

300617

12
28



UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE INGENIERIA
INCORPORADA A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

APLICACION DE LA ENERGIA SOLAR COMO UN RECURSO ALTERNO EN EL CALENTAMIENTO DE AGUA

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
(AREA MECANICA)

PRESENTA:

FERNANDO TREJO SOULE

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

INDICE

	Página
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
GENERALIDADES	4
CAPITULO II	
FUNDAMENTOS DE ASTRONOMIA	30
CAPITULO III	
RADIACION SOLAR	53
CAPITULO IV	
CALCULO DE LA RADIACION SOLAR TERRESTRE	108
CAPITULO V	
SISTEMAS Y COLECTORES PARA CALENTAMIENTO DE AGUA	126
CAPITULO VI	
COMPORTAMIENTO DE LOS COLECTORES	148

CAPITULO VII

PROCEDIMIENTOS DE CALCULO PARA EL DISEÑO
DE SISTEMAS

168

CAPITULO VIII

EJEMPLO DE APLICACION PARA EL CALCULO DE UN
SISTEMA CAPTADOR DE ENERGIA SOLAR (COLECTOR
SOLAR) PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA EN LA
CIUDAD DE CUERNAVACA, MORELOS

179

CONCLUSIONES

227

BIBLIOGRAFIA

230

NO SE DEBE PENSAR,

AUN CON EL SILENCIO DE LOS ESCRITORES CONTEMPORANEOS,
QUE EL USO DE LA ENERGIA SOLAR PARA OPERACIONES MECA-
NICAS ES RECIENTE.

AL CONTRARIO,

SE DEBE RECONOCER QUE ESTA IDEA ES MUY ANTIGUA Y SU
LENTO DESARROLLO A TRAVES DE LOS SIGLOS HA DADO NACI-
MIENTO A CURIOSOS DISEÑOS.

AUGUSTIN MOUCHOT'S

(1860)

INTRODUCCION

El enorme crecimiento de la población mundial ha traído como consecuencia diversas crisis; siendo una de ellas la de los energéticos que, aunque había creado varios conflictos a lo largo de estos últimos dos siglos, en 1973 se convirtió en una crisis mundial, de gran importancia en el desarrollo económico y político.

Durante muchos siglos, la humanidad se desarrolló tomando el trabajo físico como base; posteriormente se ayudó de algunos animales y más adelante el hombre utilizó elementos naturales como el aire y el agua para mover los molinos de viento y las ruedas hidráulicas, mecanismos que incrementaron la producción. Más adelante, el uso del carbón mineral permitiría el desarrollo de la máquina de vapor y culmina en la Revolución Industrial, es decir, la producción en masa; ahora los conservadores tenían que cambiar su mentalidad hacia un mundo nuevo en forma repentina.

El ingenio del hombre prosiguió para dar paso al desarrollo del motor de combustión interna; así, el hombre pudo desplazarse más fácilmente, y a su vez, incrementar la producción en el medio industrial.

En el siglo XX, la enorme explotación del petróleo y sus derivados, y la producción masiva de vehículos ocasionó un consumismo irresponsable de energéticos, empleándoseles para los sistemas de transporte aéreo, terrestre y marítimo, defensa nacional, complejos industriales (principalmente la industria química)

y en la agricultura, lo que en la década de los 70's produjo la crisis mundial de energéticos.

De acuerdo a lo anterior, la humanidad empezó a comprender la importancia del petróleo, y se dedicó a buscar fuentes alternas de energía, pensando en un futuro sin petróleo.

Al no encontrar un combustible multifacético, la tecnología se ha enfocado a desarrollar sistemas diferentes, algunos tan antiguos como la humanidad, y buscando a su vez que no impliquen problemas de contaminación, cambios en el medio ambiente o que dejen residuos peligrosos, situación que nos ha conciencizado en irnos acoplando a nuevos sistemas de vida.

Por tal situación, en esta investigación, mi deseo es abordar en forma modesta los fundamentos y aplicación de un sistema práctico y económico de energía solar, con amplias posibilidades de desarrollo de aplicaciones que se traducen en un ahorro de combustible; en su elaboración, está implícito el desempeño de mis mejores esfuerzos con el ferviente deseo de alcanzar una meta importante en mi existencia, aceptando de los señores del H. Juro sus observaciones, que servirán para fortalecer la idea que me llevó a escribir este tema.

CAPITULO I GENERALIDADES

I.1 ANTECEDENTES HISTORICOS

I.2. CLASES DE ENERGETICOS

I.2.1. RECURSOS NO RENOVABLES

- i) CARBON NATURAL
- ii) ENERGIA NUCLEAR
- iii) PETROLEO

I.2.2. RECURSOS RENOVABLES

- i) ENERGIA HIDRAULICA
- ii) ENERGIA MARITIMA
- iii) ENERGIA GEOTERMICA
- iv) ENERGIA EOLICA
- v) ENERGIA SOLAR

I.3. APLICACIONES Y POSIBILIDADES DE DESARROLLO DE LA ENER GIA SOLAR

I.3.1 APLICACIONES DE LA ENERGIA SOLAR A BAJAS TEMPERATURAS

- FACTORES QUE INFLUYEN PARA ESCOGER ALGUN TIPO DE --
ENERGIA
- PROYECTOS CON EL USO DE AGUA CALIENTE
- PROYECTOS CON EL USO DE AIRE CALIENTE
- PROYECTOS CON EL USO DE VAPOR

I.1. ANTECEDENTES HISTORICOS

La utilización del sol se originó en pueblos muy disi miles, tales como los Egipcios, Incas y otras culturas que consi deraron al sol como su Dios más importante, reconociendo su in-- fluencia en la agricultura y condiciones climáticas.

Otras teorías explican el origen de antiguas construcu ciones megalíticas como calendarios e instrumentos rudimentarios para calcular el paso del tiempo. Stonehenge (2,400 A.C.) en In-- glaterra, el Calendario Azteca en Teotihuacan, las pirámides en Tikal, y demás construcciones en todos los continentes son testiu gos de la preocupación e importancia que el hombre dió al sol pau ra poder calcular el tiempo y medirlo en años o épocas favorables para la siembra.

Sin embargo, parece ser que los egipcios fueron los - que descubrieron el efecto invernadero. Arquímudes en el Siglo - III A.C. incendió la flota romana de Siracusa con una especie de espejos, o tal vez eran los escudos bruñidos de los soldados agru pados de modo que formaran un espejo cóncavo.

Hacia el año 100 D.C., Herón de Alejandruía construyó - un dispositivo de bombeo de agua. En el "Romance de la Rosa" de - Jehan de Meung (S. XIII D.C.), se encuentran algunas alusiones a la radiación solar, consagrada al dióptrico. En 1815, Salomón de Claus construyó una bomba cuya fuerza motriz provenía de aire cau lentado por el sol. En el Siglo XVIII Buffon construyó un horno

solar partiendo de espejos cóncavos con facetas. En 1774, Joseph Priestley, concentrando los rayos solares sobre óxido de mercurio, obtuvo un gas que era capaz de quemar una bujía más vivamente que el aire, con lo que descubrió el oxígeno, permitiendo que Lavoissier estableciera la teoría completa de la combustión debida a la combinación de un cuerpo con el oxígeno.

El mismo Lavoissier construyó un horno solar con ayuda de un lente líquido y consiguió fundir el platino (1,7550 C).

A finales del Siglo XVIII, el suizo H. B. de Saussure, creó una máquina solar formada por dos vidrios planos, situados sobre un captador orientado hacia el sol.

En 1872, en el desierto de Atacama, en Chile, se construyó un destilador solar de 5,000 m² que suministraba agua a una mina de nitrato de sodio. Esta instalación funcionó hasta 1912, cuando la mina fue abandonada. Este destilador producía alrededor de 20,000 litros de agua dulce por día.

En 1878 A. Mouchot, profesor del Liceo de Tours, inventó una máquina de vapor que funcionaba a 3.5 atmósferas de presión con la ayuda de un gran espejo cóncavo. Esta máquina fue utilizada para accionar la imprenta de la Exposición Universal en París; su potencia era de 2 C.V. con una superficie de 20 m² de colectores.

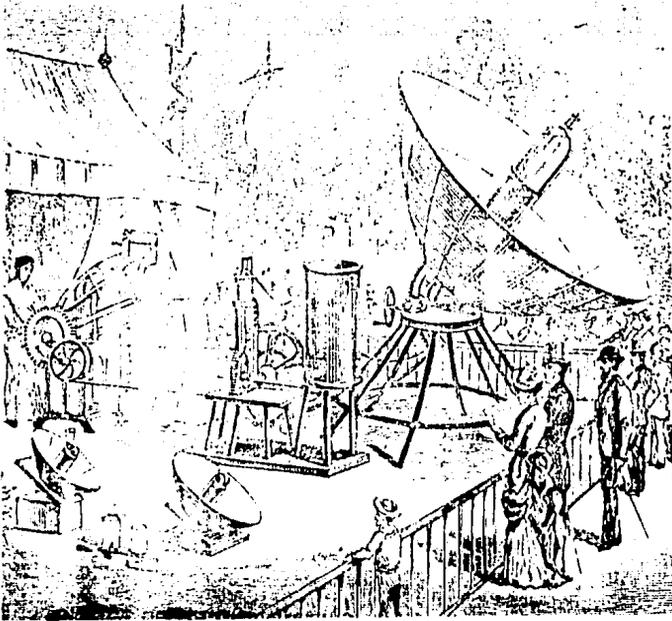


Figura 1

Imprenta de A. Mouchot, presentada en la Exposición
Universal en París, en 1878.

En 1901, Eneas expuso su máquina solar de 15 C.V. en
la granja de avestruces de Cawston, en Pasadena.

VISIT THE
OSTRICH FARM

**100 GIGANTIC
BIRDS**

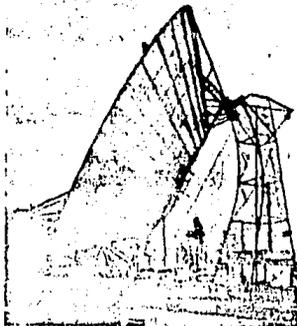


**PASADENA ELECTRIC CARS PASS
THE ENTRANCE**

No Extra Charge to see

THE SOLAR MOTOR

The only machine of its kind in the world in daily operation - its horsepower engine is heat, the heat of the sun.



OPEN TO VISITORS EVERY DAY

Figura 2

Anuncio de la granja de avestruces y del motor solar de Eneas, en Pasadena (1901).

Entre 1902 y 1908, Willsie y Boyle construyeron en St. Louis y en Needles, California, máquinas solares de 6 a 20 C.V.- que funcionaban con agua y gas sulfuroso. En la misma época, Shuman desarrolló máquinas solares de varios caballos para bombear agua.

En 1913, Shuman en colaboración con Boys, instaló cerca del Cairo una enorme máquina de 50 C.V. con largos cilindros parabólicos que concentraban la radiación solar sobre una canalización central con un factor de concentración de 4.5 para bombear el agua del Río Nilo con fines de riego.

Uno de los primeros ensayos del almacenamiento de energía solar fue realizado por Harrington, en Nuevo México, en la década de los 30's. La luz se concentraba sobre un hervidor, que permitía el funcionamiento de una máquina de vapor ésta bombeaba el agua y la enviaba a un recipiente de 18 m³ a 6 m. de altura desde donde se derramaba arrastrando una turbina acoplada a un dinamo que alimentaba día y noche las pequeñas lámparas eléctricas de una mina.

Con excepción de G. Abbot, que en la Conferencia Nacional de la Energía, en 1933, presentó una máquina de vapor de 0.5 C.V. y en 1938 ensayó en Florida una máquina de 0.2 C.V. con un hervidor tipo Flash; no hubo manifestación alguna sobre desarrollos de energía solar. La razón hay que buscarla en el hecho de que los aparatos descritos anteriormente, no podían competir con

la potencia producida por las máquinas que funcionaban a base de combustibles fósiles (de combustión interna), cuyos precios se reducían cada vez más.

En 1942, el M.I.T. y la Universidad de Yale comenzaron los estudios fundamentales sobre la calefacción en las casas, los colectores planos y las posibilidades de la fotoquímica. Investigaciones similares también se efectuaron en la U.R.S.S. bajo la dirección de V.A. Baum, como también en Nueva Delhi, India. Fue a partir de 1950 cuando las aplicaciones de la energía solar comenzaron a desarrollarse. Al mismo tiempo se realizaron investigaciones sobre el almacenamiento de energía.

Así también, en 1950, se empezaron a celebrar congresos y simposiums regularmente, con el objeto de aportar nuevas ideas para la utilización y aplicaciones de la Energía Solar; - entre los más importantes, están los siguientes:

- 1954 U.N.E.S.C.O.
- 1955 Tucson, Arizona, E.U.A.
- 1956 Phoenix, Arizona, E.U.A.
- 1958 Mont Louis, bajo la dirección de F. Trombe
- 1961 Roma, Conferencia de las Naciones Unidas
- 1973 París, U.N.E.S.C.O., bajo la dirección de M. Perrot.

Es importante mencionar que en la década de los 50's, los satélites puestos en órbita iban equipados con 'celdas sola-

res', que convertían la energía solar en energía eléctrica necesaria para hacer funcionar los instrumentos a bordo.

Fue precisamente la crisis energética que se produjo en Octubre de 1973, donde empezaron a realizarse numerosos trabajos de investigación más formales, con la esperanza de obtener -- energía a bajo costo, de buen rendimiento, capaces de competir -- económicamente con las máquinas existentes que emplean combusti-- bles derivados del petróleo.

1.2. CLASES DE ENERGETICOS

Las posibilidades energéticas las podemos dividir en: **RECURSOS NO RENOVABLES.** - Son aquellos en que la voluntad y es-- fuerzo del hombre, son incapaces para lograr la renovación o rein-- tegración de esa riqueza, y que el tomarla o extraerla implica su extinción en algún momento. Como ejemplos pueden citarse la explo-- tación del carbón natural, la energía nuclear y el petróleo.

RECURSOS RENOVABLES. - Son todas aquellas actividades que hacen -- producir a la naturaleza, o toman de ella satisfactores de necesi-- dades, aprovechando la metamorfosis de determinados elementos que el hombre dirige, derivados de los conocimientos adquiridos de -- las leyes de la vida vegetal y animal. Aún así, la tecnología no está suficientemente desarrollada en algunos países; en otras si-- tuaciones, es costosa su obtención, no son fuentes continuas de -- energía y pueden escasear cuando más se les requiere, por lo que

se necesita un proceso de acumulación; como factores positivos, tenemos que no son contaminantes ni alteran el medio ambiente como se observará en los siguientes capítulos, y se puede disponer de tales recursos sin grandes esfuerzos humanos. Citaremos como ejemplos: la agricultura, la explotación de bosques y los diferentes tipos de energía, como son la solar, eólica, hidráulica, -marítima, geotérmica y biomásica.

Para los efectos concretos de este trabajo, nos enfocaremos a un análisis somero de cada posibilidad energética y después desarrollaremos el tema de la energía solar.

I.2.1. RECURSOS NO RENOVABLES

Dentro de estos tenemos a los siguientes:

i) Carbón Natural. - Se encuentra en grandes cantidades en casi toda la corteza terrestre; su utilización al ritmo actual sería suficiente para poder abastecer las necesidades de la población mundial durante 200 años. Es poco utilizado por la incomodidad en su manejo y uso, tiene graves consecuencias en el medio, ya que al realizarse la combustión, los elementos volátiles se oxidan y quedan cenizas sólidas y un sulfuro en forma de SO_2 , que crea uno de los elementos más contaminantes del medio cuando se combinan con el agua, que puede dar lugar a la lluvia ácida (H_2SO_3 o H_2SO_4). Se puede utilizar en la generación de energía eléctrica, construyendo una central eléctrica cerca de las minas, ya que de otra -

manera la transportación del carbón sería excesivamente cara.

ii) Energía Nuclear. - Se considera la mejor posibilidad frente a las posibilidades energéticas. En varios países se utiliza la energía eléctrica derivada de centrales nucleares. Las dificultades que aquí encontramos son de carácter económico, ya que la -- instalación de los reactores es muy costosa, además de los problemas de seguridad en el funcionamiento de los reactores, donde pueden surgir emisiones de gases y vapores radioactivos. El 68% del calor generado por el reactor, no es aprovechado, y se desecha con las pérdidas de agua que van a dar a mares y ríos generando la contaminación térmica. Las centrales nucleares se encuentran lejos de las ciudades por los problemas que pudieran surgir; los desechos continuamente ocasionan una elevación de la temperatura (de 2 a 5^o C), alterando de manera drástica el medio ambiente. De acuerdo a lo anterior, es necesaria una seguridad completa, -- ya que es imposible captar la radioactividad con los sentidos. -- Otro problema es la disposición final de los residuos radioactivos, de una vida media de 100,000 años.

iii) El Petróleo. - Existen indicios de que en la época paleolítica se empleó betún en las construcciones. Los egipcios la usaron en la conservación de las momias. Los japoneses utilizaban aceite de roca para la iluminación hace 2,000 años aproximadamente. La aparición del petróleo como fuente de energía es reciente. Las primeras explotaciones comerciales como un sustituto del carbón se hicieron en 1857 en Rumania, y posteriormente en Estados Uni-

dos en 1859, donde se inició la explotación a gran escala. El motor de combustión incrementó la producción, así como la Primera Guerra Mundial; de 1860 a 1920 se quintuplicó la producción. Estados Unidos disminuyó su producción antes de la Segunda Guerra Mundial, donde se explotaron los recursos del Medio Oriente. En el presente, es el principal combustible para mover cualquier economía y explotar cualquier región; como forma de transporte, - para uso industrial y agrícola, y como materia prima. Por sus múltiples usos, es imposible sustituirlo por una sola fuente alternativa, pero se está buscando una gama de posibilidades energéticas diferentes, que puedan desplazar en forma paulatina al petróleo. Aún así, la extinción del petróleo se espera para la primera o segunda década del Siglo XXI al ritmo del consumo actual.

I.2.2. RECURSOS RENOVABLES

Dentro de estos se encuentran:

1) Energía Hidráulica. - Es uno de los medios más importantes para la generación de energía eléctrica, evitando la contaminación ambiental. El problema que presenta es su estabilidad, ya que depende de condiciones naturales (lluvias, caudales de ríos, etc.); las inversiones iniciales para las instalaciones hidroeléctricas son muy costosas, y se localizan alejadas de los centros de consumo, por lo que el almacenamiento es uno de los factores más importantes en la generación de electricidad. Las regiones más favorecidas son las que se encuentran en la zona ecuatorial, así.

como las zonas montañosas con ríos. Otro aspecto importante es - su alto grado de eficiencia, que varía entre un 70 a 90%. Se espera que cuando los centros solares estén funcionando, la hidroelectricidad sea utilizada para almacenar esta energía y poder - cubrir la demanda requerida.

ii) Energía Marítima. - El potencial que tiene esta energía es i limitado, pero hasta ahora es una posibilidad solo probada en la boratorios (a excepción de La Rance) en forma satisfactoria. La potencialidad de los mares descansa sobre una fuente que oscila cada 12.4 horas, y durante el año se registran variaciones tempo rales, debido a la influencia que ejerce el sol sobre el sistema Tierra-Luna. Los gastos de producción son excesivamente elevados, y se encuentran alejados de los centros de consumo. La -- concentración de sal en el mar corroe las instalaciones, por lo que disminuye la vida útil de estos centros. Actualmente la eficiencia máxima de una central maremotriz es del 18% (en un estua rio del río La Rance en Francia), lo que muestra las dificultades tecnológicas a las que se enfrentan los científicos.

iii) Energía Geotérmica. - Es posible utilizar esta clase de energ ía (usando el vapor emitido, o bien perforando las capas poros as para hacer salir el agua recalentada) con el objeto de produc cir energía eléctrica. Son pocos los países que poseen pozos geo térmicos y menos los que utilizan esta clase de energía, ya que el costo de extracción es sumamente elevado y la vida del equipo relativamente corta por la erosión producida por las sales.

iv) Energía Eólica. - Esta energía fue utilizada durante siglos; actualmente todavía podemos ver algunos molinos de viento que en la antigüedad fueron utilizados para moler trigo o bombear agua de los pozos. Su momento cumbre lo alcanzó durante el Siglo XIX, cuando los veloces veleros ingleses transportaban mercancía del Medio Oriente e India hacia Gran Bretaña y sus colonias. Sus records de velocidad fueron superados hasta 1976. Dada la urgencia de posibilidades energéticas que vivimos, es importante convertir este tipo de energía en electricidad. Los lugares donde es más aprovechable esta energía, es en las montañas o en las costas; sin embargo, en pequeña escala se puede utilizar en cualquier lugar. El mayor problema que presenta es, la discontinuidad o variación de la fuerza energética, así como su almacenamiento. Los costos dependen de la localidad. Los generadores de viento construídos recientemente pueden crear expectativas, ya que sus costos tienden a disminuir.

v) Energía Solar. - Los sistemas que utilizan este tipo de energía son de los más remotos que existen, pero su desarrollo se frenó demasiado al descubrirse otro tipo de energéticos, como el petróleo.

El desarrollo de esta investigación se basa en la aplicación de la energía solar para el calentamiento de agua, en sustitución (no total) de los calentadores convencionales. El ahorro del gas L.P. tiene dos funciones principales:

- El ahorro económico (que se demostrará en la aplicación final - de esta investigación).
- El gas ahorrado puede ser utilizado en la industria, la cual re quiere de temperaturas más altas y continuas, y su uso en el -- presente es más necesario en la industria que en los hogares, - tomando en cuenta que existen opciones como la energía solar, - que cubre los requerimientos.

