05	5	570	01	1
471	01	1	521	03	3	571	00	0
472	32	X:T	522	00	0	572	00	0
473	43	RCL	523	06	6	573	95	=
474	18	18	524	05	5	574	35	1/X
475	75	-	525	69	DP	575	42	STD
476	43	RCL	526	04	04	576	28	28
477	26	26	527	43	RCL	577	25	CLR
478	95	=	528	18	18	578	43	RCL
479	50	IXI	529	65	X	579	36	36
480	22	INV	530	03	3	580	69	DP
481	77	GE	531	06	6	581	01	01
482	34	FX	532	00	0	582	43	RCL
483	43	RCL	533	00	0	583	37	37
484	23	23	534	95	=	584	69	DP
485	42	STD	535	69	DP	585	02	02
486	02	02	536	06	06	586	43	RCL
487	61	GTD	537	25	CLR	587	38	38
488	45	YX	538	43	RCL	588	69	DP
489	76	LBL	539	32	32	589	03	03
490	34	FX	540	69	DP	590	43	RCL
491	43	RCL	541	01	01	591	39	39
492	27	27	542	43	RCL	592	69	DP
493	42	STD	543	33	33	593	04	04
494	21	21	544	69	DP	594	98	ADV
495	25	CLR	545	02	02	595	69	DP
496	43	RCL	546	43	RCL	596	05	05
497	23	23	547	34	34	597	43	RCL

598	28	28
599	99	PRT
600	91	R/S
601	76	LBL
602	15	E
603	43	RCL
604	21	21
605	85	+
606	43	RCL
607	29	29
608	65	*
609	53	(
610	43	RCL
611	22	22
612	75	-
613	43	RCL
614	30	30
615	75	-
616	43	RCL
617	31	31
618	65	*
619	53	(
620	43	RCL
621	21	21
622	75	-
623	53	(
624	43	RCL
625	04	04
626	75	-
627	02	2
628	07	7
629	03	3
630	54	)
631	54	)
632	54	)
633	95	=
634	42	STO
635	21	21
636	61	GTO
637	05	05
638	37	37

### A.5 PROGRAMA SOLAR V

#### Descripción del programa:

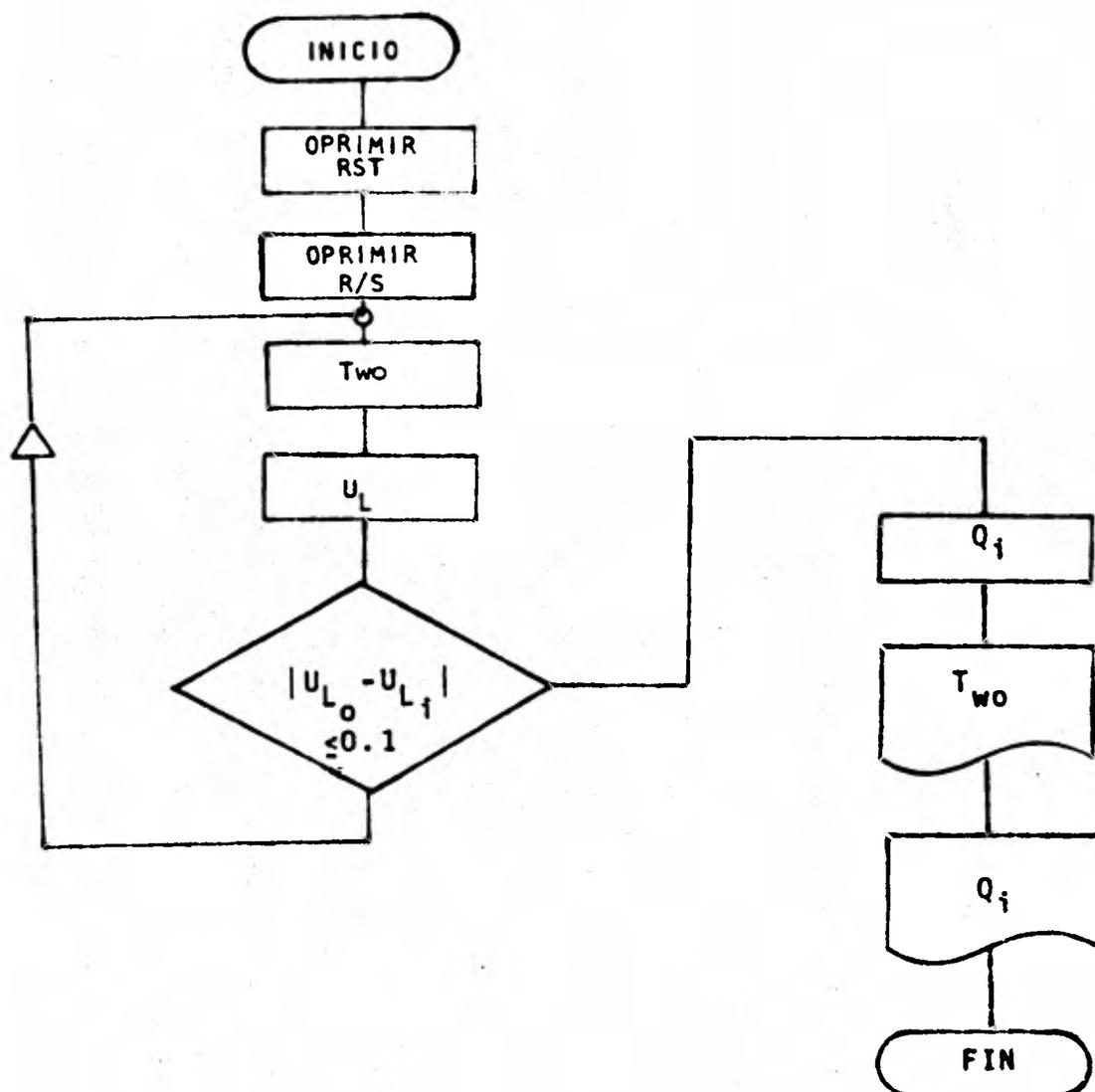
Este programa sirve para estimar la temperatura diaria (promedio mensual) de la superficie exterior del muro trombe ( $T_{wo}$ ) y el suministro de calor a la habitación ("Q1").