A continuación aparece en forma concreta las ventajas y desventajas de la energía solar, así como sus aplicaciones y - opciones futuras.

I.3. APLICACIONES Y POSIBILIDADES DE DESARROLLO DE LA ENERGIA SO- LAR

Las ventajas en las aplicaciones de la energía solar - radican principalmente en que es una fuente de energía inagotable y abundante, no es contaminante, no modifica el medio ambiente, y es de un costo de inversión total, relativamente bajo. (La inversión inicial es alta, pero sus costos de operación y mantenimiento a lo largo de su vida útil son casi despreciables, alrededor - del 2% de la inversión inicial anualmente).

Entre sus desventajas, tenemos que es una energía poco densa e intermitente, por lo que frecuentemente se requiere de un sistema de acumulación. Esta situación, aunada al bajo costo del petróleo, fué un obstáculo para el desarrollo en las aplicaciones

de este tipo de energía.

La crisis del petróleo en 1973 estimuló el estudio de otras fuentes de energía inagotables, y en algunas aplicaciones de sistemas híbridos (sistemas alternos de energía).

La energía solar se ha desarrollado ampliamente en zonas remotas como calefacción y energía eléctrica, debido al costo de transportación del petróleo. Así también en algunas ciudades europeas se ha utilizado para el calentamiento de agua en casas e industrias. En la construcción de células fotoeléctricas se ha progresado bastante, pero se necesita dar un paso grande con respecto a la electricidad.

La Organización de Naciones Unidas dentro del desarrollo industrial presentó un programa a corto (hasta 1989), mediano (1989-2000) y largo (después del año 2000) plazo para la utilización de la energía solar.

A corto plazo se piensa explotar y fabricar equipo -- bien conocido con temperaturas bajas, como son los colectores planos, calentadores de agua, secadores de cereales, radiadores de calefacción, cocinas, etc..

A mediano plazo existen programas de desarrollo técnico e investigación académica relacionados a temperaturas medias y altas, basados en colectores parabólicos de concentración con

o sin rastreo (enfriadores, refrigeradores, bombas de agua y pequeños generadores de energía eléctrica).

La tercera etapa abarca programas de investigación y desarrollo técnico basados en altas temperaturas. Los productos que se vayan a fabricar, se relacionan con la tecnología de -- transmisión óptica, celdas solares, semiconductores, conversión fotovoltaica y ciencia de los materiales.

A continuación se presenta una tabla de las aplicaciones generales de la energía solar en el presente, con sus características principales:

SISTEMA	CARACTERISTICAS PRINCIPALES	APLICACION ACTUAL
Colectores Planos	Bajas temperaturas obtenidas Tecnología sencilla Bajo costo Industria en desarrollo	Calentamiento de agua para uso doméstico Calefacción Uso industrial y agrícola Destiladores
Colectores Concentradores	Altas temperaturas obtenidas Alto costo Alta tecnología	Hornos solares Refrigeración

Investigación en desarro-

llo

Conversión di- recta a elec- tricidad	Alta tecnología Alto costo	Satélites Instalaciones expe- rimentales
Helio-Arqui- tectura	Aplicación para calefac- ción y refrigeración en - edificios	Instalaciones expe- rimentales

I.3.1. APLICACIONES DE LA ENERGIA SOLAR A BAJAS TEMPERATURAS

Como una fuente de calor para ser usada en la indus-
tria, la radiación solar es más aceptable en operaciones que re-
quieran calor a bajas temperaturas aplicadas en forma dispersa
y tal vez intermitente.

La industria y la agricultura utilizan una cantidad -
significante de calor en sus diversos procesos a baja temperatu-
ra. "La Corporación Intertecnológica (Intertechnology Corporation)
bajo convenio con E.R.D.A., ha estimado que, incluyendo el preca-
lentamiento de materiales, alrededor del 25% de todo el proceso -
de calentamiento industrial, es administrado abajo de los 212°F -
(100°C) y 40% abajo de 350°F (176°C)".¹

¹ Survey of Application of Solar Thermal Energy to Industrial Pro-
cess Heat. Inter Technology Corporation. Monthly Progress Report,
Number 4, May, 1976.

Usualmente, estas temperaturas son administradas por combustibles capaces de generar temperaturas mayores. La energía solar puede ser usada para proveer estas temperaturas con agua caliente, vapor y gases calientes en la operación en proceso.

Las operaciones industriales y agrícolas en zonas rurales o remotas aceptan en mayor grado el uso de la energía solar, ya que las fuentes de energía convencionales y los costos de transportación de los combustibles son eliminados, y el espacio utilizado por los colectores está disponible en mucho mayor grado que en zonas urbanas.

Las industrias que tienen un potencial significativo para usar energía térmica solar incluyen:

- Minería (secado de minerales)
- Tabaco (secado y deshidratado de tabaco con vapor saturado)
- Textiles (agua y aire caliente)
- Mobiliario (aire caliente)
- Producción de ciertos químicos (caucho sintético, procesamiento de plásticos, tintes orgánicos)
- Refinación del petróleo (precalentado el petróleo crudo previo a la destilación)
- Mezclas de asfalto para pavimentar (aire caliente para secado)
- Curtido de piel
- Industria metálica (encurtido con soluciones de ácido caliente, tratamiento de fosfato)

- Fabricado de metales (desengrasado, horneado, galvanizado).

Esta lista muestra el amplio rango de las aplicaciones potenciales de la energía térmica solar en la industria.²

- Factores que influyen para escoger algún tipo de energía.

Existen diferentes factores que nos influyen para escoger un tipo de energía, y en algunos casos una mezcla. A continuación se muestra una lista de los factores principales:

- Habilidad para satisfacer las especificaciones de diseño y --
operación
- Costos de capital
- Costos de operación
- Costos de combustible y disponibilidad
- Dependencia
- Simplicidad de operación
- Disponibilidad de equipo
- Experiencia general en la industria con equipo en la aplicación particular
- Experiencia de comprador con este tipo de equipo
- Suficiencia y precisión de los datos de ejecución
- Experiencia con el vendedor
- Limitación de vendedores que reducen las partes disponibles en inventario.

2 Proceedings of the Solar Industrial Process Heat Workshop College Park, Maryland. June 28, 29, 1976. E.R.D.A. and the University of Maryland.

- Beneficios secundarios potenciales - nivel de ruido, mejoramiento en la calidad de los productos, impacto en el medio ambiente, seguridad, etc.
- Grado de conocimiento de las necesidades energéticas de la compañía
- Proyecto con el uso de agua caliente.

Como una parte de los programas para el calentamiento solar en la industria, la agencia fundó cinco proyectos de investigación y diseño en la generación de agua caliente, los cuales son representativos de la variedad de potencial de las aplicaciones solares:

- 1) Lavado de bidones (botes, latas, envases).- Para este proyecto, un sistema solar ha sido diseñado por Acurex Corporation para suministrar agua caliente y ser usada en el lavado de latas de sopa (envases) llenas o vacías en una de las 20 líneas paralelas de lavado de bidones en la planta de sopas Campell en Sacramento, California. El campo colector está compuesto por una mezcla de colectores planos y depresiones en forma de colectores concentradores parabólicos produciendo agua a 190°F (88°C).
- 2) Curación de concreto.- En este proyecto, el agua caliente de un sistema solar será utilizada para curar los bloques de concreto. El sistema colector consiste en una barra de colectores fijos montada sobre un banco de reflectores de paleta (o aleta)

movibles que enfocan el foco de radiación sobre la barra de colectores. Está diseñado para dar un efecto de concentración de 24 a 1, operando al 50% de eficiencia y produce agua arriba de 140°F (60°C).

3) Procesamiento Textil.- En este proyecto, una mezcla de agua y Glycol Etileno será calentada a 250°F (121°C) usando colectores de alto rendimiento. Este fluido caliente será transferido a un flujo secundario de agua abasteciendo a un tanque de teñido.

4) Lavandería.- En este proyecto, agua caliente y vapor son generados por un sistema solar para ser usados en el lavado de ropa. Los colectores usan concentradores de espejo con un mecanismo de rastreo individual dirigido a un tubo receptor estacionario. Se propone generar agua a 200°F (93°C) con una eficiencia de más del 60%.

5) Minas de Uranio.- En un proyecto demostrativo ahora en realización en Nuevo México, un estanque solar poco profundo construido en el suelo ha sido cubierto y usado para la generación de agua caliente. El agua, calentada a 114°F (46°C) es bombeada a una mina de uranio cercana.

- Proyectos con el Uso de Aire Caliente.

Se ha fundado recientemente seis proyectos de diseño el uso de aire caliente basado en sistemas solares para satisf

cer las necesidades primarias de procesamiento industrial en el secado y/o deshidratación. Los proyectos incluyen:

- 1) Secado de Madera.- En este proyecto, la generación solar de aire caliente será usada en el secado de madera dura, en un horno convencional de aserradero. Un colector plano será usado para producir aire seco de 110 a 180^oF (48 a 82^oC).
- 2) Secado de Comida.- En este proyecto, un grupo de colectores planos serán probados de diferentes maneras (uso directo, -- acumulación para secado, con un aumentador de presión auxiliar) para secar una variedad de comestibles.
- 3) Secado de Frijoles de Soya.- Un secador de grano convencional en Decatu, Alabama, será usado para secar frijoles de soya - usando aire seco principalmente de un colector solar y un sistema de almacenamiento. Un colector de 14,800 pies² (1,375 m²) montado en un ángulo junto a un silo de secado de hormigón (o concreto) podrá secar arriba de 3,600 bushels (127 m³) por día.
- 4) Deshidratación de Cebolla.- Este proyecto demostrará la utilidad del aire calentado por el sol en una cinta transportadora continua deshidratante, que procesa arriba de 6,000 lbs. ---- (2,724 kgs.) por hora, de cebollas usando temperaturas variables en cuatro plataformas de secado en secuencia.
- 5) Textiles.- Un colector parabólico de medio eje de concentra--

ción solar será usado para producir vapor que calentará un -
secador cilíndrico. Así, éste mantendrá el secado al aire li-
bre de textiles en una planta de Alabama.

6) Deshidratación de Alfalfa.- Aire caliente basado en sistemas
solares será usado para precalentar aire para la combustión -
de un deshidratador giratorio con estufa de gas que produce 3
Ton. de alfalfa seca por hora.

- Proyectos con el Uso de Vapor.

Se está en el proceso de desarrollo de un tercer gru-
po de experimentos dirigidos al uso de vapor producido por siste-
mas solares. Es un poco anticipado señalar que la generación de
vapor a bajas presiones encontrará su más grande aplicación en -
sistemas que requieran únicamente de la procedencia de calor a -
bajo nivel.

El procesamiento de alimentos es particularmente un -
área prometedora, como comida preparada y alimentos secos, para
adelantar las capacidades de los sistemas solares.

A continuación se presentan algunos diseños de colec-
tores, los cuales serán estudiados más adelante, y en particular
el colector plano, semejante al que aparece en la Figura No. 3.

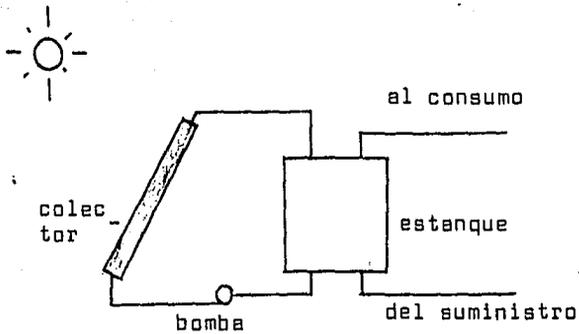


Fig. No. 3. Esquema de un sistema de calentamiento de agua para uso doméstico.

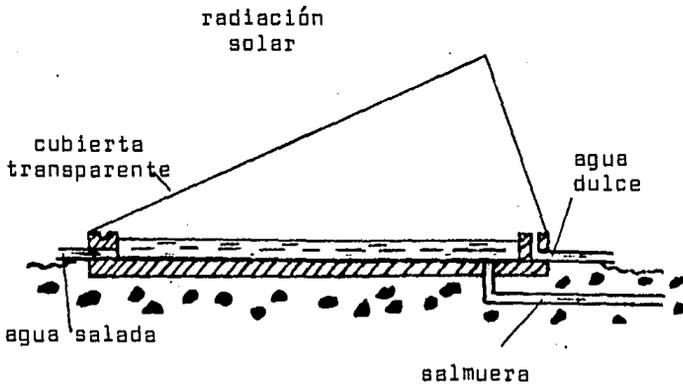


Fig. No. 4. Esquema de un destilador solar. El agua evaporada se condensa en el vidrio y es retirada por el ducto superior.

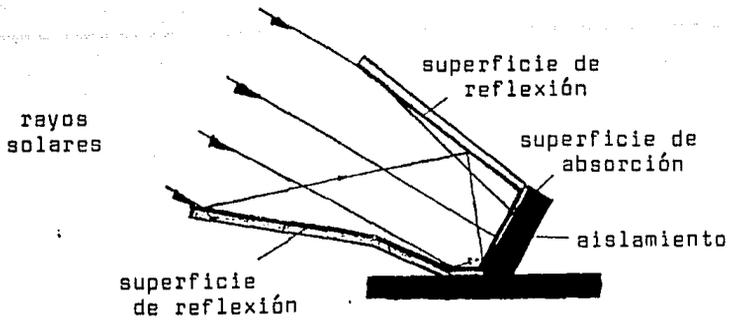


Fig. No. 5. Colector concentrador
piramidal.

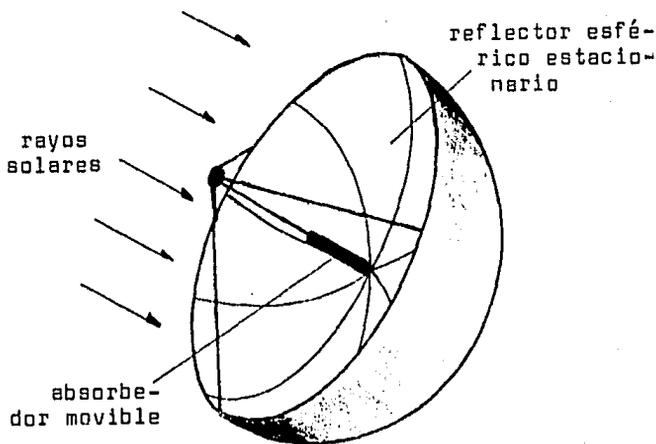


Fig. No. 6. Colector concentrador con reflector es-
tacionario y absorbedor movable.

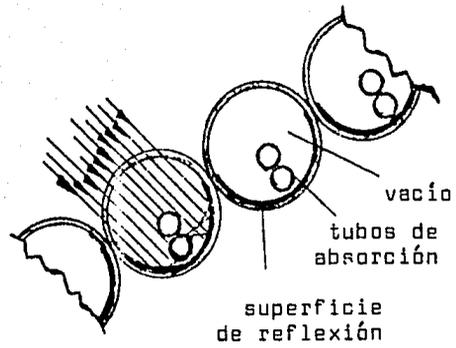


Figura No. 7. Colector concentrador al vacío.

CAPITULO II FUNDAMENTOS DE ASTRONOMIA

II.1. EL SOL. DESCRIPCION

II.2. LA TIERRA. DESCRIPCION

II.3. FUNDAMENTOS GENERALES

- MOVIMIENTOS DE LA TIERRA Y SUS EFECTOS

II.4. DEFINICIONES PARA OBSERVADOR TERRESTRE

II.5. CONSTANTE SOLAR

II.6. HORA SOLAR

II.7. GRAFICAS DE DESPLAZAMIENTO SOLAR

II.1 EL SOL. DESCRIPCION

El sol es una esfera gaseosa formada por helio e hidrógeno con carbono y por otros elementos en pequeñas cantidades. El radio solar es de aproximadamente 149,450,000 km. Su densidad media es de $1,400 \text{ kg/m}^3$ (para la tierra $5,500 \text{ kg/m}^3$) y alcanza los $76,000 \text{ kg/m}^3$ en el centro. La masa representa el 99.85% de la masa total del sistema solar y a su vez 332,000 veces la de la Tierra.

Su estructura se divide en tres regiones: Interior Solar, Fotosfera, Cromósfera y Corona Solar.

- Interior Solar.- En esta región, es donde se engendra la energía por reacciones termonucleares; es inaccesible a las investigaciones, pues toda la radiación emitida en esta región es totalmente absorbida por las capas exteriores. La temperatura es de varios millones de grados, y la presión es de un millón de atmósferas aproximadamente. Su principal componente es el hidrógeno.
- Fotosfera.- Es una capa muy delgada de aproximadamente 300 km. de espesor y es responsable de casi la totalidad de la radiación que recibimos. El orden de magnitud de la temperatura es de varios millones de grados, decreciendo rápidamente al aproximarse al exterior de la capa hasta una temperatura llamada "de superficie" del orden de $4,500^{\circ}\text{K}$ (coeficiente global de in

tercambio de calor -el sol irradia globalmente como un cuerpo negro a $5,800^{\circ}\text{K}$ -). La presión en la fotosfera es de $1/100$ atm.

- Cromósfera y Corona Solar.- La cromósfera es el anillo de luz roja que circunda al sol. La corona es una capa de gases rarificados que se extienden más allá de la cromósfera, cerca de $1,600,000$ km. Son regiones de débil densidad donde la materia está muy diluida, hecho que explica que aunque la temperatura en esta zona sea muy elevada, la radiación emitida sea muy débil. La materia está muy agitada, con formación de chorros en el seno de la cromósfera (espículas) o de grandes surtidores en la corona (protuberancias). La fotosfera no es perfectamente estable u homogénea, pues durante los períodos de actividad, se observan regiones más frías (manchas) y regiones más calientes (fácúlas) y, en buenas condiciones de observación, se comprueba que la superficie es granulosa. Estos gránulos tienen un diámetro de 400 a 500 km. y una duración de algunos minutos.

II.2. LA TIERRA. DESCRIPCION

Es aproximadamente esférica con un diámetro de cerca de $12,711.1$ km. La rotación alrededor de su eje la realiza en 23 horas 56 minutos 53 segundos aproximadamente, y una revolución -alrededor del sol en 365 días 5 horas 48 minutos y 46 segundos.

Se cree que la Tierra tiene un núcleo central con un diámetro aproximado de $1,600$ millas. En seguida se encuentra el

manto, el cual constituye cerca del 70% de la masa terrestre; - después se encuentra la corteza terrestre.

Otros datos terrestres son:

Edad 4,500 millones de años

Superficie total..... 509,950,715 km²

Superficie de Tierras..... 148,822,000 km²

Superficie de mares..... 361,128,715 km²

Longitud del Ecuador..... 40,070 km.

Velocidad de la Tierra alrededor

del Sol..... 107,160 km/hr.

Distancia media entre el Sol y

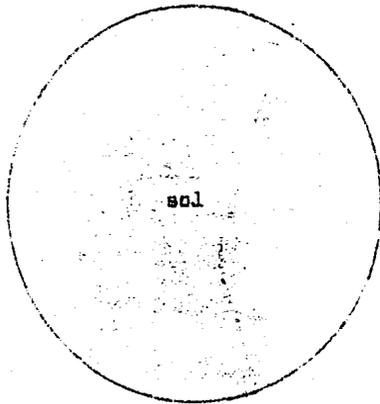
la Tierra..... 149,500,000 km.

Distancia entre perigeo y apogeo..... 1/30 de la distancia media.

Diámetro Angular.-Un observador terrestre colocado sobre un círculo, y en el cual el sol ocupase el centro, vería a éste bajo un ángulo que varía de 31' 31" a 32' 33".

El eje de rotación de la Tierra está inclinado 23^o27' con respecto a su órbita alrededor del Sol. Esta inclinación, la rotación diaria y la revolución anual, determinan la distribución de la radiación solar sobre la superficie terrestre, la longitud

34



149,450,000 km



Figura No. 8. Distancia entre el Sol y la Tierra
y Diámetro Angular

variable del día y la noche, así como el cambio de estaciones, como se verá a continuación. (Figura No. 8).

II.3. FUNDAMENTOS GENERALES

- Movimientos de la Tierra y sus Efectos

La eclíptica es el plano que genera el centro de la Tierra en su recorrido alrededor del Sol. La inclinación del eje terrestre con respecto a la perpendicular de la eclíptica ----- ($23^{\circ}27'$) se supone que será la misma dentro de 14,000 años, pero hacia el lado izquierdo; así que además tiene un movimiento de precesión. (Figura No. 9).

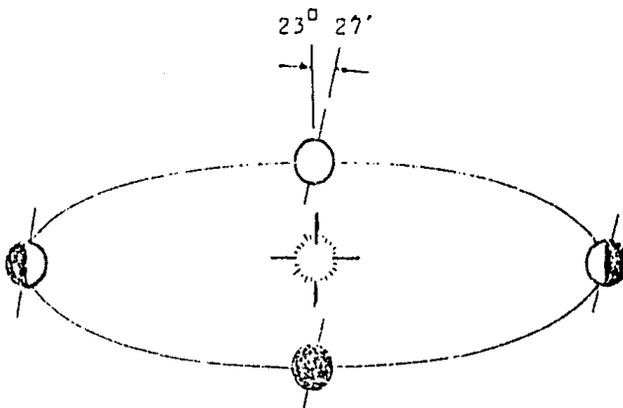


Figura No. 9. Movimiento de la Tierra alrededor del Sol en el período de un año e inclinación - del eje respecto a la eclíptica.

En la Figura No. 10, se puede observar que el 21 de Junio es el día más corto que la noche y de invierno en el hemisferio sur (solsticio de invierno), y el día más largo con la noche más corta y de verano en el hemisferio norte (solsticio de verano). El 21 de Diciembre será el solsticio de verano en el hemisferio sur y el solsticio de invierno en el hemisferio norte.

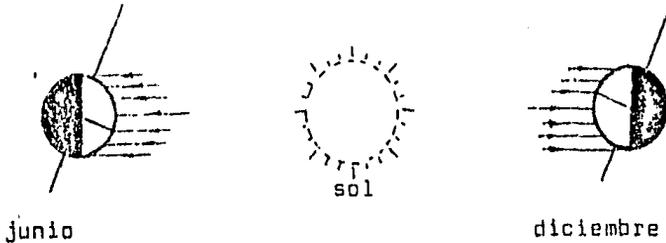


Figura No. 10. Rayos solares sobre la tierra en Junio y Diciembre,

En la Figura No. 11, podemos ver como los rayos solares llegan en forma perpendicular al eje de la Tierra, por lo que el día y la noche son de igual duración en los dos hemisferios, el 21 de Marzo y el de Septiembre. El primero es designado como el equinoccio de primavera para el hemisferio norte y el equinoccio de invierno para el hemisferio sur; y viceversa el 21 de Septiembre.

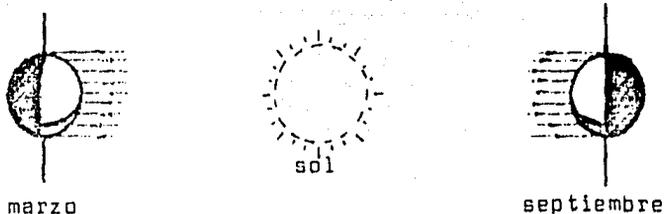


Figura No. 11. Rayos solares sobre la Tierra en Marzo y Septiembre.

La Tierra está dividida en paralelos de latitud. En el hemisferio norte se considera la latitud positiva, variando de 0° a $+90^{\circ}$. El paralelo 0° es el ecuador terrestre. En el hemisferio sur, se considera de latitud negativa, entre 0° y -90° . El símbolo de latitud es "°" (Figura No. 12).

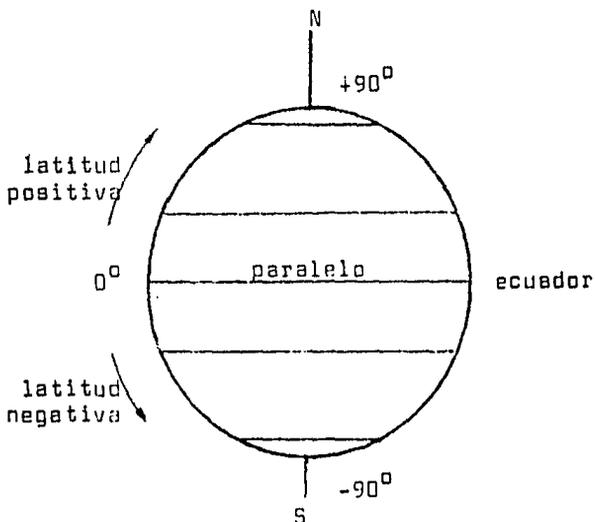


Figura No. 12. Paralelos de latitud terrestre.

También se acostumbra dividir la Tierra en meridianos. El meridiano de 0° es el que pasa por Greenwich, Inglaterra; hacia el oeste, los meridianos aumentan de 0° a 180° , al igual que hacia el este, por lo que hay que especificar si son este u oeste (Figura No. 13). Existen 24 meridianos separados entre sí 15° .

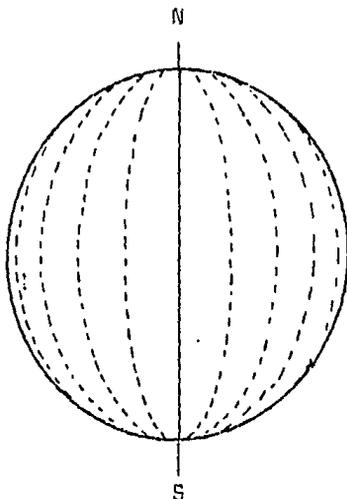


Figura No. 13. Meridianos terrestres.

Proyectando el ecuador y los polos a un diámetro infinito, se tiene una esfera imaginaria, con ecuador y polos celestes (Figura No. 14). También esta esfera se puede medir en paralelos de declinación (Figura No. 15), manteniéndose las latitudes positivas y negativas.

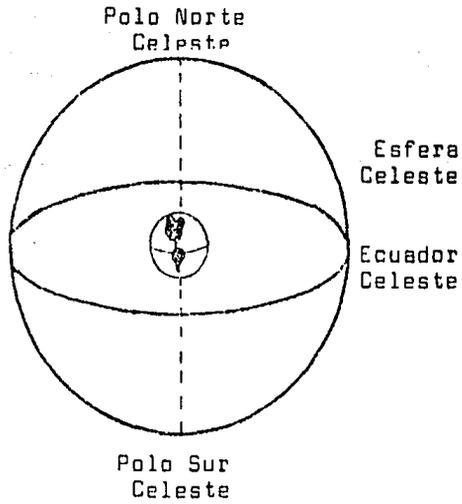


Figura No. 14. Esfera Celeste

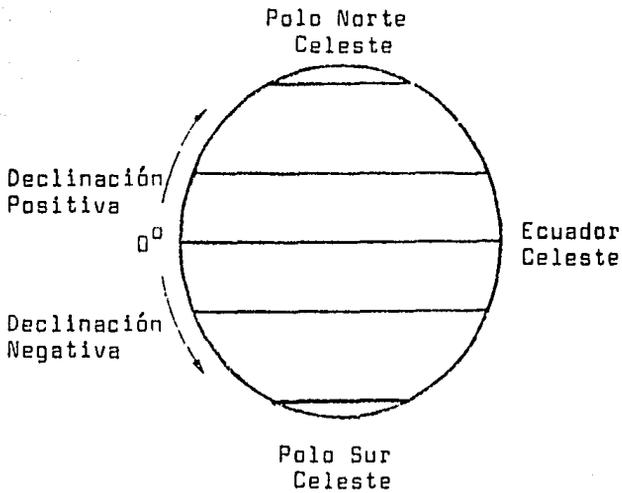


Figura No. 15. Paralelos de Declinación

Observando la Figura No. 16, podemos deducir que el 21 de Junio la declinación del Sol al mediodía solar será $+ 23^{\circ} 27'$, el 21 de Diciembre será de $- 23^{\circ} 27'$, y el 21 de Marzo, así

como el 21 de Septiembre será de 0° .

En la Figura No. 17 se observa la declinación a través de todo el año. Esta declinación está designada como " δ ".

$$(\delta) \int = 23.45 \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \text{ ----- (2.3.1)}$$

donde:

(δ) \int = declinación en grados

n = número secuencial del día del año

Cuando n = 81

$$\frac{284 + n}{365} = 1 \quad \int = 0^\circ \quad (21 \text{ de Marzo})$$

Cuando n = 263.5

$$\frac{284 + n}{365} = 1.5 \quad \int = 0^\circ \quad (21 \text{ de Septiembre})$$

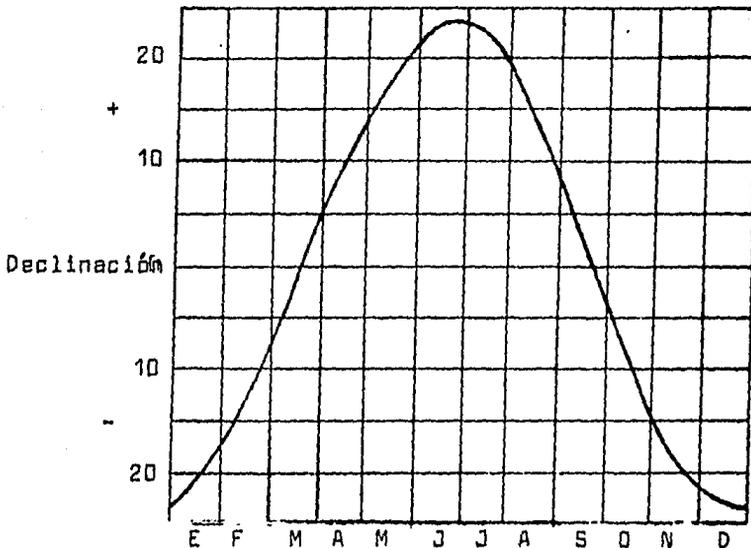


Figura No. 17. Declinación al medio día solar según el periodo del año.

II.4 DEFINICIONES PARA OBSERVADOR TERRESTRE

El ángulo que forma el rayo solar con el plano horizontal, y medido en un plano perpendicular a este último, se le llama Altitud (α).

La línea perpendicular al plano horizontal en el punto del observador, se designa como "línea Zenit". El ángulo formado por el rayo solar y la línea Zenit se le llama ángulo Zenit (Z) (Figura No. 18).

Por lo tanto:

$$\alpha + Z = 90^{\circ} \text{ ----- (2.4.1)}$$

El ángulo formado por la proyección en el plano horizontal del rayo solar y la línea Norte-Sur se le designa como -- "Azimut" (Az).

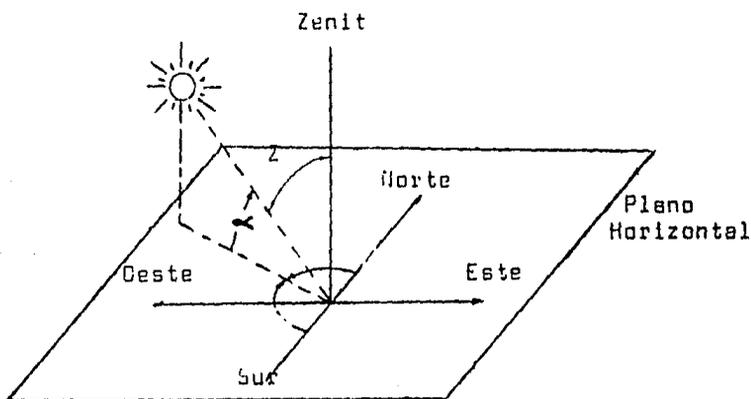


Figura No. 18. Altitud α y Azimut Az del Sol. También se anota el ángulo Zenit Z .

En la Figura No. 19 se representa el recorrido del Sol para un observador en el punto 'O' y tomando como referencia la esfera celeste.

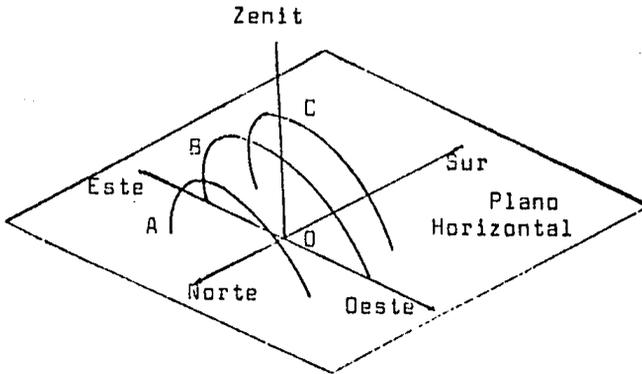


Figura No. 19. Recorrido del Sol para observador terrestre en -- punto O y hemisferio sur tocando como referencia la esfera celeste. Recorrido A, B, C para solsticio de Invierno, equinoccios y -- y solsticio de Verano, respectivamente.

Posteriormente se toman como referencia los planos vertical y horizontal (Figura No. 20).

Podemos deducir que el Sol se desplaza alcanzando mayor altitud al mediodía y el Azimut recorrido es superior a 180° en el solsticio de Verano. El Sol alcanza menor altitud a mediodía y el Azimut recorrido es menor a 180° en el solsticio de Invierno; despreciando la variación de la declinación durante un día, el Sol se desplazará a través de un plano recto en los equi

noccios con un Azimut recorrido igual a 180° .

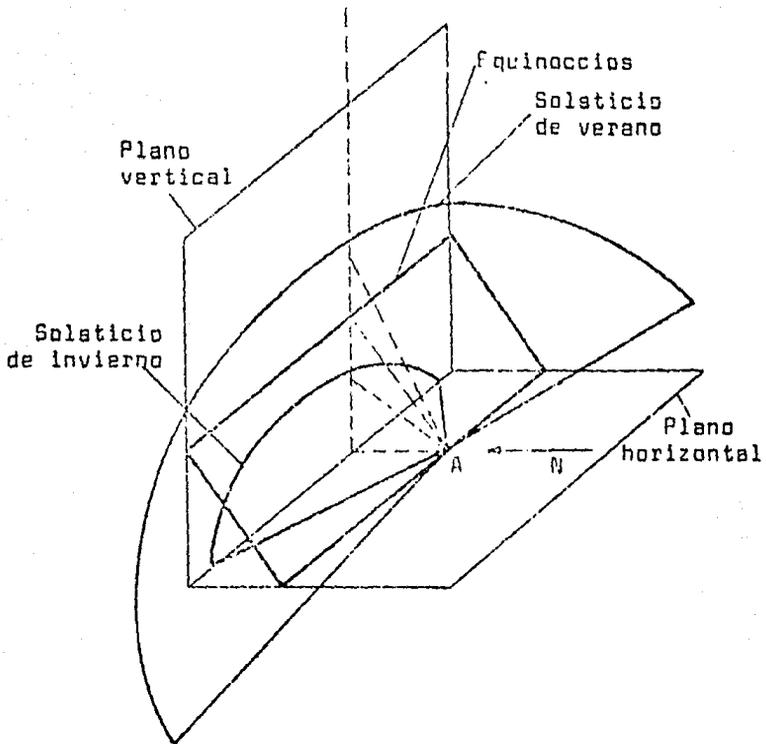


Figura No. 20. Recorrido del Sol para observador terrestre en punto A y en hemisferio sur, tomando como referencia los planos vertical y horizontal.

Por lo tanto, α , Az dependen de la hora del día, de la latitud (ubicación geográfica) y de la declinación (período del año). Para obtener α y Az, se puede hacer mediante las siguientes expresiones:

$$\sin \alpha = \sin \vartheta \sin \delta + \cos \vartheta \cos \delta \cos H \text{ ----- (2.4.2)}$$

$$\sin Az = \cos \delta \sin H / \cos \alpha \text{ ----- (2.4.3.)}$$

donde:

$$\alpha = \text{altitud (}^\circ\text{)}$$

$$\delta = \text{latitud (}^\circ\text{)} + \text{Norte Celeste}$$

$$\text{-----}$$

$$\text{-----} - \text{Sur Celeste}$$

$$H = \text{ángulo de hora solar (}^\circ\text{)}$$

$$Az = \text{azimut (}^\circ\text{), medido este u oeste}$$

para H: $90^\circ = 6 \text{ hrs.}$

$$15^\circ = 1 \text{ hr.}$$

II.5. CONSTANTE SOLAR

Al tratar al Sol como un cuerpo negro, con características bien definidas, podemos calcular la constante solar (energía por unidad de tiempo) que pasa a través de una superficie -- (unidad en ángulos rectos en la dirección del haz solar).

La ley de Stefan dice que la unidad de radiación emitida por unidad de superficie es " σT^4 ". De esta manera la energía emitida por el Sol es:

$$4 \sigma R_s T_s \text{ ----- (2.5.1)}$$

Para cuando esta radiación ha viajado una distancia - 'R' hacia fuera del Sol, ya se ha extendido sobre un área de --- '4R²', de manera que la energía transmitida por unidad de área - está dada por:

$$S_a = \frac{\sigma R_s^2 T_s^4}{R^2} \text{ ----- (2.5.2)}$$

$$S = 4 \sigma R_s^2 T_s^4 \text{ ----- (2.5.3)}$$

$$S_a = S/A \text{ ----- (2.5.4)}$$

$$A = 4 \pi R^2 \text{ ----- (2.5.5)}$$

Sustituyendo:

$$S_a = \frac{4 \pi \sigma R_s^2 T_s^4}{4 R^2}$$

$$S_a = \frac{\sigma R_s^2 T_s^4}{R^2} \text{ ----- (2.5.6 = 2.5.2)}$$

Sustituyendo valores:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$$

$$R_s = 7 \times 10^5 \text{ km} = 7 \times 10^8 \text{ m}$$

$$R = 1.5 \times 10^8 \text{ km} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$$

$$T_s = 6,000^\circ \text{K}$$

donde:

S_a = Potencia emisiva total por unidad de superficie

σ = Constante de Stefan-Boltzman

R_s = Radio del Sol

R_+ = Distancia del Centro del Sol a la superficie de la Tierra

T_s = Temperatura del Sol

por lo que:

$$S_a = 5.6 \times 10^8 \frac{(7 \times 10^8)^2 (6,000)^4}{1.5 \times 10^{11}} \frac{\text{Watts}}{\text{m}^2}$$

$$S_a = 1,600.03 \text{ Watts/m}^2$$

la energía total emitida por el Sol estará dada por:

$$E_c = S \times 4 \pi R^2 \text{ ----- (2.5.7)}$$

$$E_c = 4.5239 \times 10^{20} \text{ Watts}$$

de ésta, la Tierra puede captar poco menos de $1.8 \times 10^{14} \text{ W}$.

Una buena parte de la energía emitida por el Sol se localiza en la región ultravioleta del espectro, la cual es muy dañina para los sistemas vivientes. Pero nuestra atmósfera se encuentra cubierta con una capa de Ozono (O_3), que actúa como un filtro estratosférico para este tipo de rayos. Es por ello que la Tierra capta índices muy bajos del total de la radiación solar. Aún así, la radiación solar absorbida por la Tierra es 20,000 veces mayor al consumo mundial de energía en la actualidad.

La intensidad solar disponible, y la respuesta espectral, dependen de las condiciones atmosféricas y de la masa de aire atravesada por la radiación; bajo condiciones atmosféricas favorables, la intensidad máxima observada a medio día en una superficie orientada y a nivel del mar es de aproximadamente ----- 1 kW/m^2 y en zonas montañosas aumenta hasta 1.1 kW/m^2 .

II.6. HORA SOLAR

En las fórmulas 2.4.2 y 2.4.3 , se uso "H" como ángulo de hora solar; esto es, el azimut del rayo solar, pero medido desde el norte. Es necesario aclarar que la hora solar no tiene que coincidir con la hora convencional de una región por las siguientes razones:

- En muchos países existe el cambio de hora para obtener un mejor aprovechamiento de la luz solar, y por lo tanto de un ahorro de energía.
- El meridiano del lugar no corresponde exactamente al que se tomó como referencia para fijar la hora convencional.
- Es de considerarse que aunque la tierra gira sobre su eje una vuelta en aproximadamente 24 horas, nosotros tomamos cada vuelta en exactamente 24 horas; así también, la Tierra sufre varias perturbaciones en su recorrido alrededor del Sol (se podría decir que la Tierra está aproximadamente en el mismo lugar, con los mismos ángulos, cada 12 años).

Para encontrar la hora solar, utilizaremos la siguiente fórmula:

$$\text{Hora Solar} = \text{Hora Local} = 1 (X) \pm E + 4 (M_{\text{con}} - M_{\text{loc}})$$

(hr.) (hr.) (min.) (°) (2.6.1)

donde:

X = 1 si hay cambio de hora en verano

$X = 0$ en invierno, o si no hay cambio de hora en verano

$E = E_c$ del tiempo en minutos (Figura No. 21).

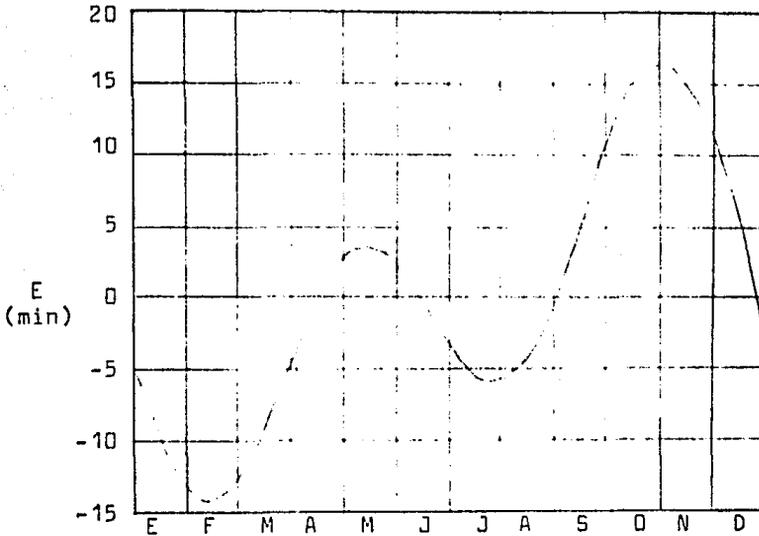


Figura No. 21. Ecuación del tiempo

M_{con} = meridiano convencional, en grados, al oeste de Greenwich

M_{loc} = Meridiano local, en grados, medido al oeste de Greenwich

II.7. GRAFICAS DE DESPLAZAMIENTO SOLAR

Para diferentes períodos del año (diferentes declinaciones) y distintas horas del día, como también para diferentes

latitudes, es posible determinar la Altitud y Azimut del Sol, co-
mo también la hora de salida y puesta del sol, usando las fórmu-
las 2.4.2 y 2.4.3 y las Figuras Núms. 22 y 23 (que se dan como -
ejemplo, ya que no corresponden a la República Mexicana), se pue-
de conocer en forma gráfica la latitud y el Azimut.