#### Instrucciones para su uso:

- 1) Después de tener los datos en las memorias, oprimir la tecla "RST" y luego la tecla "R/S".

#### Introducir en la memoria:

- 01 → Radiación diaria absorbida (promedio mensual) ( $\bar{S}$ ) MJ/m<sup>2</sup>
- 03 → Temperatura diaria (promedio mensual) de la superficie exterior del muro ( $T_{wo}$ ) (°C) (supuesta)
- 04 → Temperatura media diaria (promedio mensual)
- 05 → Número de segundos en un día ( $\Delta_t$ ) (seg)
- 07 →  $\frac{U_i K}{K + e U_i}$
- 11 → Coeficiente de transferencia de calor por convección de la superficie exterior de los muros de la vivienda - -  
 $(h_o) \left\{ \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C} \right\}$
- 12 → Emitancia del muro ( $\epsilon$ )
- 13 → Número de cubiertas (N)



Subíndice o - calculado

f - corregido

000	76	LBL	049	02	2	099	14	14
001	33	X2	050	65	*	100	54	)
002	53	(	051	43	RCL	101	54	)
003	43	RCL	052	11	11	102	45	YX
004	01	01	053	75	-	103	53	(
005	65	*	054	93	.	104	93	.
006	21	1	055	01	1	105	04	4
007	52	EE	056	01	1	106	03	3
008	06	6	057	06	6	107	65	*
009	85	+	058	06	6	108	53	(
010	43	RCL	059	65	*	109	01	1
011	08	08	060	43	RCL	110	75	-
012	65	*	061	11	11	111	01	1
013	43	RCL	062	65	*	112	00	0
014	05	05	063	43	RCL	113	00	0
015	65	*	064	12	12	114	55	+
016	43	RCL	065	54	)	115	43	RCL
017	04	04	066	65	*	116	03	03
018	85	+	067	53	(	117	54	)
019	43	RCL	068	01	1	118	54	)
020	07	07	069	85	+	119	65	*
021	65	*	070	93	.	120	03	3
022	43	RCL	071	00	0	121	09	9
023	05	05	072	07	7	122	00	0
024	54	)	073	08	8	123	93	.
025	55	+	074	06	6	124	00	0
026	53	(	075	06	6	125	05	5
027	43	RCL	076	65	*	126	55	+
028	08	08	077	43	RCL	127	43	RCL
029	65	*	078	13	13	128	03	03
030	43	RCL	079	54	)	129	54	)
031	05	05	080	95	=	130	35	1/X
032	85	+	081	42	STD	131	65	*
033	43	RCL	082	14	14	132	43	RCL
034	07	07	083	53	(	133	13	13
035	65	*	084	53	(	134	85	+
036	43	RCL	085	53	(	135	43	RCL
037	05	05	086	53	(	136	11	11
038	54	)	087	43	RCL	137	35	1/X
039	95	=	088	03	03	138	54	)
040	42	STD	089	75	-	139	35	1/X
041	03	03	090	43	RCL	140	85	+
042	53	(	091	04	04	141	53	(
043	01	1	092	54	)	142	53	(
044	85	+	093	55	+	143	43	RCL
045	93	.	094	53	(	144	12	12
046	00	0	095	43	RCL	145	95	!
047	06	6	096	13	13	146	93	.
048	09	9	097	85	+	147	00	0
			098	43	RCL			

148	00	0	196	09	9	243	43	RCL
149	05	5	197	07	7	244	07	07
150	09	9	198	52	EE	245	65	*
151	01	1	199	08	8	246	43	RCL
152	65	X	200	94	+/-	247	05	05
153	43	RCL	201	65	X	248	65	*
154	13	13	202	53	(	249	53	(
155	65	X	203	43	RCL	250	43	RCL
156	43	RCL	204	03	03	251	03	03
157	11	11	205	85	+	252	75	-
158	54	)	206	43	RCL	253	01	1
159	35	1/X	207	04	04	254	08	8
160	85	+	208	54	)	255	93	.
161	53	(	209	65	X	256	03	3
162	53	(	210	53	(	257	54	)
163	02	2	211	43	RCL	258	55	+
164	65	X	212	03	03	259	01	1
165	43	RCL	213	33	X <sup>2</sup>	260	52	EE
166	13	13	214	85	+	261	06	6
167	85	+	215	43	RCL	262	95	=
168	43	RCL	216	04	04	263	42	STD
169	14	14	217	33	X <sup>2</sup>	264	10	10
170	75	-	218	54	)	265	03	3
171	01	1	219	95	=	266	07	7
172	85	+	220	42	STD	267	04	4
173	93	.	221	09	09	268	03	3
174	01	1	222	93	.	269	05	5
175	03	3	223	01	1	270	07	7
176	03	3	224	32	XIT	271	00	0
177	65	X	225	43	RCL	272	01	1
178	43	RCL	226	08	08	273	69	DP
179	12	12	227	75	-	274	04	04
180	54	)	228	43	RCL	275	43	RCL
181	55	+	229	09	09	276	03	03
182	93	.	230	95	=	277	69	DP
183	08	8	231	50	IXI	278	06	06
184	08	8	232	22	INV	279	06	6
185	75	-	233	77	GE	280	05	5
186	43	RCL	234	45	*X	281	03	3
187	13	13	235	43	RCL	282	04	4
188	54	)	236	09	09	283	02	2
189	54	)	237	42	STD	284	04	4
190	35	1/X	238	08	08	285	06	6
191	65	X	239	61	GTO	286	05	5
192	05	5	240	33	X <sup>2</sup>	287	69	DP
193	93	.	241	76	LBL	288	04	04
194	06	6	242	45	*X	289	43	RCL
195	06	6				290	10	10
						291	69	DP
						292	06	06
						293	91	P/X

A P E N D I C E BCONDICIONES CLIMATOLÓGICAS DE LA RUMOROSA BAJA CALIFORNIA  
NORTET E M P E R A T U R A S

	MAXIMA EXTREMA	PROMEDIO MAXIMA	MEDIA	PROMEDIO MINIMA	MINIMA EXTREMA
ENERO	27	12.4	6.4	0.4	-15
FEBRERO	28	13.9	7.9	1.9	-12
MARZO	31	15.6	9.3	3.0	- 9
ABRIL	33	19.6	12.4	5.3	- 6
MAYO	39	23.5	16.0	8.5	- 2
JUNIO	45	29	21.1	13.3	0
JULIO	40	33	25.7	18.4	4
AGOSTO	39	32.2	25.0	17.8	7
SEPTIEMBRE	40	29.5	22.1	14.8	9.3
OCTUBRE	33	23.7	16.5	9.3	- 4
NOVIEMBRE	31	16.7	10.4	4.1	-18
DICIEMBRE	27	13.6	7.4	1.3	-12
A N U A L	45	21.8	14.9	8.1	-18

---

	número de días despejados	días medio nublados	días nublados cerrado	días con heladas
ENERO	23.13	3.6	4.6	13.5
FEBRERO	19.54	4.91	3.79	9.16
MARZO	20.75	5.04	5.20	7.5
ABRIL	23.16	4.32	2.52	2.95
MAYO	26.15	2.84	2	0.26
JUNIO	28.5	1	0.57	0
JULIO	26.15	3.23	2.61	0
AGOSTO	23.33	3.7	3.95	0
SEPTIEMBRE	25.83	1.91	2.25	0
OCTUBRE	26.86	1.56	2.56	0.63
NOVIEMBRE	23.12	3.08	3.79	5.95
DICIEMBRE	22.95	3.65	4.3	12.95
A N U A L	288.47	38.84	37.89	52.9

---

HUMEDAD RELATIVA MEDIA ANUAL (%)

ENERO	50
FEBRERO	45
MARZO	53
ABRIL	48
MAYO	46
JUNIO	45
JULIO	50
AGOSTO	57
SEPTIEMBRE	61
OCTUBRE	46
NOVIEMBRE	45
DICIEMBRE	52
A N U A L	

---

DIAS GRADO MENSUAL DE CALEFACCION

ENERO	360
FEBRERO	283
MARZO	270
NOVIEMBRE	228
DICIEMBRE	329

---

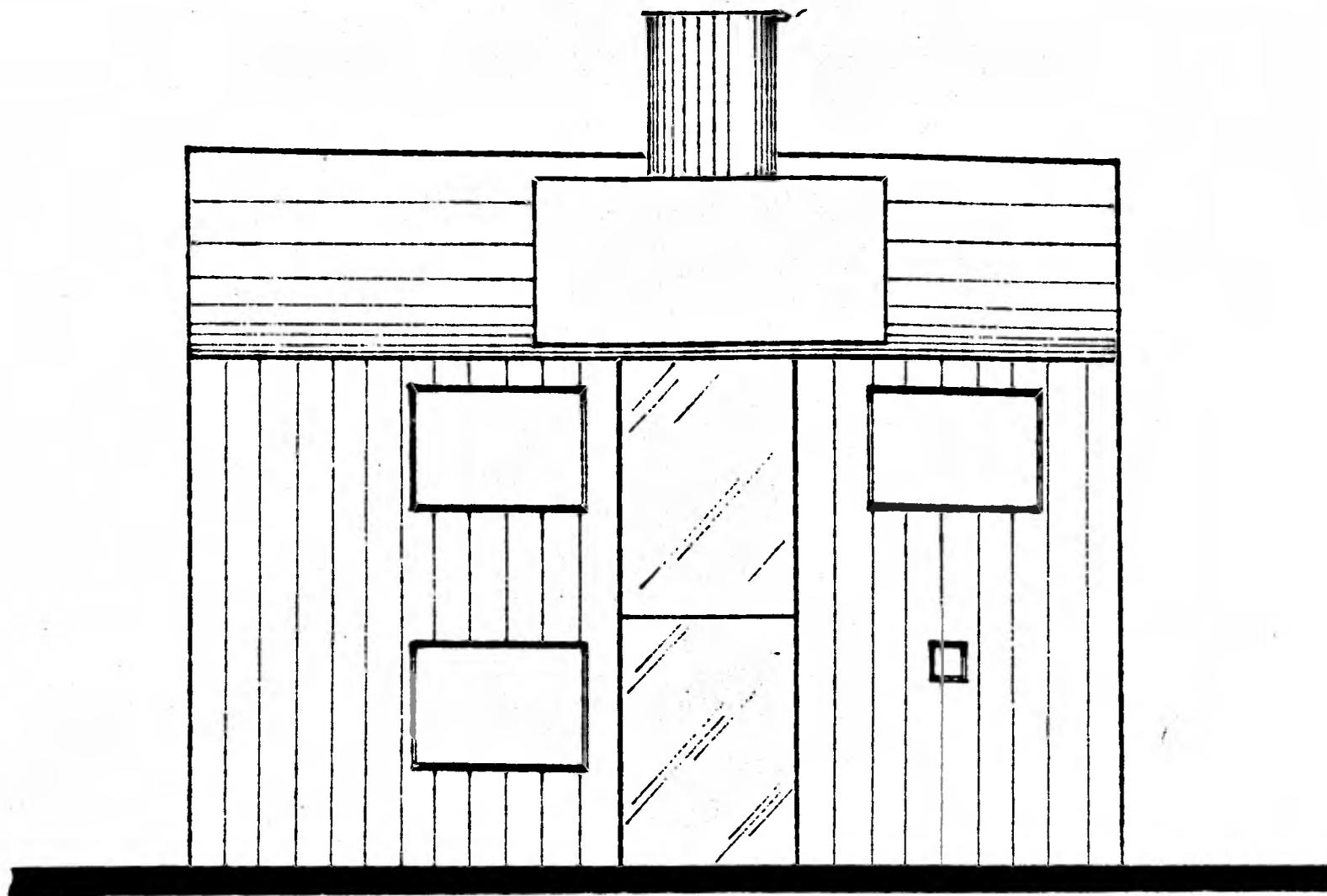
TEMPERATURA AMBIENTE HORARIA ( °C )