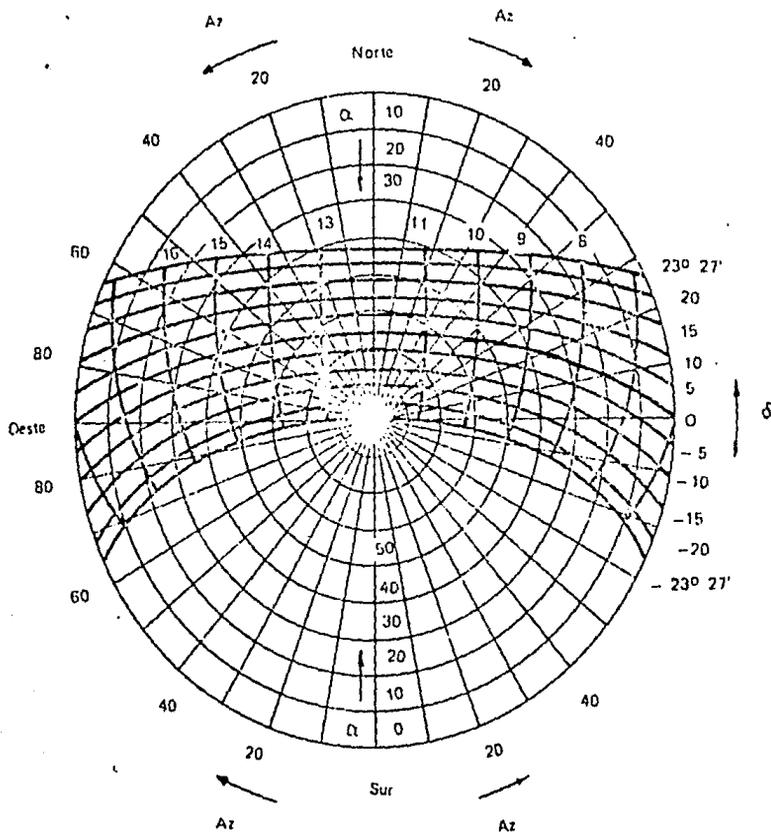


Figura No. 22. Gráfico de desplazamiento solar para $\delta = 25^\circ$

Es necesario ubicar el punto en el gráfico que corres-
ponda a la fecha y hora según la declinación y hora en cuestión.

Ubicado este punto, se desplaza por el círculo hasta interceptar el eje Norte-Sur del gráfico, cuya lectura nos indica la altitud.

Proyectando el punto original hacia el exterior, se lee el Azimut. En estos gráficos, el Azimut se ha registrado de 0° a 90° , partiendo del eje Norte-Sur hacia el Este u Oeste.

Otra aplicación es la que permite la determinación de "Períodos de Sombra" y "Perfil de Horizonte", presentando, por ejemplo: la planta y elevación de un edificio. Para determinar su período de sombra, se determina la altitud, observando la duración que tendrá el sol, cuando empiece a producirse sombra en la superficie de interés. Este círculo, que corresponde a la altitud, se ubica en el gráfico, y nos indicará que desde 0° de altitud del sol, hasta la altitud señalada, existirá sombra sobre la superficie estudiada.

Después se determinan cuantos grados del Norte hacia el Este y Oeste, el obstáculo producirá sombra sobre la superficie estudiada. Después se determinan cuantos grados del norte hacia el este y oeste, el obstáculo producirá sombra sobre la superficie de interés; para esto, basta con observar la planta.

Estos gráficos se registran en el de desplazamiento solar, según las líneas radiales del gráfico. El área así limitada entre estas tres líneas demarcadas, nos indicará el período

de sombra que afecta la superficie que interesa estudiar.

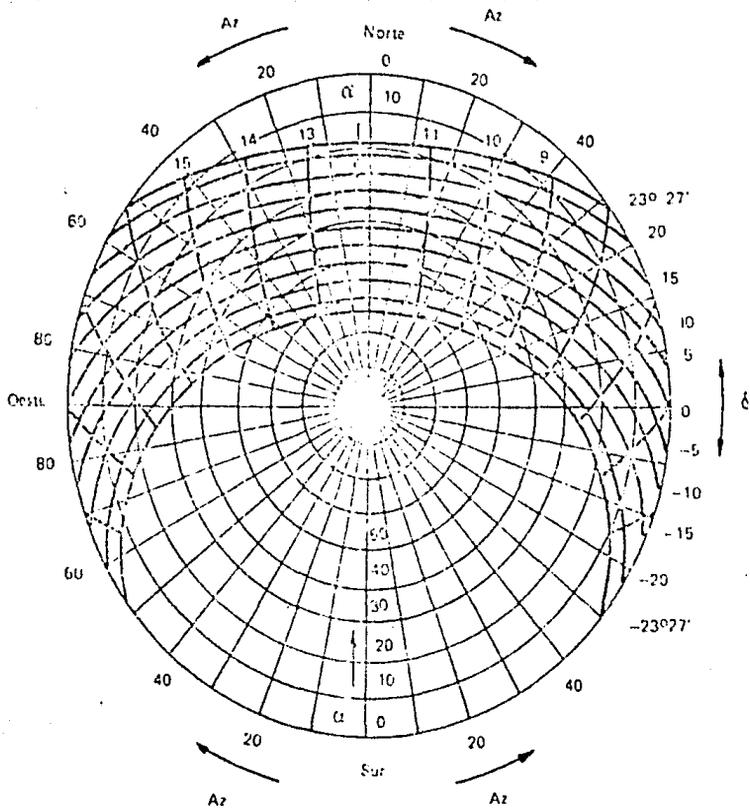


Figura No. 23. Gráfico de desplazamiento solar para $\phi = 50^\circ$

Así se puede determinar si el efecto de sombra es o no importante, y junto a otros puntos que se verán posteriormente en esta investigación, se podrá decidir en propiedad la mejor ubicación de los colectores.

Si se desea determinar el perfil de horizonte alrede--

dor de una instalación eventual, se ubican aproximadamente cada 30° de Azimut, según la exactitud que se requiera, la altitud de cada obstáculo (cerros, edificios) que se observen alrededor del lugar. De la unión de cada uno de estos puntos ubicados en el gráfico de desplazamiento solar, nace el perfil de horizonte que nos indica, que desde esa línea hasta los 0° , habrá obstáculos - que se interponen con el horizonte.

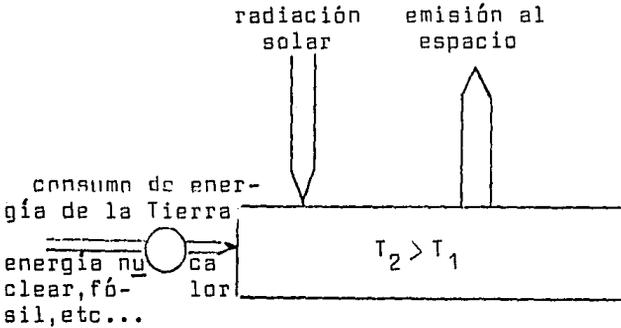
Por medio de la construcción de este gráfico y del estudio posterior de ciertos puntos, se podrá determinar con certeza si la ubicación para una instalación de colectores es apropiada o no.

CAPITULO III RADIACION SOLAR

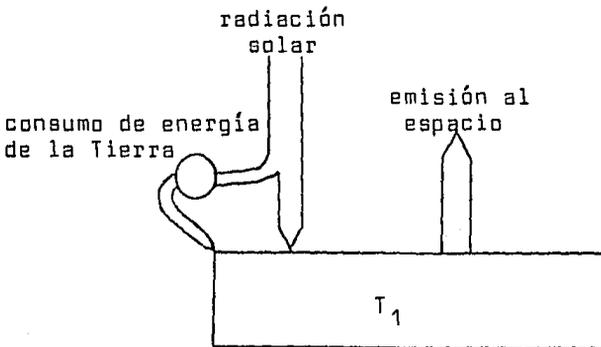
- III.1. EQUILIBRIO TERMICO DE LA TIERRA
- III.2. RADIACION
 - RADIACION DIRECTA, DIFUSA Y GLOBAL
 - PROPIEDADES DE LA RADIACION
- III.3. DISTRIBUCION MUNDIAL DE LA ENERGIA SOLAR
- III.4. MAPAS DE INSOLACION
- III.5. RELACIONES GEDMETRICAS ENTRE PLANO Y RAYO SOLAR
 - HORA DE SALIDA DEL SOL Y DURACION DEL DIA
- III.6 INSTRUMENTOS DE MEDICION
 - PIRHELIOMETRO
 - PIRANOMETRO
 - HELIOGRAFO

III.1. EQUILIBRIO TERMICO DE LA TIERRA

Al utilizar energía directa del sol para satisfacer nuestras necesidades, el equilibrio de la Tierra no se altera. Una perturbación del equilibrio térmico de la Tierra ocurre cuando fuentes diferentes a la energía solar son utilizadas para necesidades energéticas. En la Figura No. 24, veremos como el uso de la radioactividad solar, no adiciona energía al sistema.



(El calor entra y perturba el balanceo térmico natural : T_2 aumenta)



(Equilibrio térmico natural de la Tierra: la temperatura ' T_1 ' se conserva constante)

Figura No. 24. Balanceo Térmico de la Tierra

Podemos observar como los colectores solares reciben -

cierta cantidad de radiación, la concentran y la convierten en energía útil, mientras que otra parte la regresa a la atmósfera. De la energía aprovechada, después del proceso se vuelve a convertir en energía calorífica, con lo que el ciclo no se rompe ni se altera.

Al utilizar otro tipo de combustible fósil o energía nuclear, aparece un incremento neto de calor. Podemos ver como se altera el equilibrio térmico en los bosques cuando extensas zonas de ellos se eliminan para construir carreteras, ciudades, terrenos agrícolas, etc.; una carretera refleja el 35% de luz, aunado a la fricción de las llantas de los vehículos, el calor que despiden los mismos vehículos, en comparación con el bosque, que llega a reflejar del 3 al 10% de energía calorífica.

III.2. RADIACION

La radiación térmica, la conducción y la convección son las formas en las que se puede llevar a cabo la transferencia de calor. En este trabajo, nos referiremos únicamente a la radiación térmica, que es la transmisión de energía por medio de ondas electromagnéticas o fotones.

Existe una gran variedad de tipos de radiación electromagnética, y la radiación térmica es solo una de ellas. En general, la radiación se propaga a la velocidad de la luz ----- (3×10^8 m/seg.), que es igual al producto:

$$c = \lambda f \quad \text{-----} \quad (3.2.1)$$

donde:

c = velocidad de la luz

λ = longitud de onda

f = frecuencia

λ se puede medir en cm., angströms

($1\text{\AA} = 10^{-8}$ cm.) o micrones ($1\mu = 10^{-6}$ m)

Como se observa en la Figura No. 25, dentro del espectro electromagnético, la radiación térmica se encuentra alrededor de 0.1 a 100 μ , mientras que el rango visible es de 0.35 a 0.75 μ .

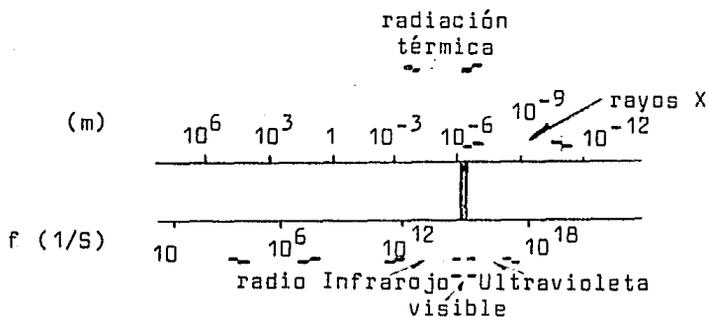


Figura No. 25, Espectro Electromagnético

A cada longitud de onda le corresponde una frecuencia determinada; así diferentes cantidades de energía se transmiten

a diferentes longitudes de onda (λ -Figura No. 26).

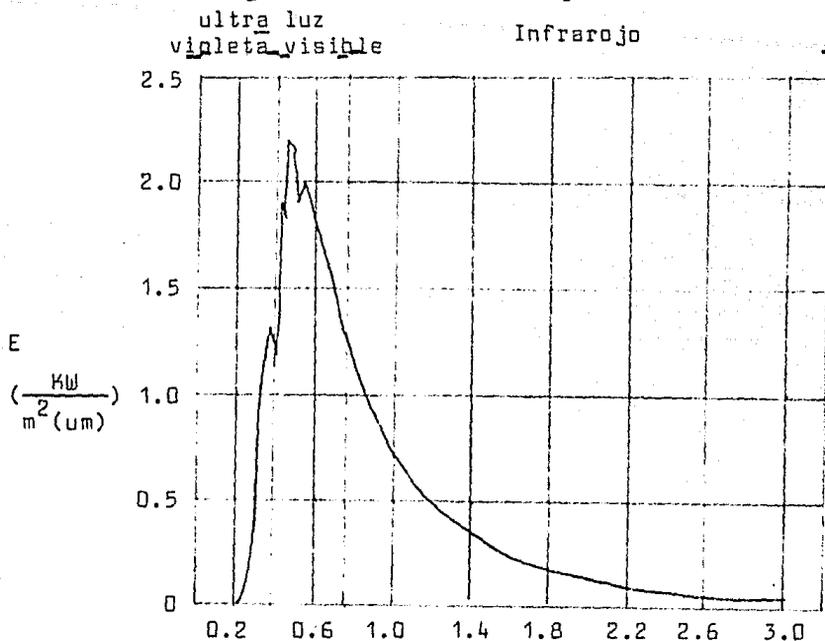


Figura No. 26, Energía espectral de emisión de la radiación solar medida fuera de la atmósfera terrestre.

La energía espectral de emisión (E_{λ}) es la energía emitida en esa longitud de onda (λ). La energía espectral de emisión en la banda $\Delta\lambda$ es la energía emitida en ese rango de banda $\Delta\lambda$ y está designado como $E_{\Delta\lambda}$.

Como la energía radiante que un cuerpo emite depende de la temperatura y la longitud de onda, anotamos en la Tabla 1, en la 1a. columna el producto de longitud de onda por la temperatura ($\lambda \cdot T$) y en la 2a. columna la energía emitida desde la longitud de onda = 0 hasta la longitud de onda que nos inte-

resa ($\lambda = 0$ a λ), dividida entre la energía emitida en todo el espectro $\lambda = 0$ a $\lambda = \infty$.

$$\frac{\int_0^{\lambda} E_{\Delta\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\Delta\lambda} d\lambda} \quad (3.2.2)$$

La propagación de la radiación térmica se lleva a ca bo en la forma de cuantos discretos, en donde cada cuanto tiene una energía de:

$$E = hv \quad (3.2.3)$$

donde:

$$h = 6.625 \times 10^{-27} \text{ erg-seg}$$

(constante de Planck)

v = velocidad

TABLA 1

Fracción de energía emitida entre $\lambda=0$ y λ de interés para diferentes $\lambda:T$

$\frac{\lambda}{T}$ (μm) . ($^{\circ}K$)	$\frac{\int_0^{\lambda} E_{\Delta\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\Delta\lambda} d\lambda}$
1000	0.0003
2000	0.006
3000	0.273
4000	0.409
5000	0.633
6000	0.737
7000	0.808
8000	0.854
9000	0.889
10000	0.914
11000	0.928
12000	0.941
13000	0.952
14000	0.961
15000	0.969
16000	0.976

- Radiación Directa, Difusa y Global

Existen tres tipos de radiación: la directa, la difusa y la global. La radiación directa es la que, después de atravesar una capa de la atmósfera terrestre de aproximadamente 9 - km., no sufre desviaciones hasta tocar el suelo. La radiación difusa, por el contrario, llega al suelo después de cambiar de dirección por reflexión o dispersión. La radiación global es la - suma de las dos anteriores. Hay que señalar que aún en días totalmente despejados existe algo de radiación difusa.

Así también, existen ciertos fenómenos que afectan esta radiación. Los principales son:

- Al nivel del suelo, se refleja cierta radiación, la que a su vez también se difunde.
- El suelo y la atmósfera cuando se calientan, emiten su propia radiación.

Existen también ciertos factores que influyen en la variación de la radiación: la duración de la insolación, la atmósfera de la masa atravesada, la inclinación de los rayos solares, la nubosidad; estos factores dependen de la estación del - año, hora del día, latitud, altitud y estado del cielo.

Estos no son valores constantes, por lo que nos basamos en valores promedio a partir de datos de años anteriores.

- Propiedades de la Radiación

La energía radiante que incide sobre la superficie de un cuerpo, puede ser absorbida, reflejada o transmitida (Figura No. 27). De ahí que la facilidad de un cuerpo para emitir la radiación es el coeficiente de emisión "E".

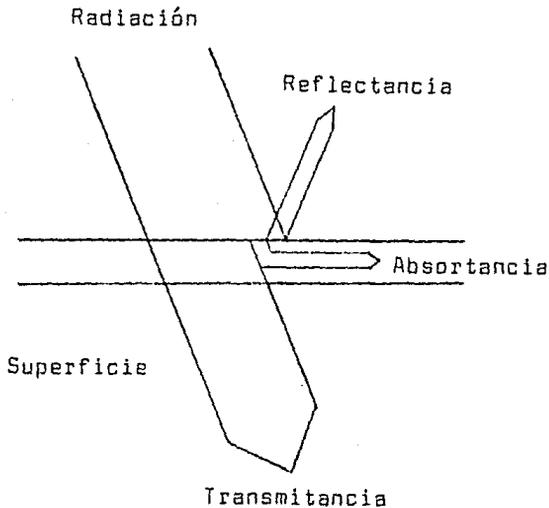


Figura No. 27 Transmitancia, reflectancia y absortancia.

El comportamiento del cuerpo puede caracterizarse por tres tipos diferentes de coeficientes:

- El primero es un coeficiente de reflexión que va a ser igual a la energía reflejada entre la energía incidida. La razón de estas cantidades es "R".

$$R = \frac{E_r}{E_i} \text{ ----- (ec 3.2.2.1)}$$

- El segundo, llamado coeficiente de absorción, es la razón de la energía absorbida entre la energía incidente "A".

$$A = \frac{E_a}{E_i} \text{ ----- (ec 3.2.2.2)}$$

- El tercero, es un coeficiente de transmisión, igual a la energía transmitida entre la energía incidente "T".

$$T = \frac{E_t}{E_i} \text{ ----- (ec 3.2.2.3)}$$

Podemos observar que:

$$R + A + T = 1 \text{ ----- (ec 3.2.2.4)}$$

Los que nos indica que la sumatoria de las radiaciones (absorbida, reflejada y transmitida) son iguales a la radiación incidente:

$$E_a + E_r + E_t = E_i$$

Para cada uno de los tres términos tenemos:

R = 1 Cuando toda la radiación que incide en el cuerpo se refleja (espejo perfecto)

$$E_r = E_i$$

T = 1 Cuando toda la radiación que incide en el cuerpo se transmite (cuerpo perfectamente transparente)

$$E_t = E_i$$

A = 1 Cuando toda la radiación que incide en el cuerpo es absorbida ('cuerpo negro')

$$E_a = E_i$$

En la realidad ninguno de los tres casos se da, ya que siempre existe una combinación, aunque sea mínima de los tres. Esto se puede complicar dependiendo del cuerpo, pero se toman como valores constantes los coeficientes dentro de los rangos de uso común.

Una excepción es el vidrio. Sus características, de ser transparente en gran medida a la radiación solar y opaco a la radiación en infrarrojo, o a la radiación de una fuente de baja temperatura, es lo que permite el funcionamiento de los colectores solares, como se estudiará posteriormente en más detalle. (Figura No. 28).

Con respecto a la absorción, el color no es un indicador absoluto como se cree: es decir, una superficie negra puede tener una absorción menor que una superficie de un color más claro. Entendiendo así, que en la absorción, transmisión y reflectancia de una superficie, influyen su tipo de material, temperatura y longitud de onda de emisión. (Figura No. 29),

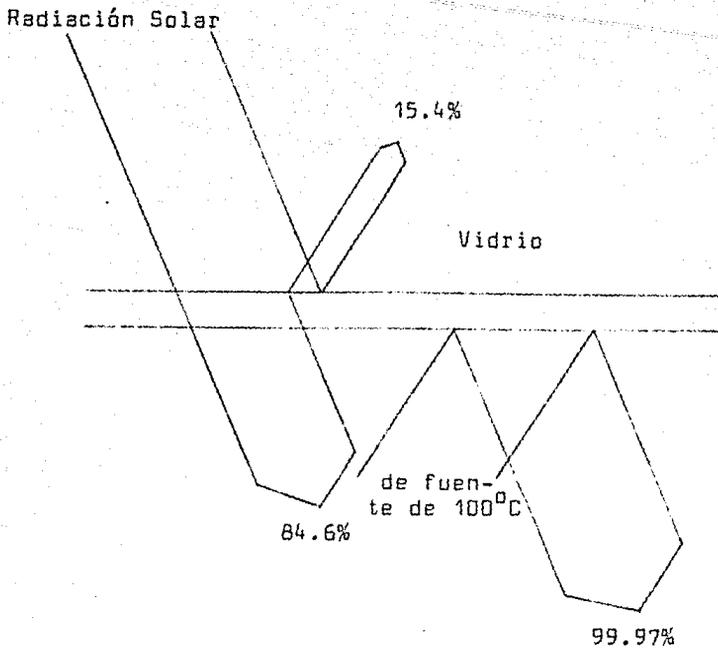


Figura No. 28. Paso de la energía radiante a través de un vidrio según la fuente de emisión.

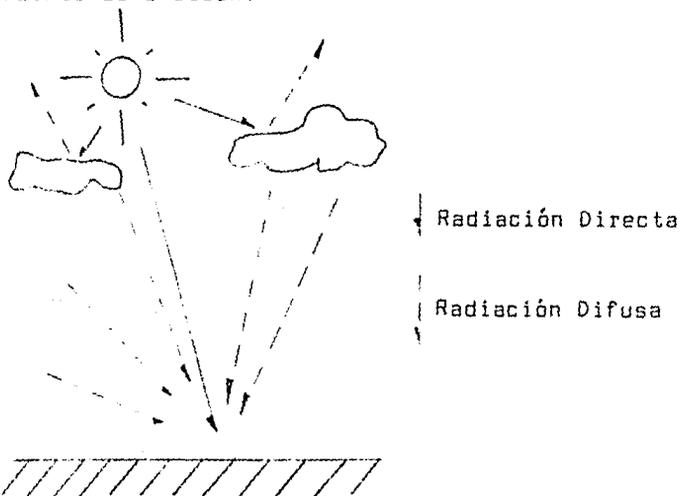


Figura No. 29. Radiación solar directa y difusa.

La radiación solar medida en una superficie perpendicular a los rayos solares, fuera de la atmósfera terrestre y a distancia media al sol se le denomina constante solar y se le designa como "I".

En la Figura No. 30, se representa la variación de "I" durante el año, por la órbita elíptica que describe la Tierra.

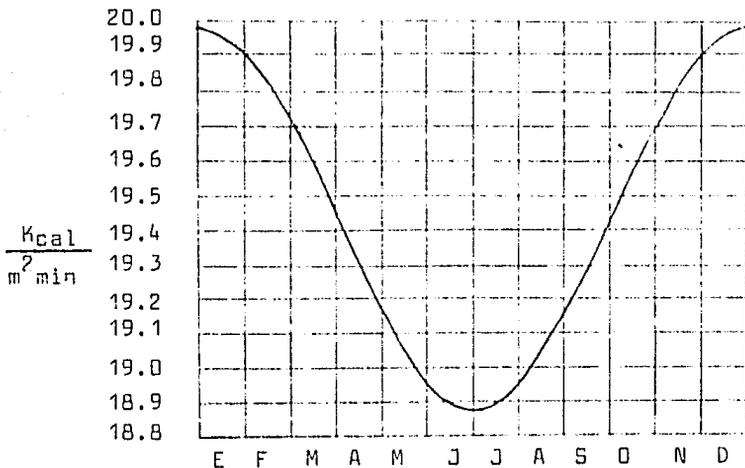


Figura No. 30. Variación de la constante solar I, según el período del año.

La radiación que incide en la superficie terrestre -- siempre será menor que la constante solar y depende de la longitud de onda, ubicación geográfica, orientación, período del año y hora del día (Figura No. 31).

La dispersión por las moléculas de vapor de agua, par

tículas en suspensión en la atmósfera, absorción por el oxígeno, agua y anhídrido carbónico también juegan un papel importante en este fenómeno.

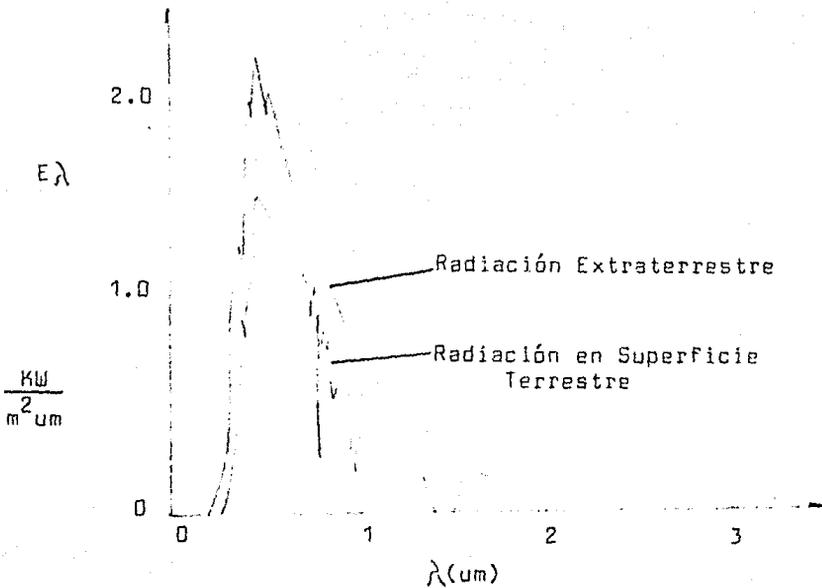


Figura No. 31. Energía radiante fuera de la atmósfera y en superficie terrestre.

Cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, la reflexión es "especular" y, cuando el haz incidente se distribuye uniformemente en todas direcciones después de la reflexión, ésta se llama "difusa" (Figuras Núms. 32 A y B). Los espejos planos son bastante especulares y las superficies rugosas son difusas, pero ninguna es completamente difusa o especular.

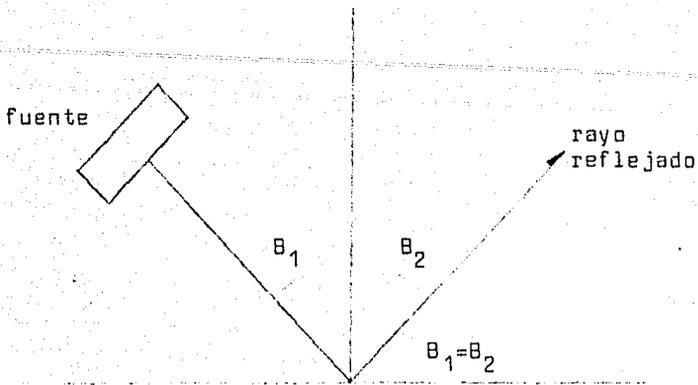


Figura No. 32 A. Reflexión especular

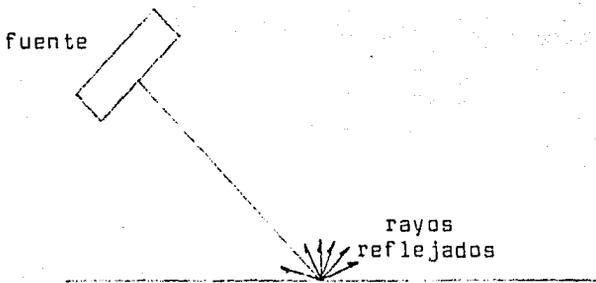


Figura No. 32 B. Reflexión difusa

III.3 DISTRIBUCION MUNDIAL DE LA ENERGIA SOLAR

La radiación solar varía mucho de acuerdo a la duración del día, el ángulo formado por la Tierra y los rayos del Sol, con la longitud y tipo de camino recorrido por los mismos a lo --

largo de la atmósfera, y primordialmente por el estado climatológico. La radiación varía con la localización geográfica, altitud y el clima. Las siguientes Figuras Núms. 33 A y B, muestran la radiación total media (en Cal/cm^2) para los meses de Junio y Diciembre.

Podemos observar que las mayores cantidades de energía solar se encuentran entre dos anchas bandas que rodean la Tierra entre 15° y 30° de latitud Norte y Sur. En estas regiones hay una radiación que fluctúa entre 500 y 750 Cal/cm^2 en Verano.

La pluviosidad es menor de 25 mm. al año. En algunos países, más de dos tercios de su superficie es tierra árida, con más de 3,000 horas de sol al año, de las cuales, cerca del 90% llegan con radiación directa. Estas zonas son muy apropiadas para el uso de sistemas solares.

La siguiente región en importancia es el cinturón ecuatorial entre 15°N y 15°S , ya que es una zona de alta humedad y nubosidad. Hay alrededor de 2,300 horas de sol al año y variaciones estacionales muy ligeras. La radiación fluctúa entre 300 y 550 Cal/cm^2 por día a lo largo del año y pocos días seguidos de radiaciones bajas.

Entre los 35° y 45° N y S, en el borde de los desiertos, la radiación fluctúa alrededor de 400 Cal/cm^2 , en una super-

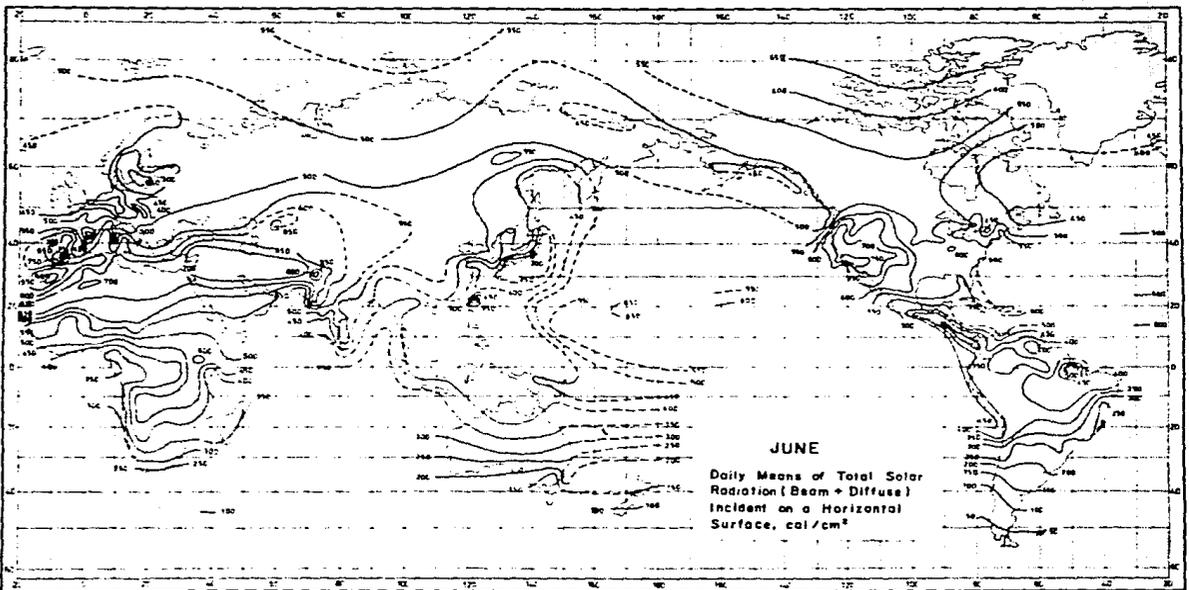


Figura No. 33 A. Promedio diario de Radiación para el mes de Junio.
 nio.

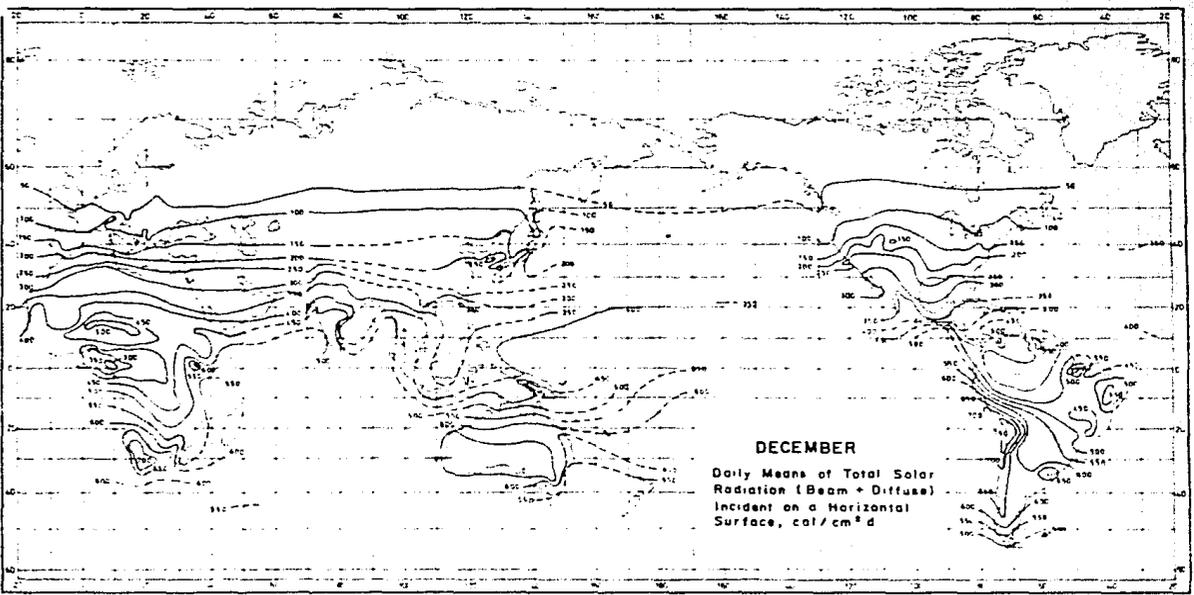


Figura No. 33 B. Promedio diario de Radiación para el mes de Diciembre.

ficie horizontal a lo largo del año, pero las estaciones son muy distintas y en el invierno hay poca radiación.

Las regiones al norte y sur de 45° tienen una capacidad limitada de energía solar en cuanto al uso directo durante el año.

III.4. MAPAS DE INSOLACION

Para poder estimar el valor de la radiación solar, necesitamos calcular la energía total que recibe una superficie dada en un tiempo determinado. Para esto, necesitamos sumar la energía recibida directamente sobre una ruta cuya dirección y masa de aire asociados cambien con el tiempo, junto con la distribución de energía difusa. La exactitud con la que se pueden realizar estos cálculos se ve seriamente afectada por las variaciones de las condiciones atmosféricas, a través de la contaminación, polvaderas, etc.. La mejor manera de obtener estos valores sería efectuando mediciones durante períodos prolongados, en el lugar a considerar.

Existen estaciones meteorológicas que tienen records de este tipo; a continuación se presenta una tabla con la insolación recibida en diferentes latitudes considerando atmósfera clara:

<u>Localidad</u>	<u>Latitud</u>	<u>Insolación (KW/cm²h)</u>		
		Máxima	Mínima	Tota:
Ecuador	0	6.5(7.5)	5.8(6.8)	2,200(2,300)
Trópicos	23.5	7.1(8.3)	3.4(4.2)	1,900(2,300)
Meridianos	45	7.2(8.5)	1.2(1.7)	1,500(1,900)
Círculo Polar	66.5	6.5(7.9)	0 (0)	1,200(1,400)

Estos valores son tomando en cuenta condiciones claras; solamente las nubes densas y la contaminación ambiental -- (industrial) pueden dar una disminución considerable en estos valores estimados.

A continuación se muestran doce mapas correspondientes a la radiación máxima total y doce más correspondientes a la radiación máxima directa de cada mes del año. Podemos observar que los promedios son bastante altos en relación con el mapa de insolación anual mundial. Todos ellos fueron tomados del libro "Cálculo de la Radiación Solar instantánea en la República Mexicana", de José Luis Fernández y Vicente Estrada Cajigal, y elaborado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Como ejemplo podemos ver que en La Paz, B.Cfa. el promedio para el mes de Enero de radiación máxima directa es de 564 W/m^2 y la radiación máxima total es de 695 W/m^2 . Para el mes de Febrero, la radiación máxima directa es de 659 W/m^2 y la total es de 795 W/m^2 .

Las líneas de insolación están separadas cada 50 W/m^2
y sirven para calcular la radiación cuando no se tiene definida
en puntos específicos (ciudades como Cuernavaca, Mor.).