HORA	22 DICIEMBRE	23 DICIEMBRE	24 DICIEMBRE
8-9	18.2	16.4	19
9-10	18.4	17.5	20.2
10-11	20.7	18.2	20.8
11-12	18.0	19.0	26.0
12-13	18.2	18.0	25.3
13-14	20.0	19.8	22.0
14-15	18.0	19.2	19.8
15-16	15.8	16.0	17.6
16-17	12.5	14.6	17.0
17-18	9.4	12.8	14.0
18-19	7.6	11.3	11.3
19-20	5.3	9.4	8.2
20-21 *	3.8	6.7	5.8
21-22	1.7	5.0	3.1
22-23	0	3.6	1.4
23-24	-2	2.0	1.0
24-1	-4	0	-0.5
1-2	-2.4	-1	-2
2-3	0	0	0
3-4	3	1.3	3.8
4-5	5.2	3.8	6.5
5-6	8.2	6.0	8.9
6-7	10.6	8	11.5
7-8	13.8	12	15.8

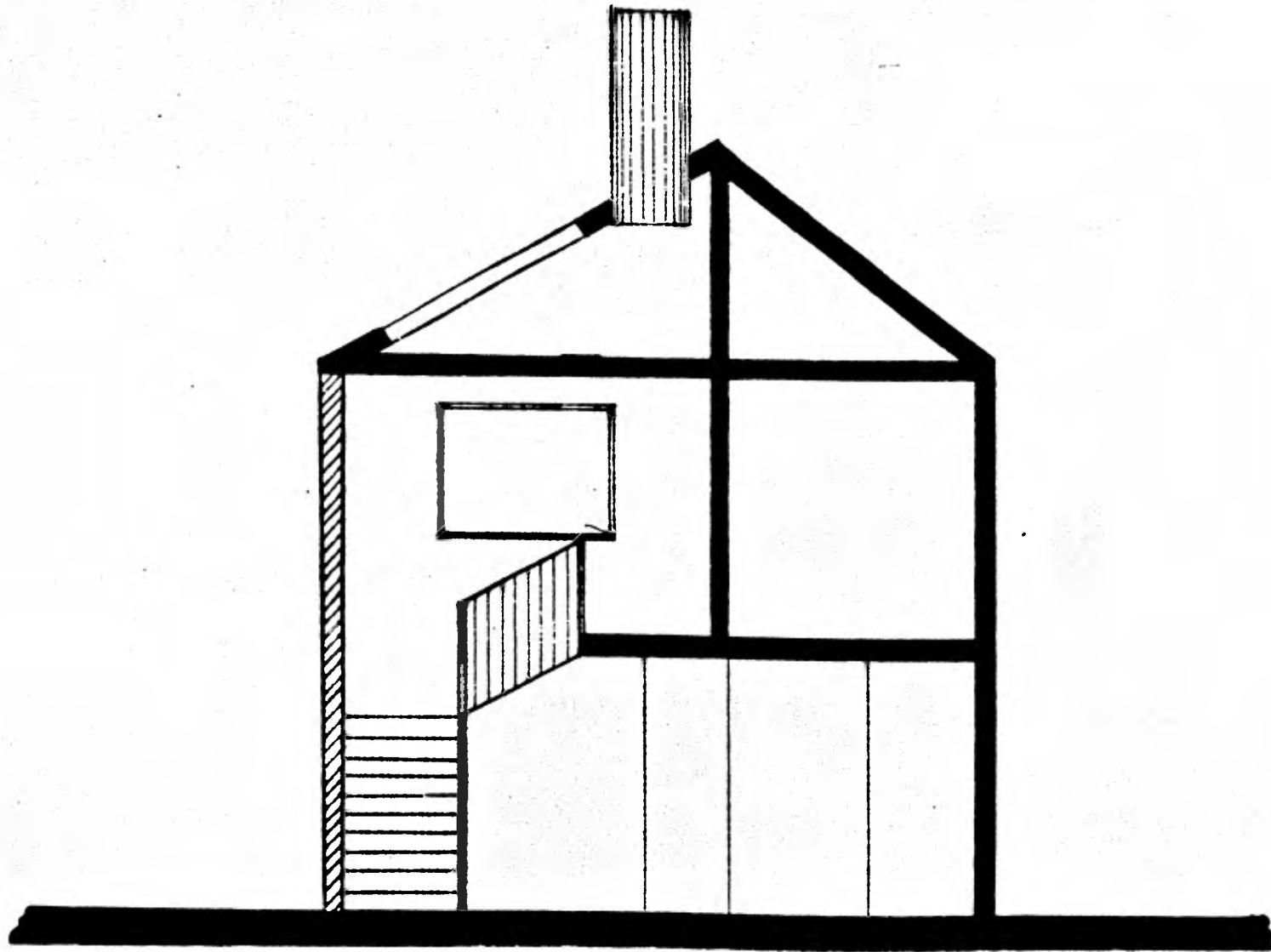
\* A partir de las 20 horas los valores son estimados

A P E N D I C E C

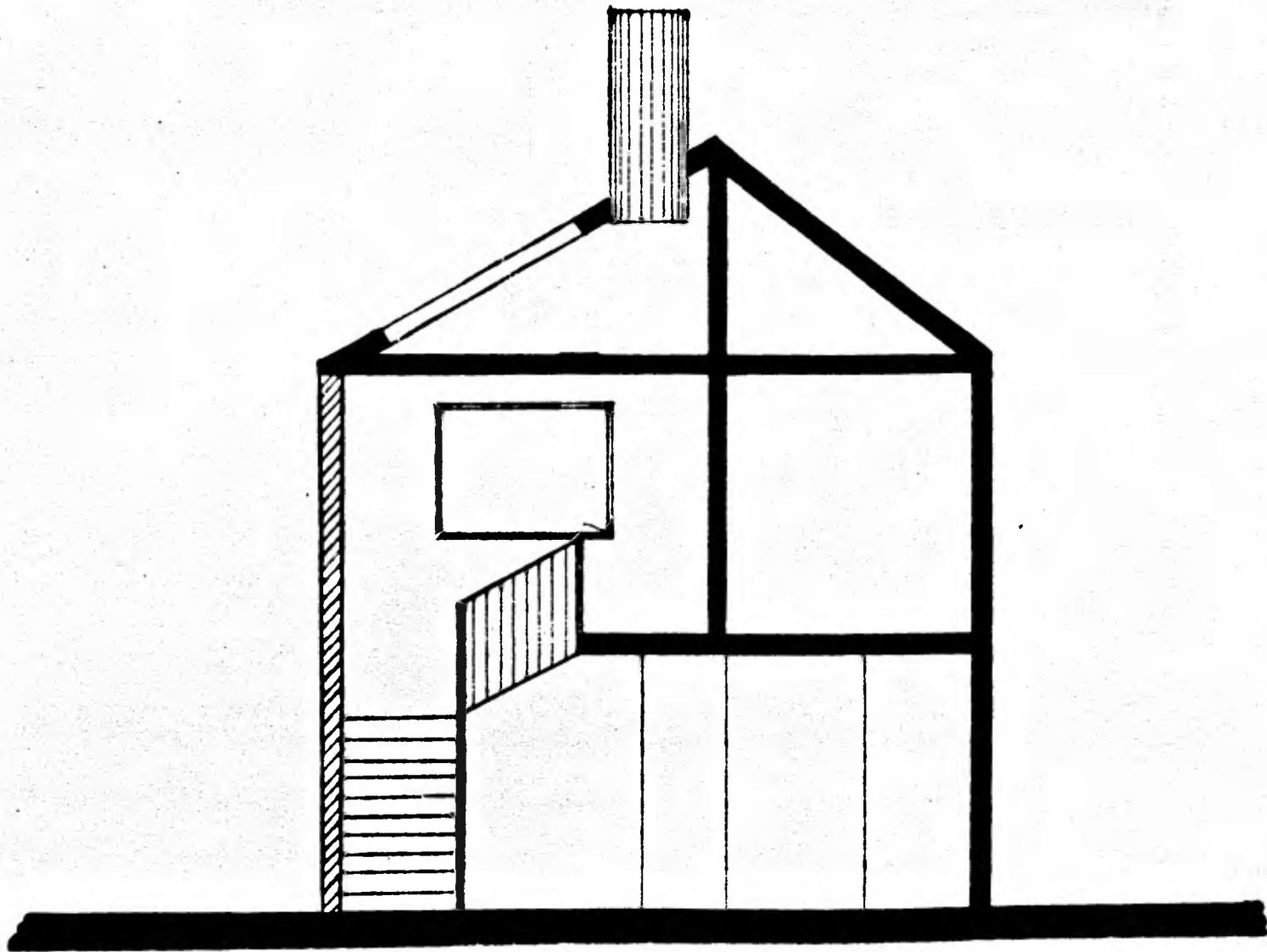
P L A N O S D E L A C A S A



FACHADA SUR

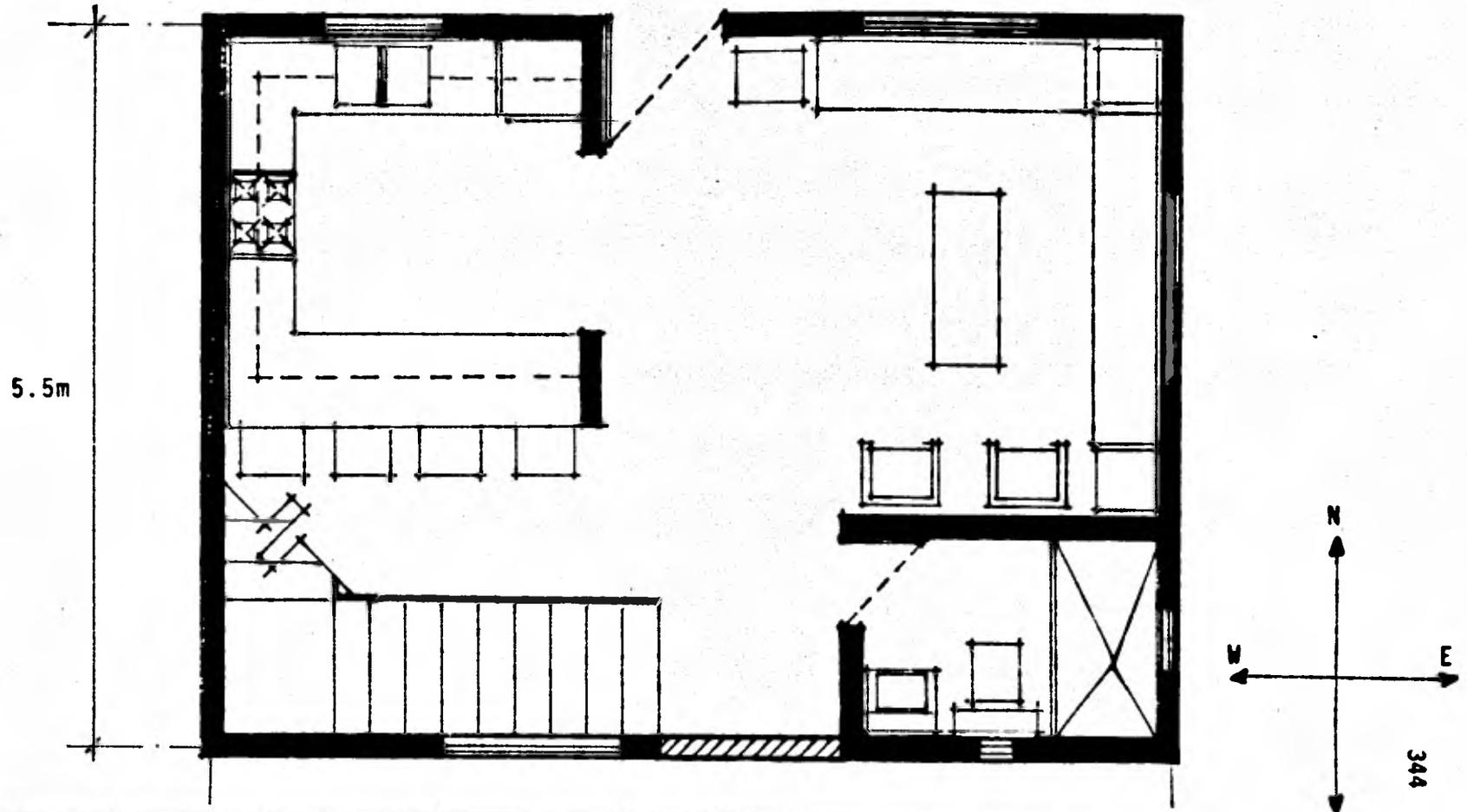


CORTE TRANSVERSAL

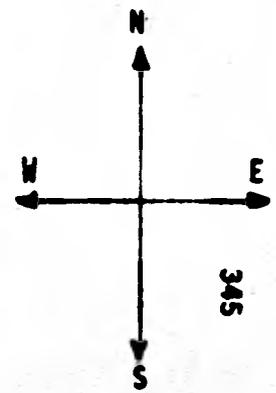
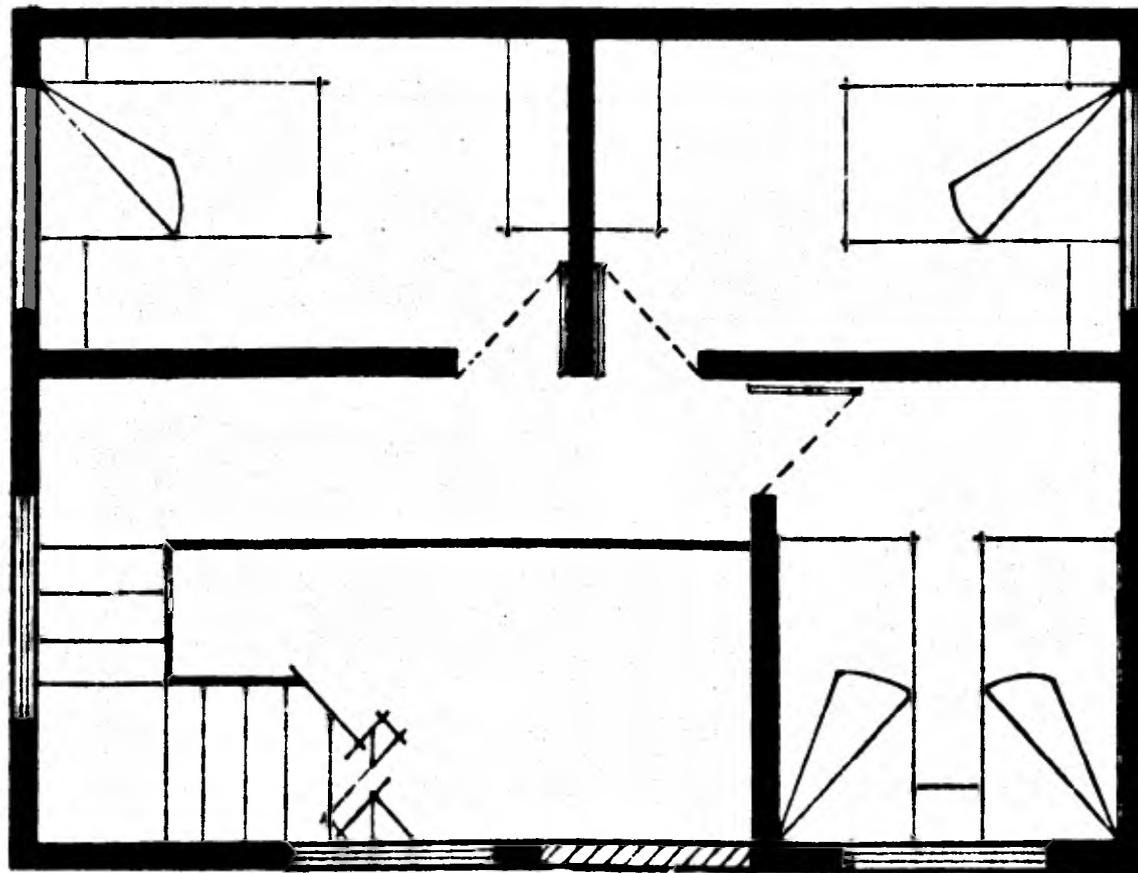


CORTE TRANSVERSAL

PLANTA BAJA



PLANTA ALTA



## C O N C L U S I O N E S

Debido a la gran aplicabilidad de los colectores planos en los sistemas solares, y tomando en cuenta la falta de información sobre los mismos en nuestra Facultad, consideramos de interés extendernos en el capítulo II (Teoría de colectores planos) con el objeto de presentar un análisis detallado del rendimiento del colector, de tal manera que puede servir como referencia bibliográfica para los compañeros que cursan la materia optativa referente al tema.

Se presentó de una manera actualizada el tema referente a la circulación natural en colectores planos, lo cual consideramos importante, pues con este método de cálculo del flujo de masa, a través del colector podemos tener cierta seguridad de que el flujo en el sistema se establecerá, según las características del sistema.

Se desarrolló un conjunto de programas que facilitan de una manera extraordinaria los cálculos necesarios para el diseño y simulación del colector. Siendo lo más importante:

- 1) Los programas pueden ser utilizados para el diseño y simulación de un colector termotanque que de circulación natural, sin estar restringidos a una localidad específica, lo cual les da una gran aplicabilidad.