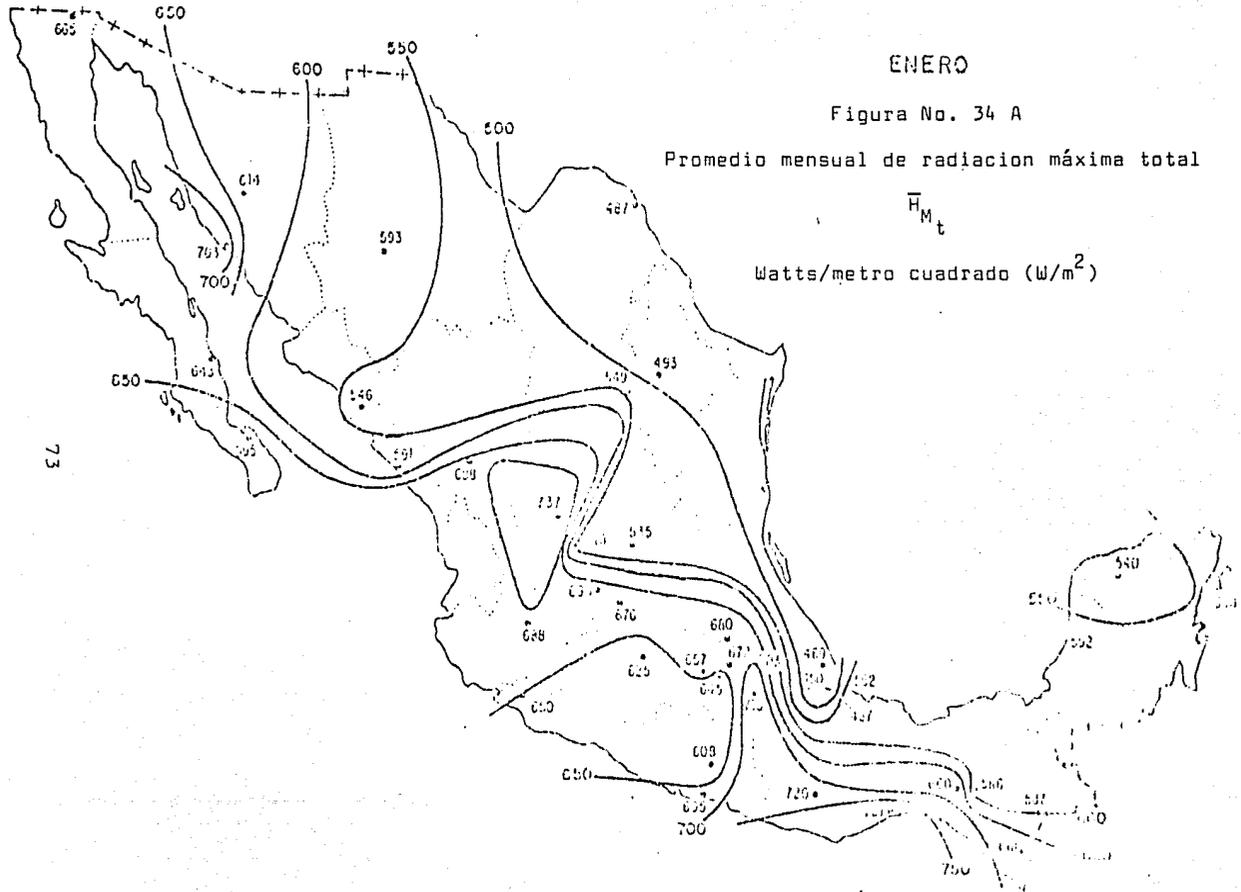
ENERO

Figura No. 34 A

Promedio mensual de radiación máxima total

$$\bar{H}_{M_t}$$

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



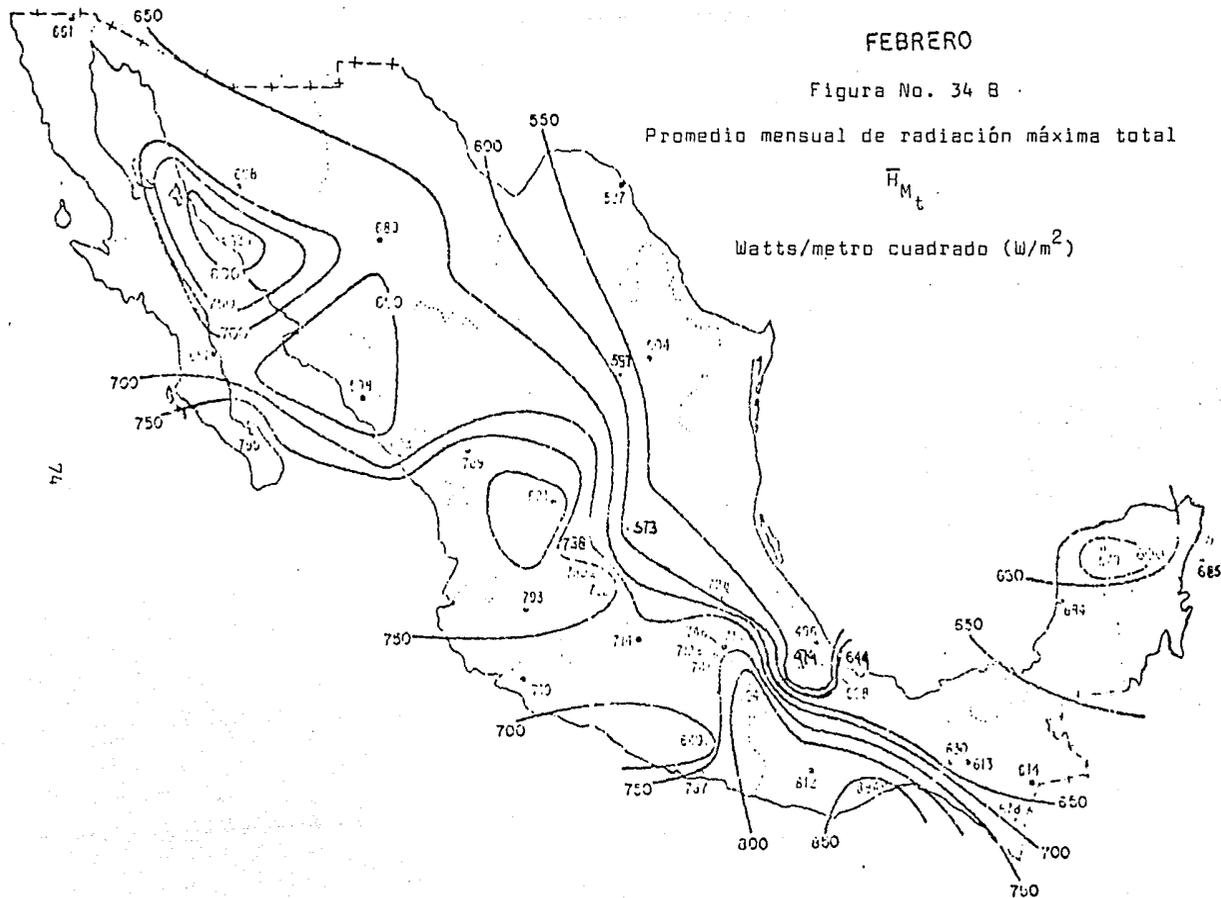
FEBRERO

Figura No. 34 B

Promedio mensual de radiación máxima total

\bar{H}_{M_t}

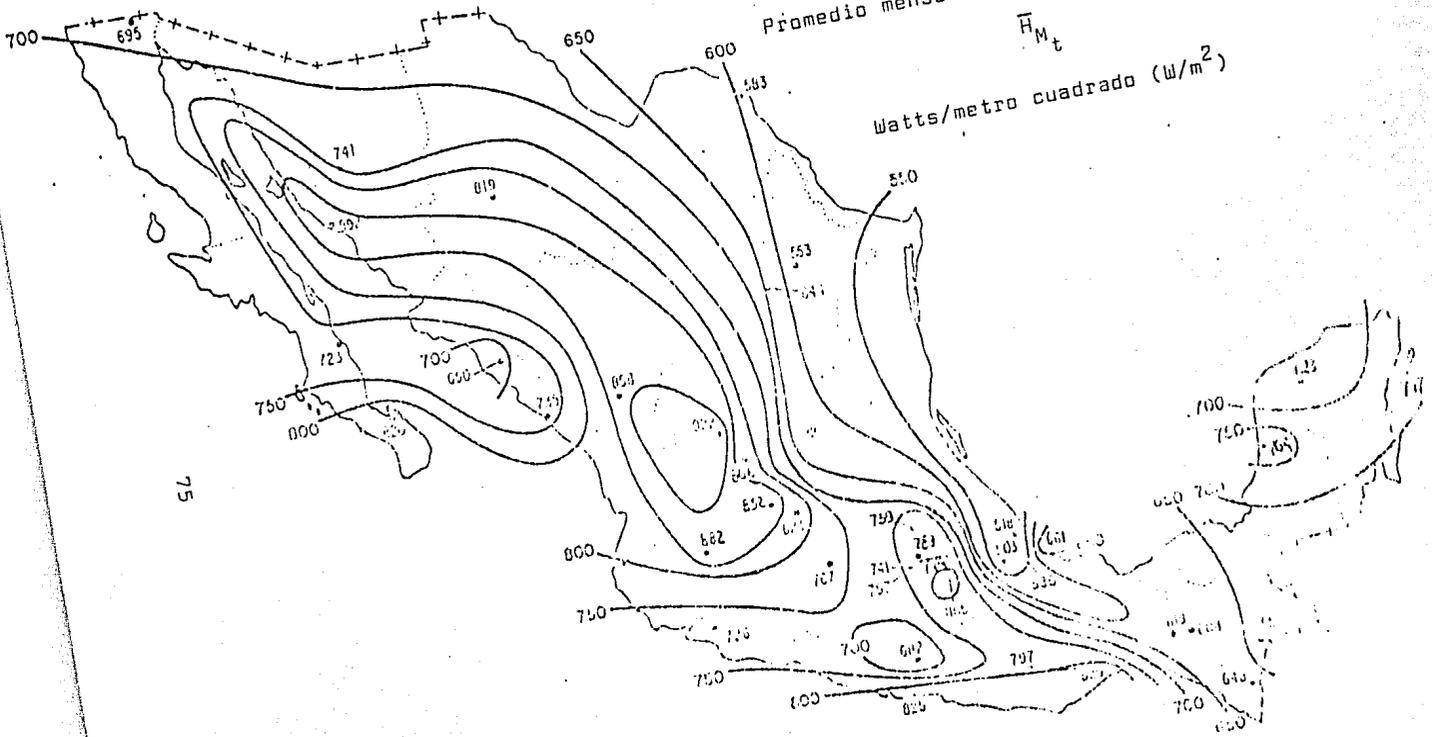
Watts/metro cuadrado (W/m^2)



MARZO
Figura No. 34 C

Promedio mensual de radiación máxima total
 \bar{H}_{M_t}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



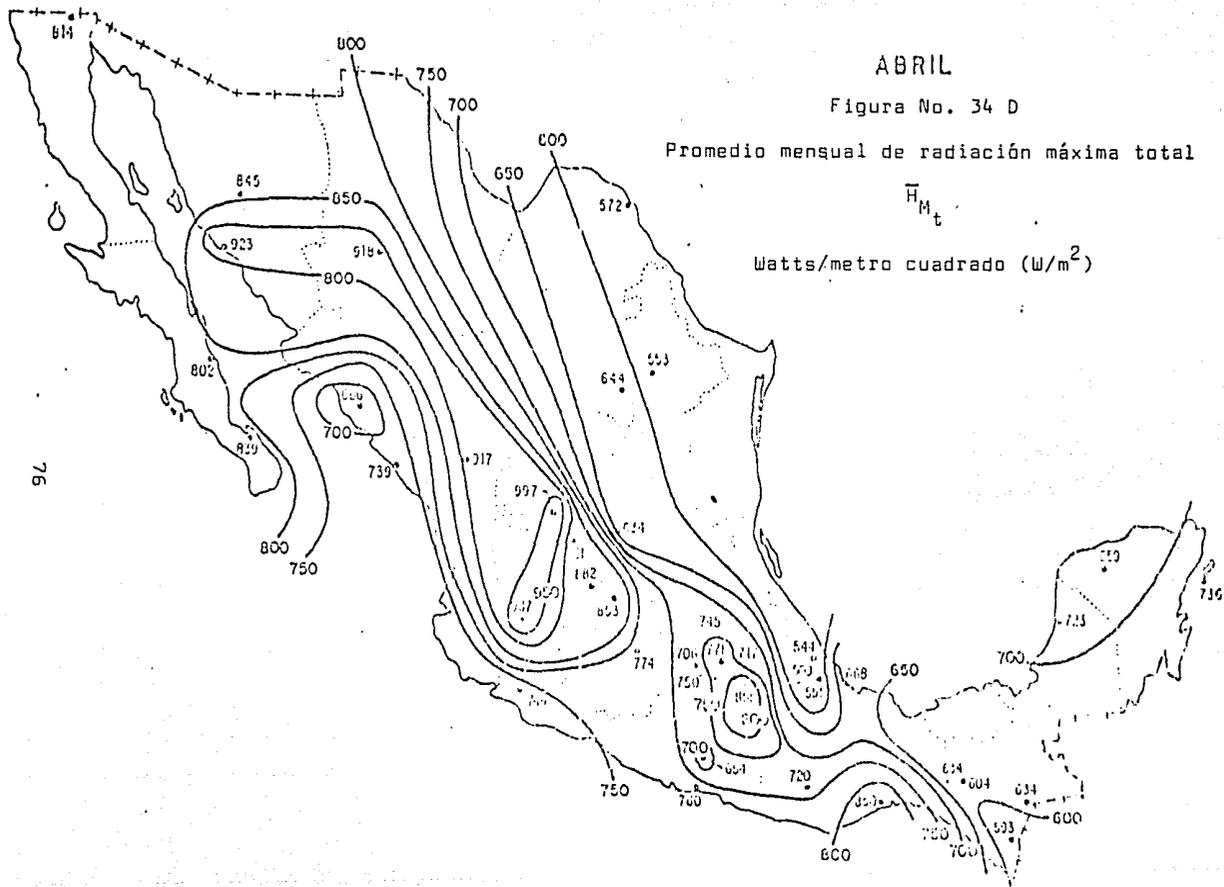
ABRIL

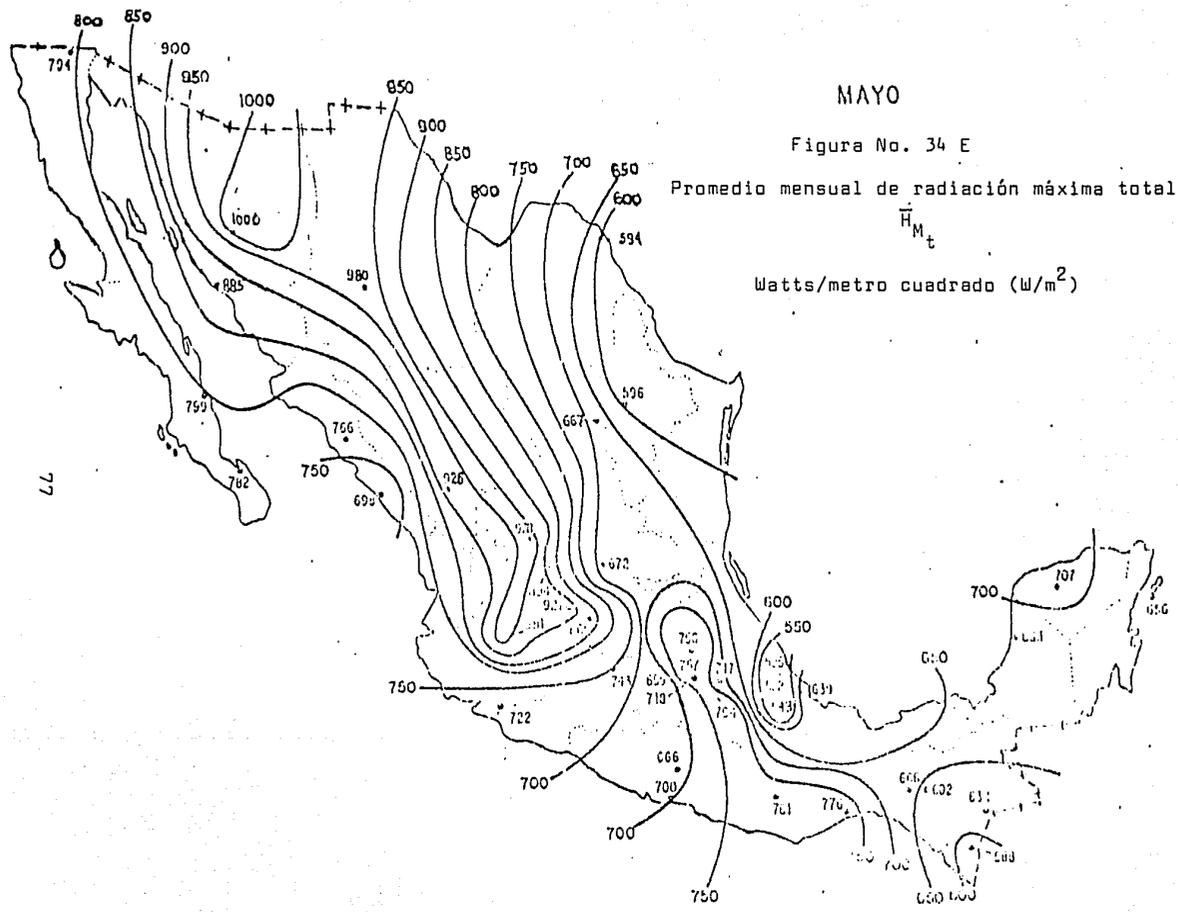
Figura No. 34 D

Promedio mensual de radiación máxima total

\bar{H}_{M_t}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)





MAYO

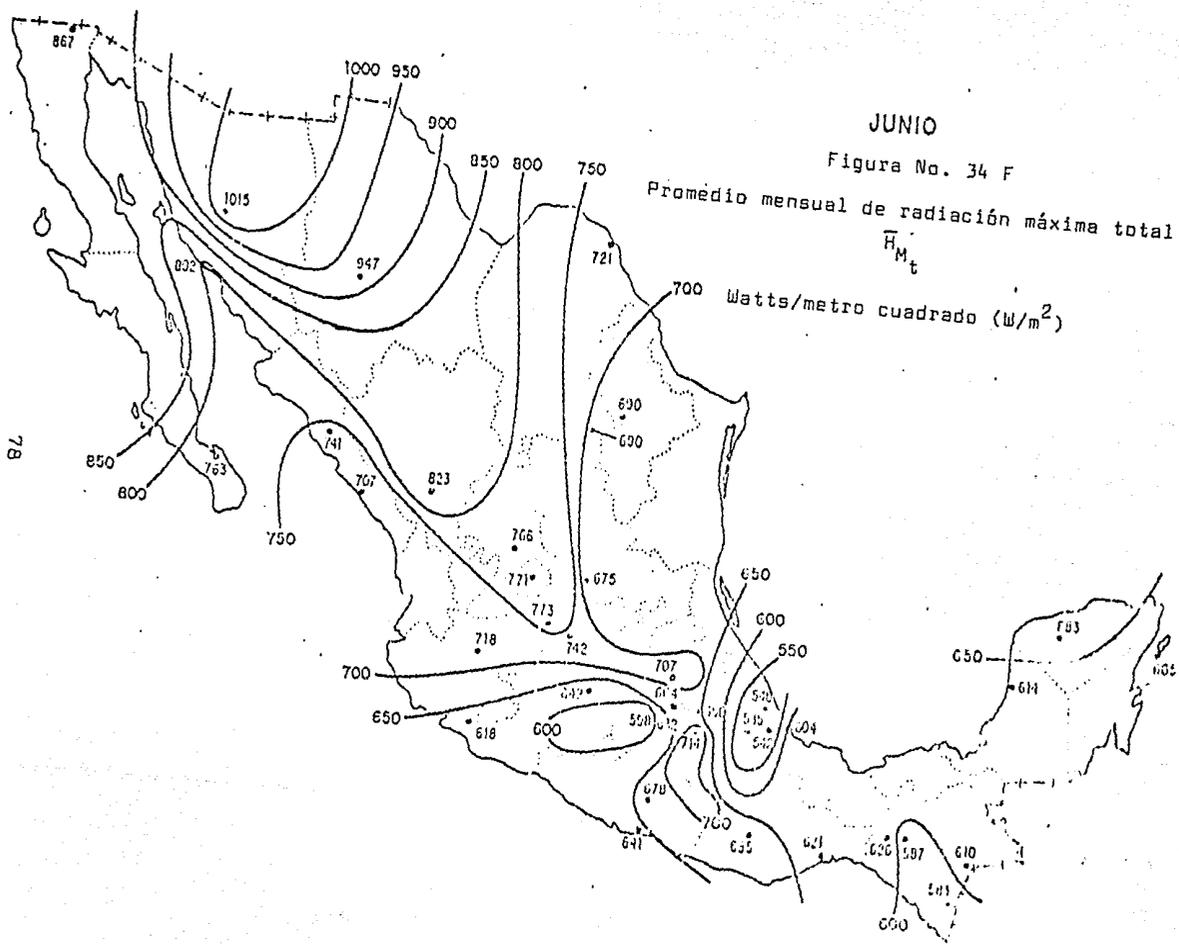
Figura No. 34 E

Promedio mensual de radiación máxima total

$$\bar{H}_{M_t}$$

Watts/metro cuadrado (W/m²)

77



JUNIO

Figura No. 34 F

Promedio mensual de radiación máxima total
 \bar{H}_{M_t}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)

78

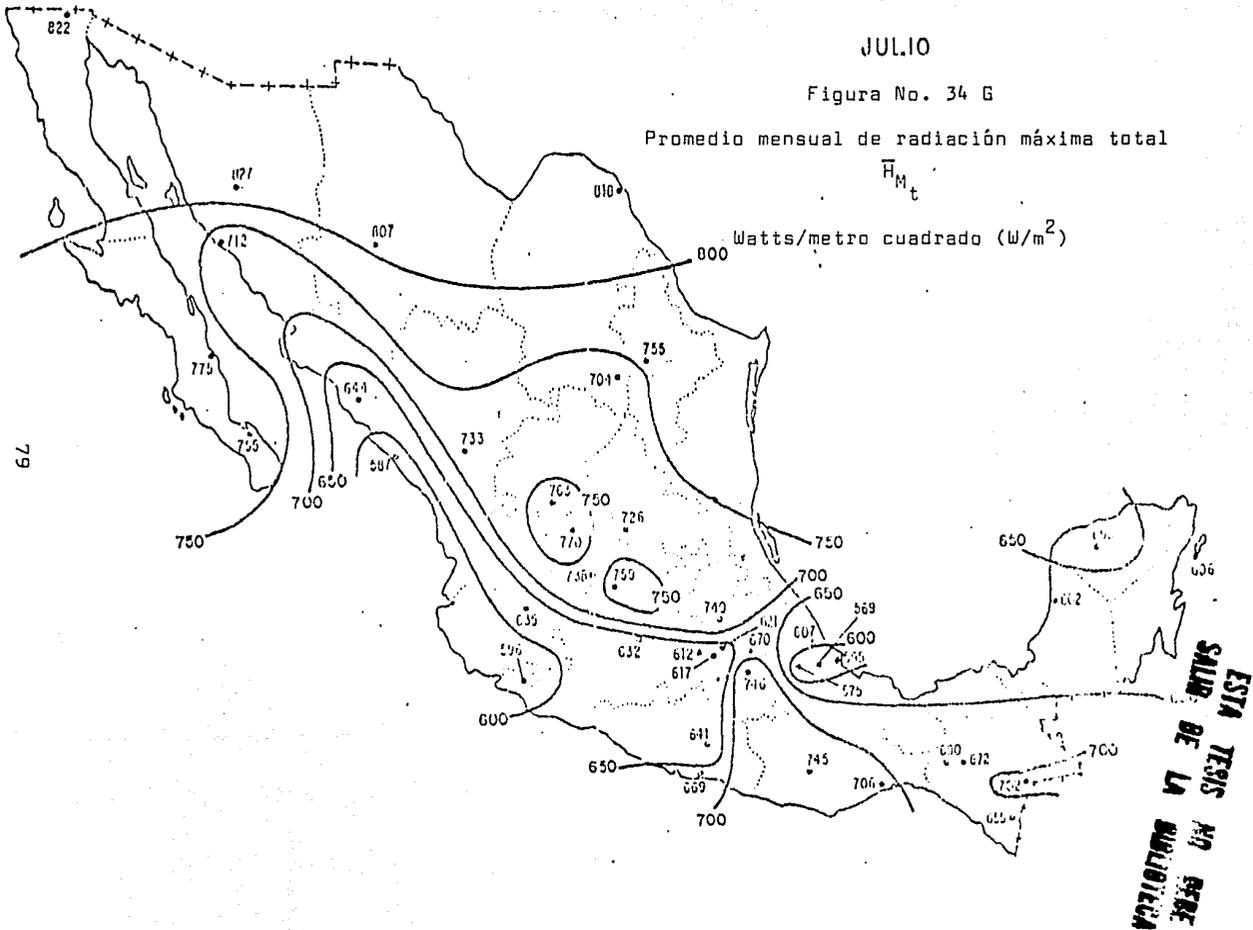
JULIO

Figura No. 34 G

Promedio mensual de radiación máxima total

\bar{H}_{M_t}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



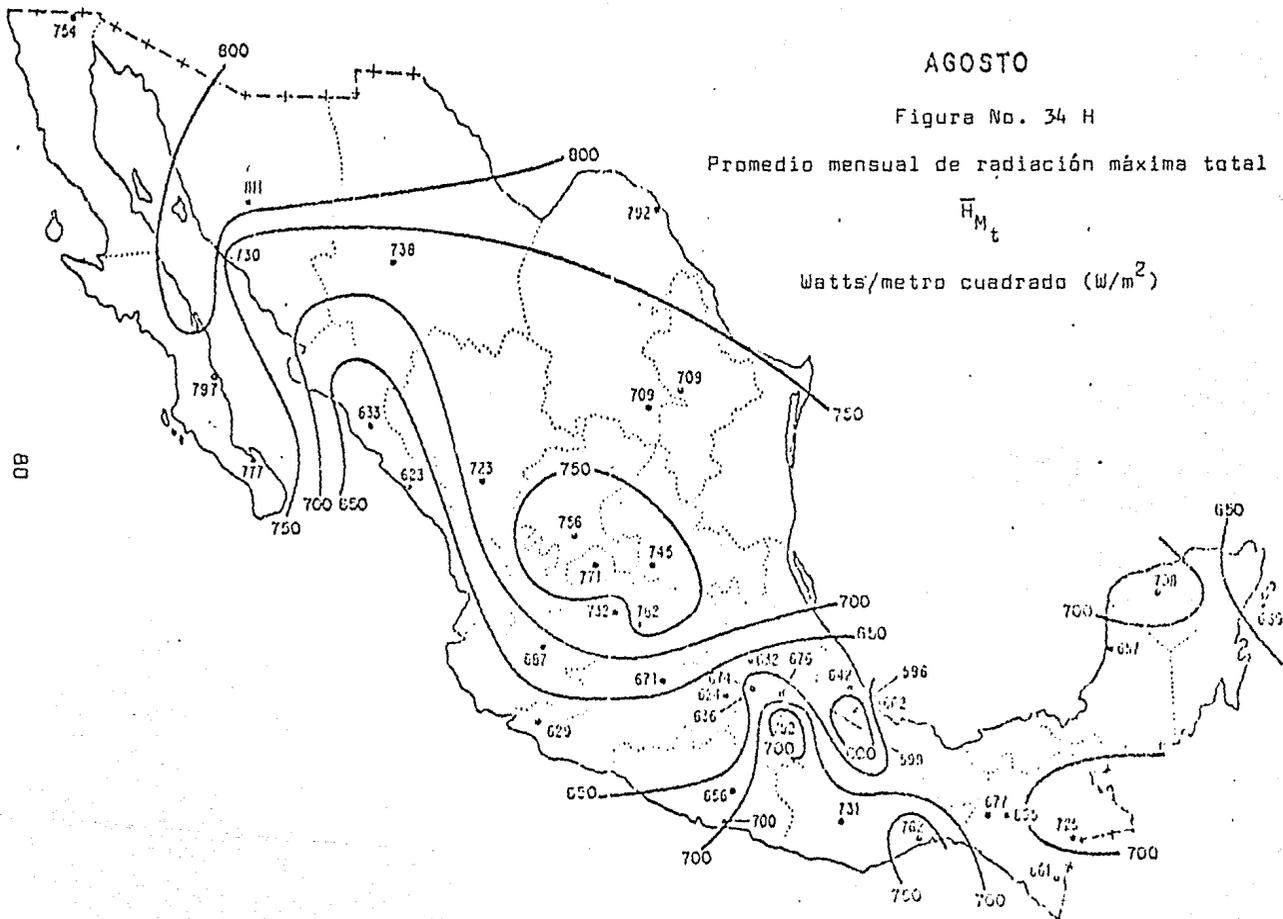
AGOSTO

Figura No. 34 H

Promedio mensual de radiación máxima total

\bar{H}_{M_t}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



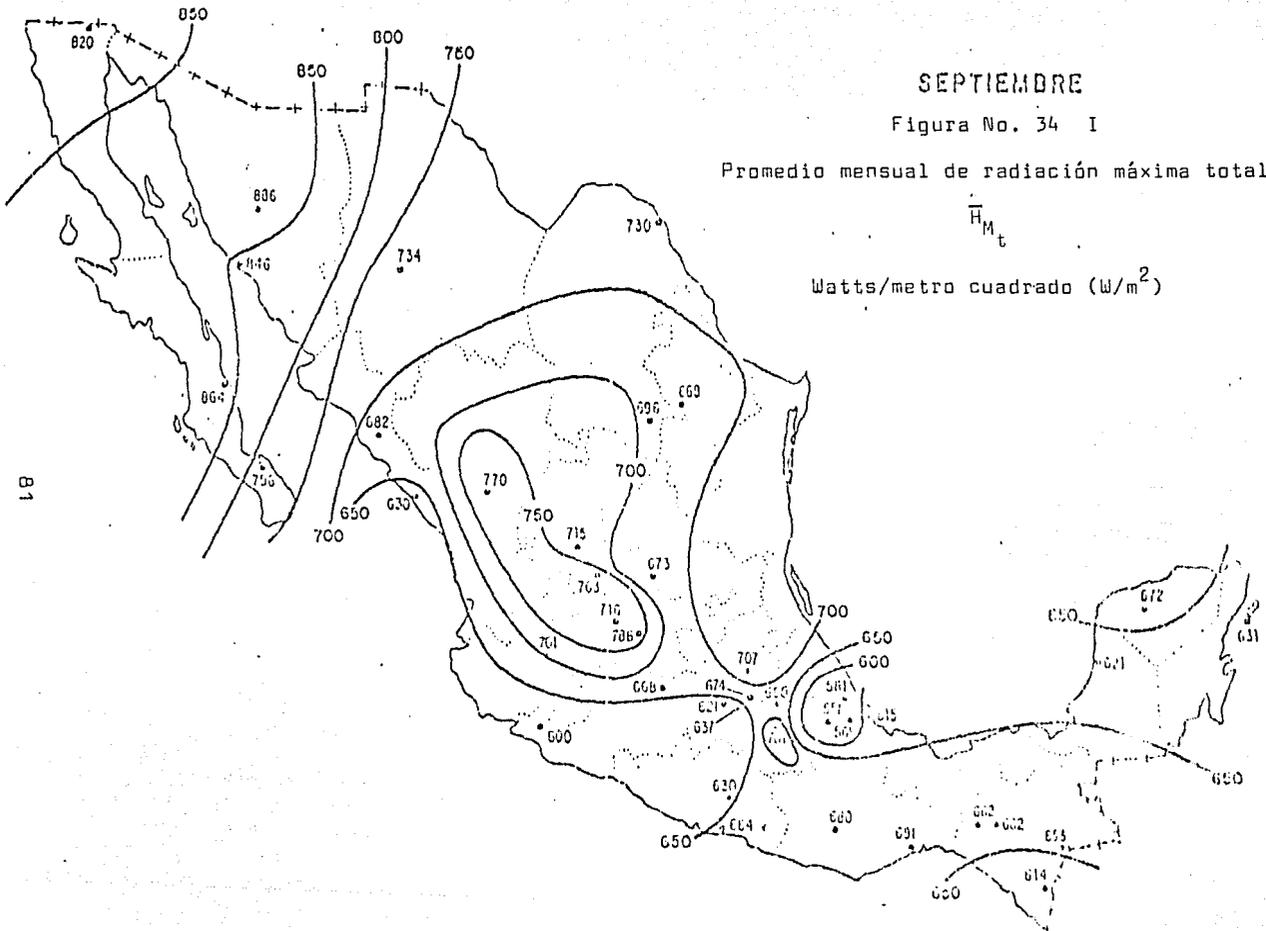
SEPTIEMBRE

Figura No. 34 I

Promedio mensual de radiación máxima total

\bar{H}_{M_t}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



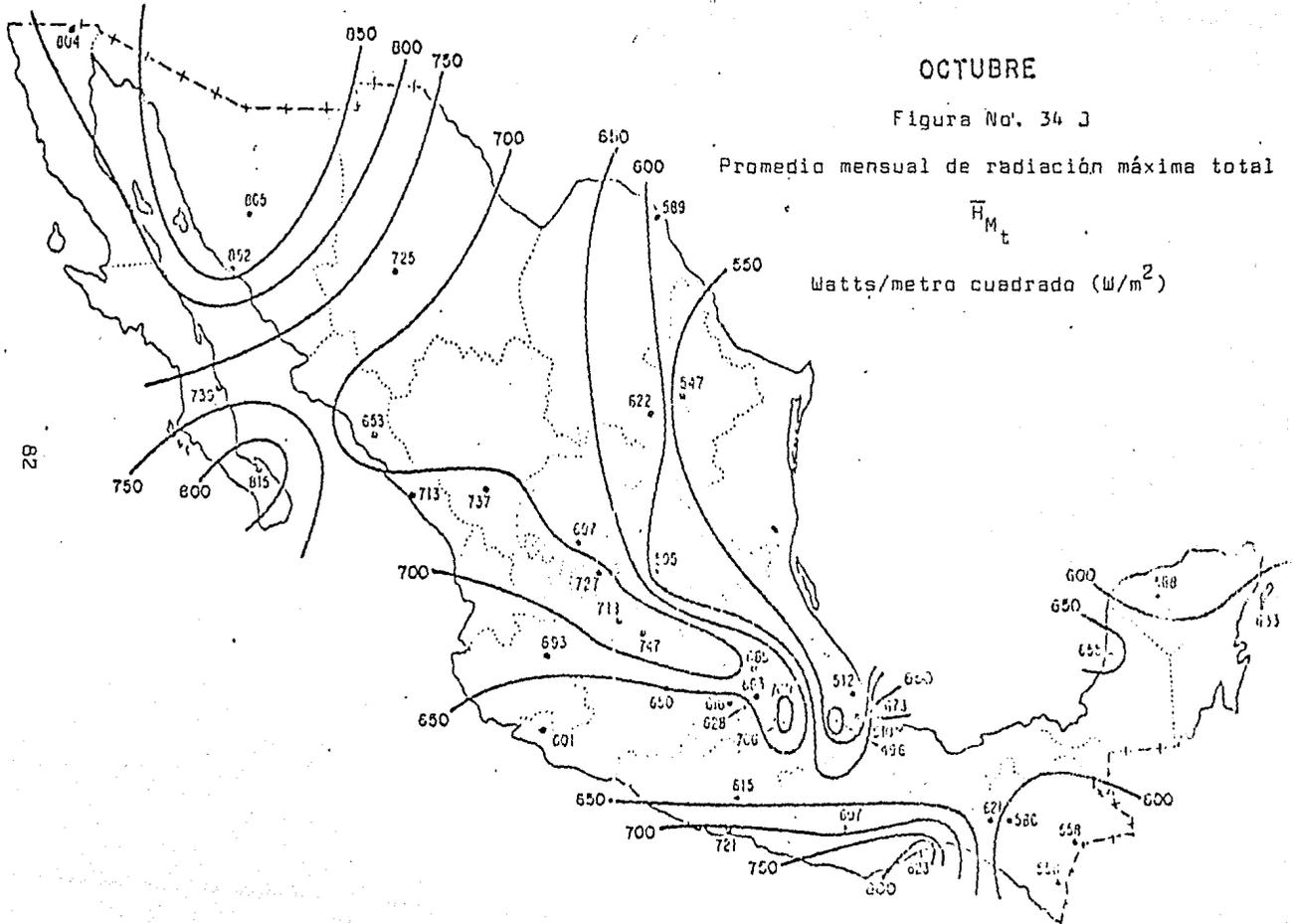
OCTUBRE

Figura No. 34 J

Promedio mensual de radiación máxima total

\bar{H}_{M_t}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



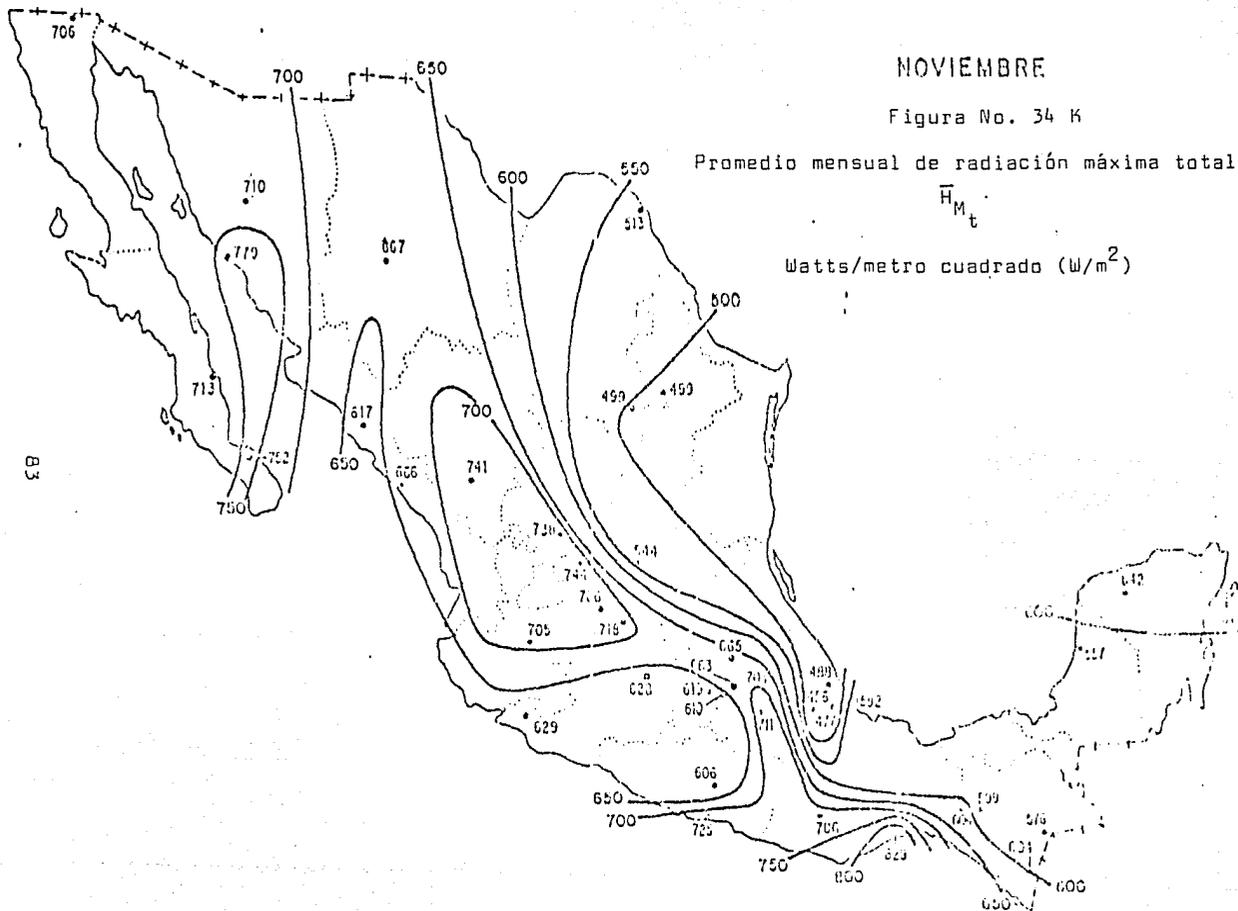
NOVIEMBRE

Figura No. 34 K

Promedio mensual de radiación máxima total

$$\bar{H}_{M_t}$$

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



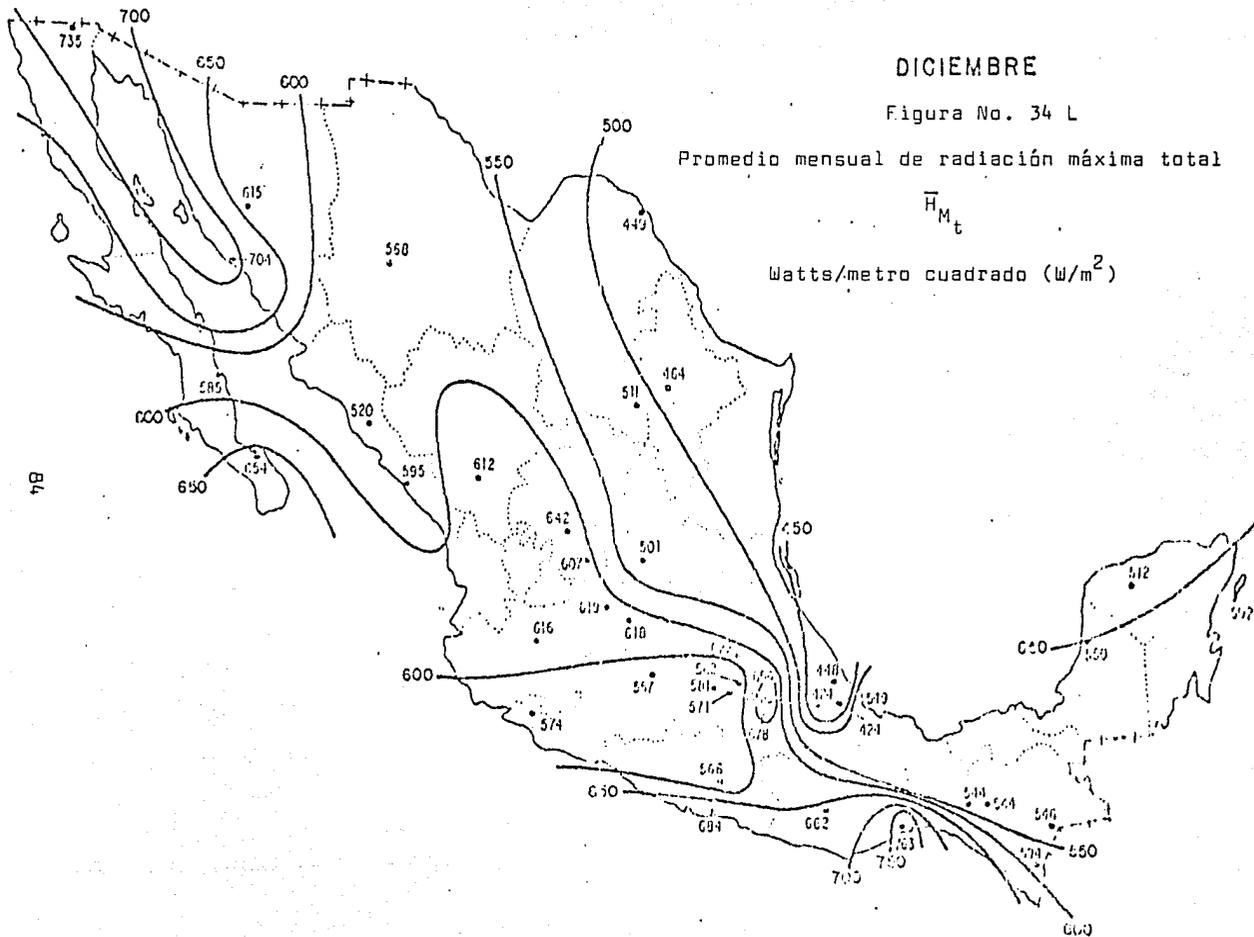
DICIEMBRE

Figura No. 34 L

Promedio mensual de radiación máxima total

\bar{H}_{M_t}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



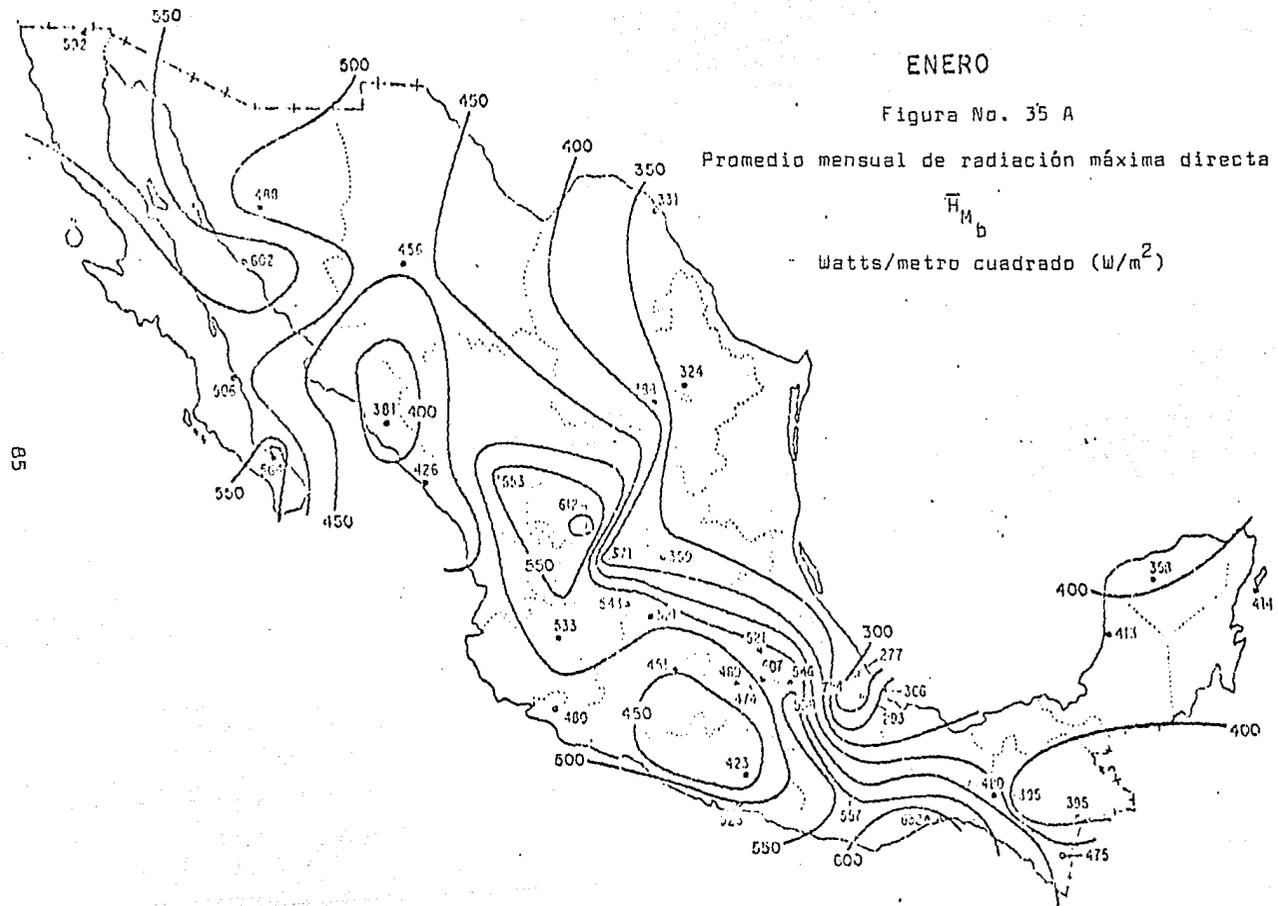