- 2) La facilidad de su empleo, pues pueden ser grabados

en tarjetas magnéticas para una posterior utilización.

- 3) La unidad de computación es una calculadora de mano programable, la cual es prácticamente accesible a cualquier persona interesada en el tema de los -- colectores.

Del diseño obtenido, podemos decir que es un sistema sencillo, el cual puede ser construido con materiales económicos, de tal manera que pueda competir con los sistemas convencionales de calentamiento de agua. En zonas rurales el sistema es completamente factible.

Con respecto al MURO-TROMBE, aprovechando las implicaciones, resultado de un sinnúmero de investigaciones que se han realizado sobre su comportamiento, se mostró el método bastante sencillo para determinar las dimensiones adecuadas de muro para que suministre la energía necesaria para obtener las condiciones de confort en el interior de una vivienda.

Para las necesidades de calefacción en localidades con un clima parecido a la Rumorosa, y una dimensión de vivienda regular, el sistema es rentable en zonas rurales y urbanas, debido a que su costo no es elevado, forma parte de la estructura de la vivienda y no requiere ningún mantenimiento.

Para zonas mucho más frías y viviendas mayores, el rendimiento del muro es dudoso.

El capítulo III presentó la teoría del efecto fotovoltaico partiendo de una somera descripción de la física de semicon-

ductores, necesaria para la comprensión del mismo, así como la descripción de los principales tipos de celdas solares empleados en la actualidad.

Asimismo, se mostró la manera como se han integrado estas celdas solares para formar los paneles fotovoltaicos y se presentó una metodología muy simple para calcular el número necesario de dichos paneles para formar un arreglo colector que satisfará los requerimientos de energía de una carga especificada.

Debido a las grandes ventajas de la generación fotovoltaica y al intenso trabajo de investigación que se está desarrollando en este campo, es posible anticipar que el costo de fabricación de las celdas solares se abatirá considerablemente en los próximos años.

Ya en la actualidad los sistemas fotovoltaicos representan una buena opción económica para aquellas localidades alejadas de la red de energía eléctrica convencional.

Además, con el desarrollo de nuevos materiales y técnicas de fabricación de estos dispositivos se espera incrementar significativamente su eficiencia, lo que asimismo repercutirá en el abatimiento de los costos de estos sistemas.

Otro aspecto que cabe resaltar es la gran versatilidad de los sistemas fotovoltaicos, lo que permite su empleo para satisfacer prácticamente cualquier demanda de energía eléctrica, ya sea en forma de corriente directa o como corriente alterna.

Lo anteriormente expuesto es de una gran importancia, porque estos sistemas podrían implementarse en las zonas rurales del país que en la actualidad carecen de energía eléctrica, lo

que contribuiría significativamente en el desarrollo económico de las mismas.

Finalmente, en el capítulo IV se presentó el diseño de un circuito inversor de corriente directa en alterna para su aprovechamiento en aparatos domésticos de uso común, empezando por una introducción a los rectificadores controlados de silicio (SCR) o tiristores y los transistores unijuntura, dispositivos que son ampliamente utilizados en sistemas de control electrónico, así como las gráficas características de los mismos, necesarias para el diseño de dichos sistemas.

Se seleccionó un inversor eléctrico debido a su alta eficiencia y a su bajo consumo de energía, características principales de los dispositivos semiconductores, a diferencia de los inversores convencionales del tipo motor-generador, los cuales tienen mayores pérdidas tanto eléctricas como mecánicas.

Además de las ventajas señaladas, el inversor electrónico es de un precio accesible y requiere de muy poco mantenimiento.

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

- 1.- "THE SUN"  
Mc. Daniels. 1978.
- 2.- "SOLAR ENGINEERING OF THERMAL PROCESSES"  
Jhon A. Duffie, William A. Beckman.  
Willey-Interscience. 1980.
- 3.- "APPLIED SOLAR ENERGY AN INTRODUCTION"  
Aden B. Meinel, Marjorie P. Meinel.  
Addison Wesley. 1979.
- 4.- "SOLAR ENERGY HANDBOOK THEORY AND APPLICATIONS"  
Ametek  
Chilton Book Company. 1979.
- 5.- "DISEÑO DE UN SISTEMA PASIVO DE CLIMATIZACION SOLAR PARA ZONAS ARIDAS Y SEMI-ARIDAS DE MEXICO"  
Sara Lilia Moya Acosta.  
Tesis Profesional. 1980.
- 6.- "ENERGY-EFFICIENT HOUSES"  
Alex Wade, Neal Ewenstein.  
Rodale Press. 1977.
- 7.- "THE PERFORMANCE OF SOLAR WATER HEATERS WITH NATURAL CIRCULATION"  
D.J. Close.  
Solar Energy, vol. 6, pag 33. 1962.
- 8.- "A FINITE-DIFFERENCE METHOD TO EVALUATE THE THERMAL PERFORMANCE OF A SOLAR WATER HEATER"  
K.S. Ong.

- Solar Energy, vol. 16, pag. 137. 1974.
- 9.- "THERMOSYPHON CIRCULATION IN SOLAR COLLECTORS"  
G.L. Morris, D.B.J. Ranatunga.  
Solar Energy, vol. 24 pag. 191. 1980.
- 10.- "PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR"  
Frank Kreith.  
Herrero Hermanos. 1978.
- 11.- "LA MECANICA DE LOS FLUIDOS"  
Irving. H. Shames.  
Mc. Graw-Hill. 1977.
- 12.- "ESTUDIO Y DESARROLLO DE SUPERFICIES SELECTIVAS PARA EL APRO-  
VECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR"  
Julia Quintana Llamas.  
Centro de Investigación de Materiales, U.N.A.M. 1976.
- 13.- "FLOW OF FLUIDS"  
Crane Co. 1976.
- 14.- "ASHRAE HANDBOOK"  
(1977 Fundamentals)  
ASHRAE. 1980.
- 15.- "PROGRAMAR UNO MISMO"  
Programable TI 58/59  
Texas Instruments. 1979.
- 16.- "SOLAR WATER HEATING IN SOUTH AFRICA"  
D. Chinnery.  
CSIRO, Rept., 248. 1967.
- 17.- "THE RESISTANCE NETWORK DESIGN METHOD FOR PASSIVE SOLAR SYS-  
TEMS"

W.A. Monsen, S.A. Klein, W.A. Beckman, and D.M. Utzinger.  
Proceedings of the 4<sup>th</sup> National Passive Solar Conference,  
pag 119, 1979.

- 18.- "DESIGN WITH CLIMATE, BIOCLIMATE APPROACH TO ARCHITECTU-  
RAL REGIONALISM"

Victor Olgyay.

Princeton University Press, Princeton, New Jersey. 1963.

- 19.- "SOLAR ELECTRICITY"

Wolfgang Palz.

UNESCO.

- 20.- "INTEGRATED ELECTRONICS"

Millman and Halkias.

Mc. Graw-Hill

- 21.- "DESCRIPCION Y OPTIMIZACION DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS"

Mariano Romero Valenzuela.

Tesis Profesional. 1980.

- 22.- "THE SOLAREX GUIDE TO SOLAR ELECTRICITY"

Solarex Corp.

U.S.A. 1979.

- 23.- "TRANSISTORES, CIRCUITOS - DISEÑO"

Texas Instruments Incorporated.

C.E.C.S.A. 1980.

- 24.- "SCR MANUAL"

J.W. Ritcey.

General Electric Company, 1979.

- 25.- "PRINCIPLES OF INVERTER CIRCUITS"

Bedford and Holf.

Willey, 1979.

- 26.- "THYRISTORS, RECTIFIERS AND DIACS"  
RCA Solid State '74 Databook series.  
Radio Corporation of America.
- 27.- "SEMICONDUCTOR DATA HANDBOOK"  
Third Edition.  
General Electric Company.
- 28.- "DIRECT AND ALTERNATING CURRENTS"  
E.A. Loew, E.E.  
Mc. Graw-Hill, 1979.