ENERO

Figura No. 35 A

Promedio mensual de radiación máxima directa

$$\overline{H}_{M_b}$$

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



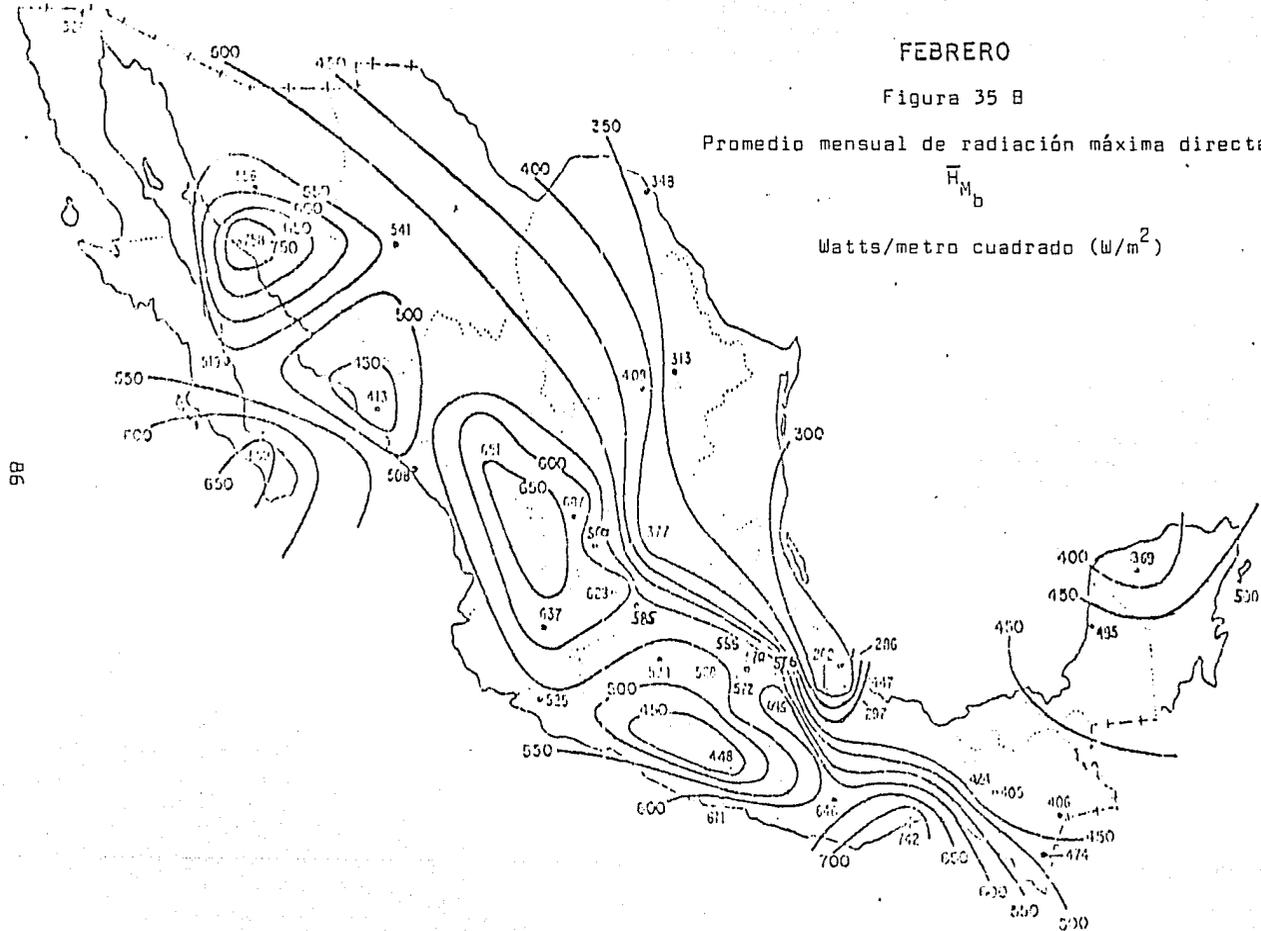
FEBRERO

Figura 35 B

Promedio mensual de radiación máxima directa

\bar{H}_{M_b}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



98

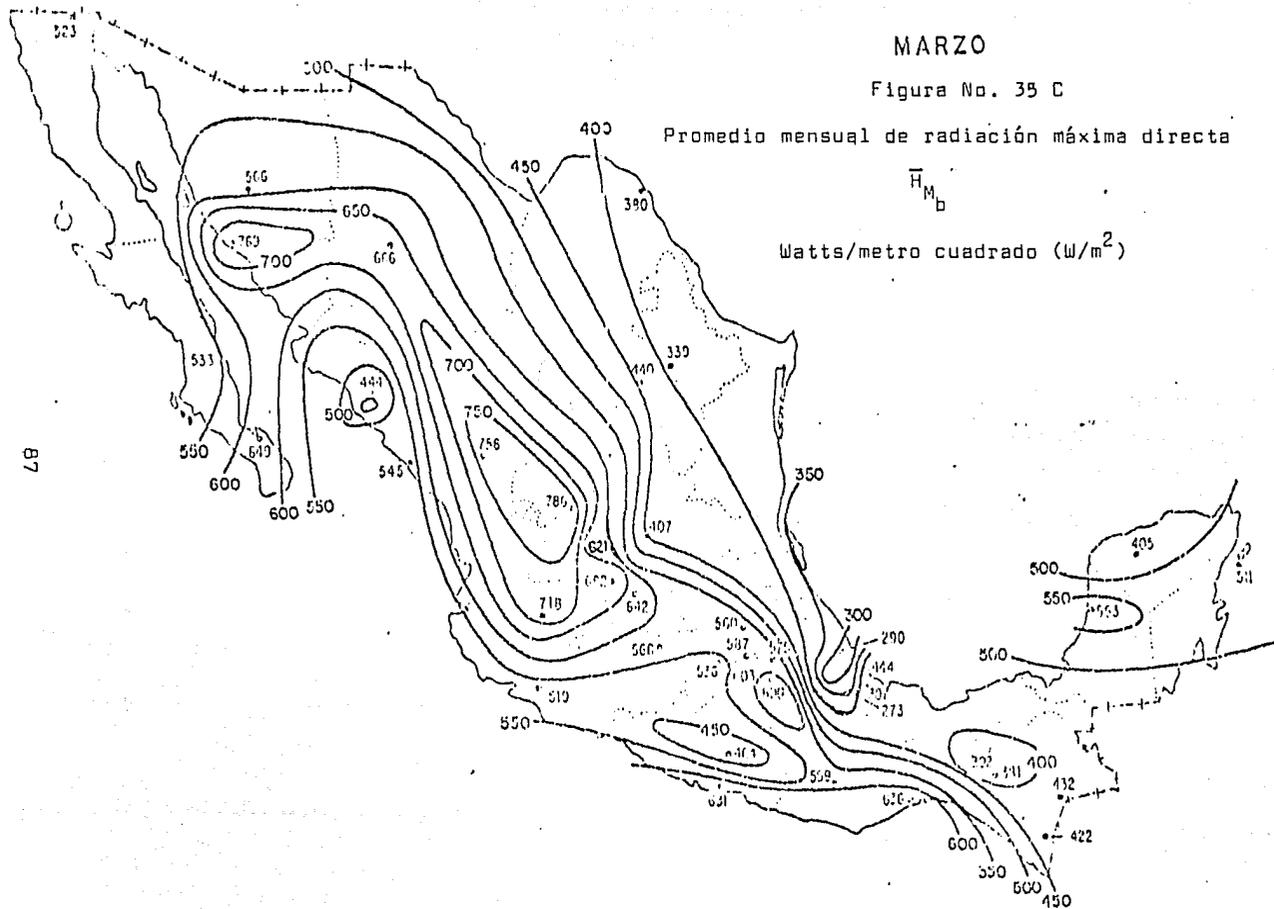
MARZO

Figura No. 35 C

Promedio mensual de radiación máxima directa

\overline{H}_{MD}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



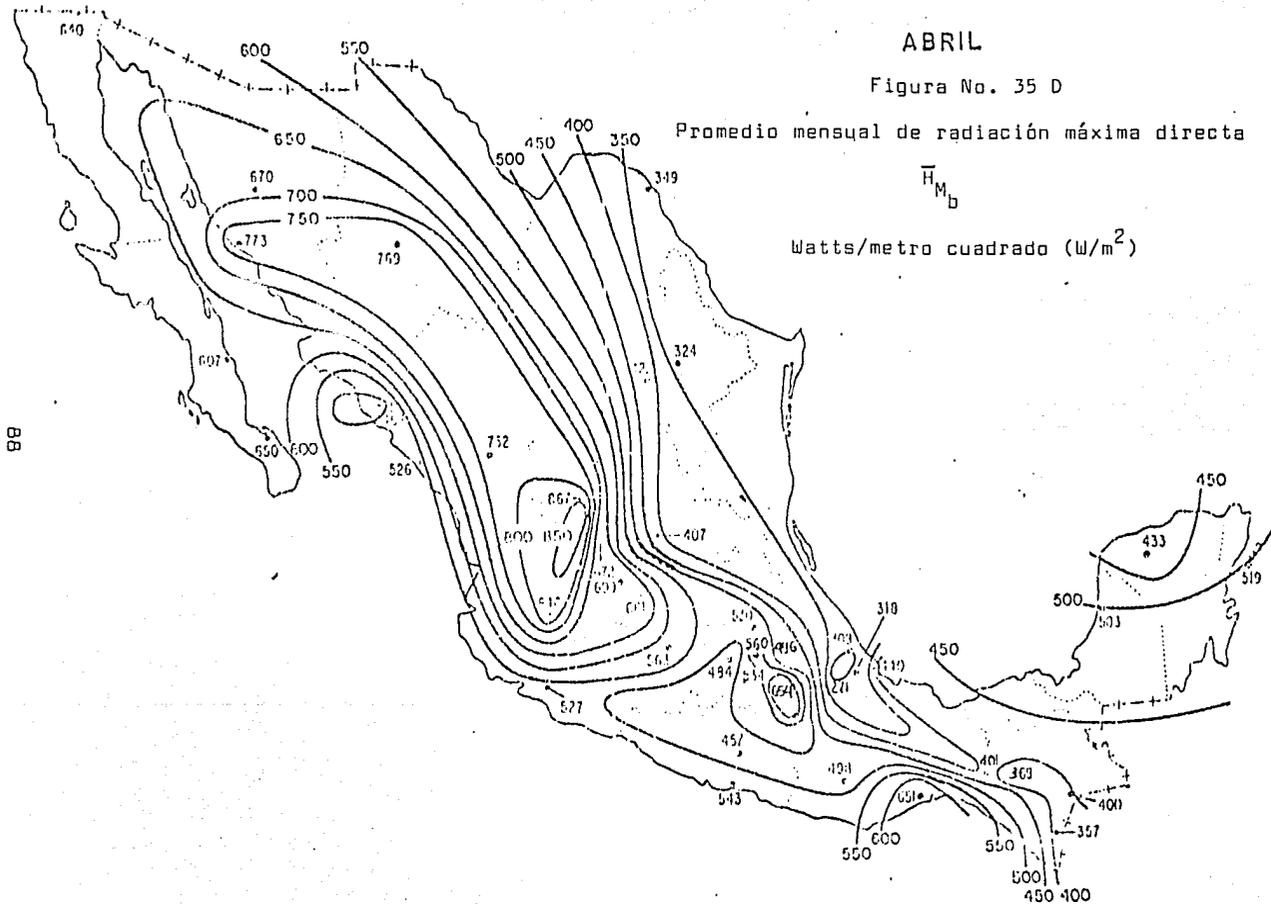
ABRIL

Figura No. 35 D

Promedio mensual de radiación máxima directa

\bar{H}_{M_b}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



MAYO

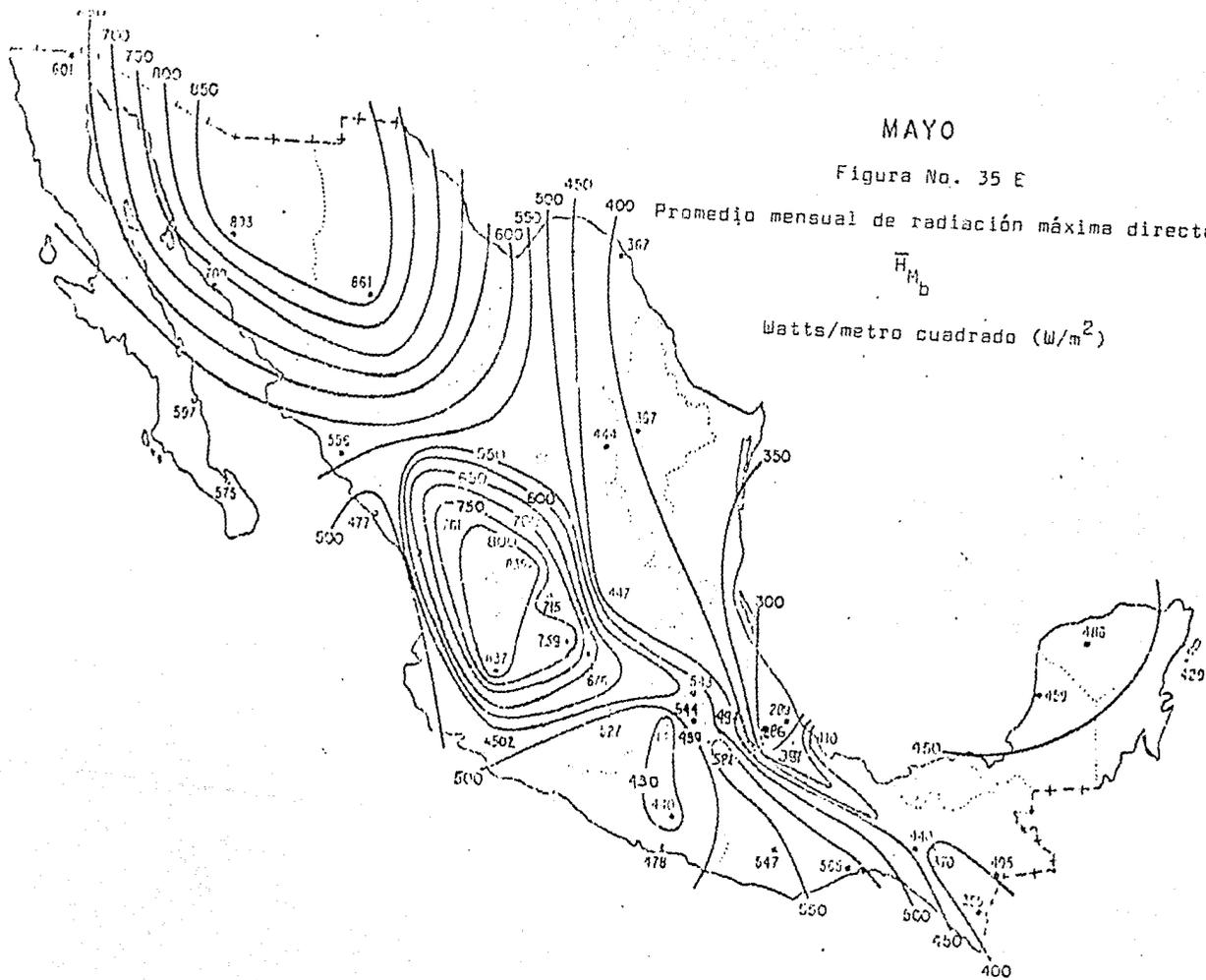
Figura No. 35 E

Promedio mensual de radiación máxima directa

\bar{H}_{H_b}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)

89



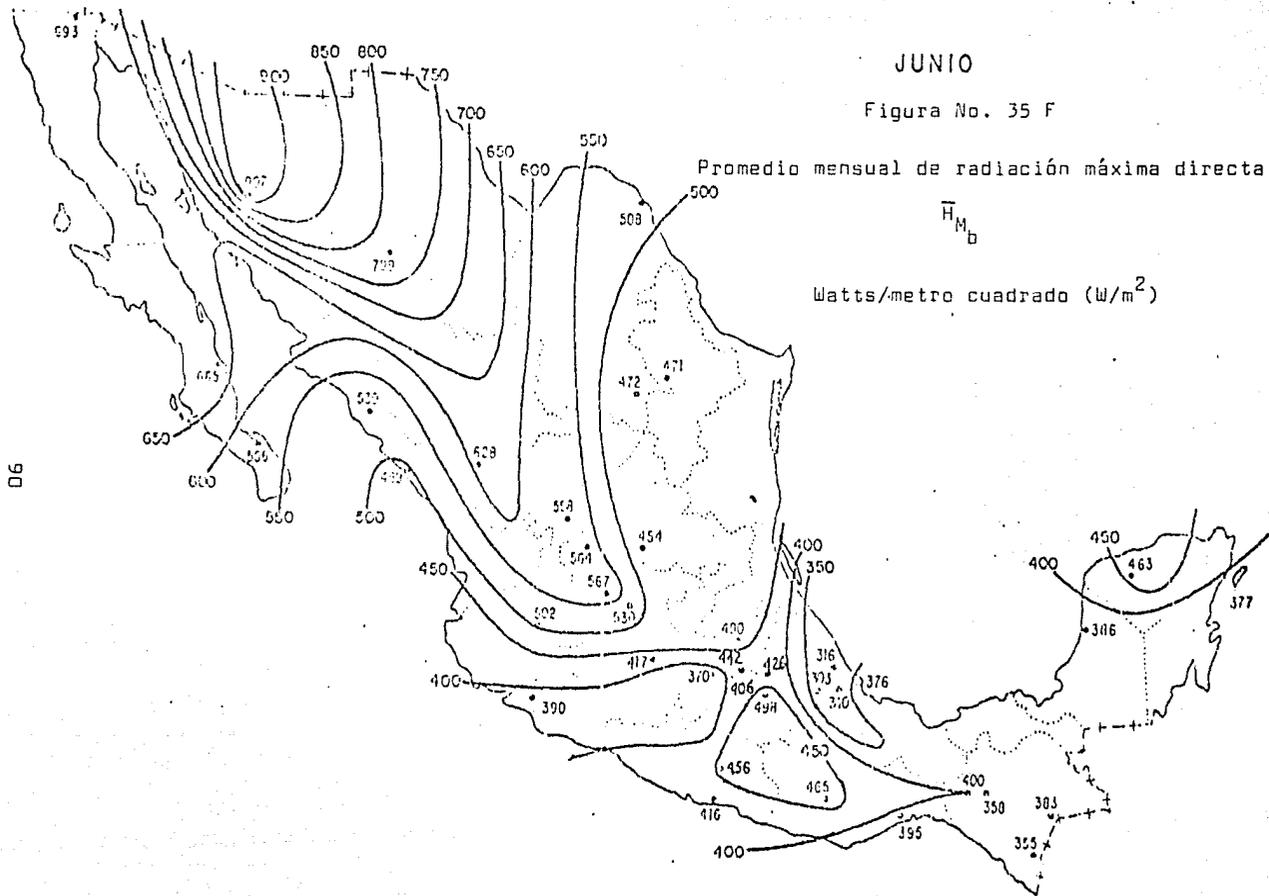
JUNIO

Figura No. 35 F

Promedio mensual de radiación máxima directa

$\bar{H}_{M,b}$

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



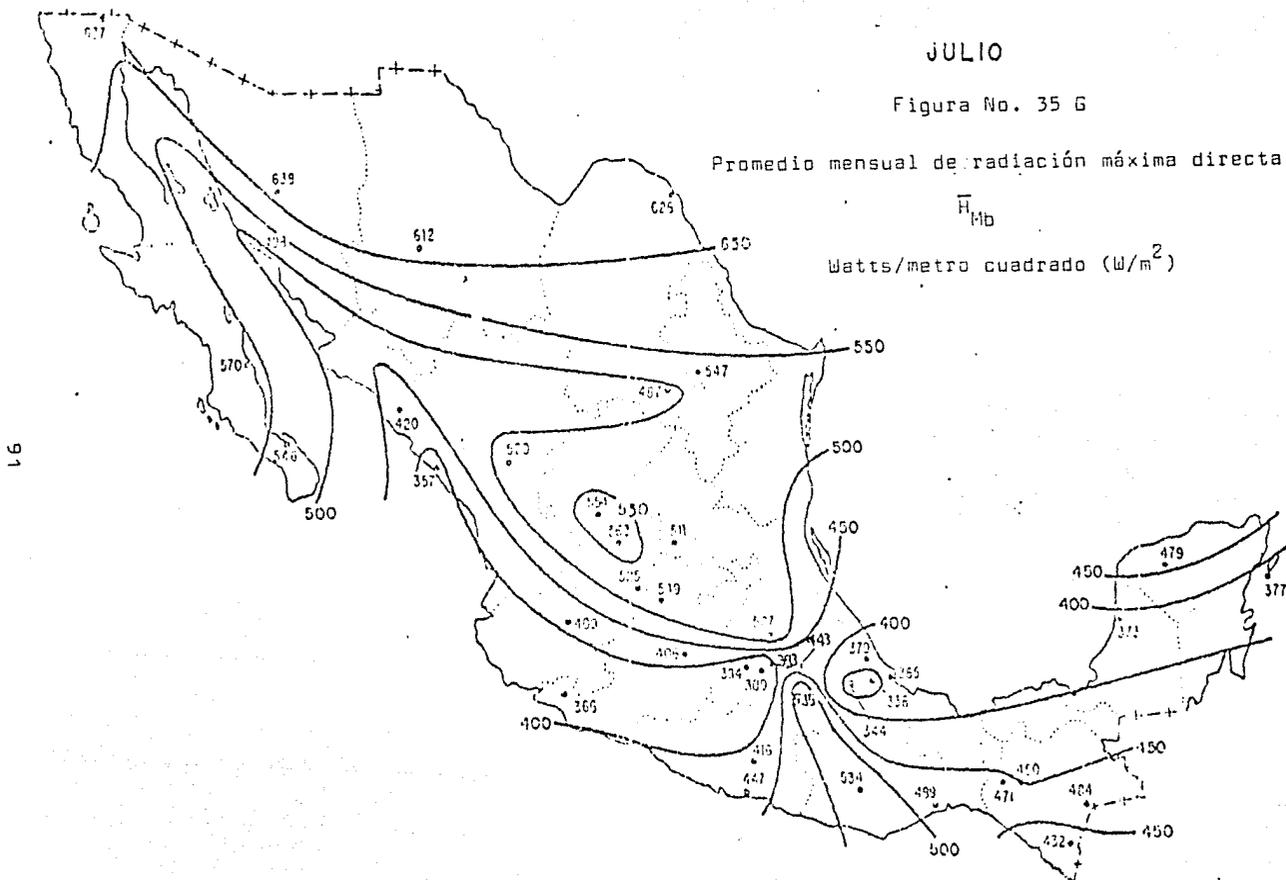
JULIO

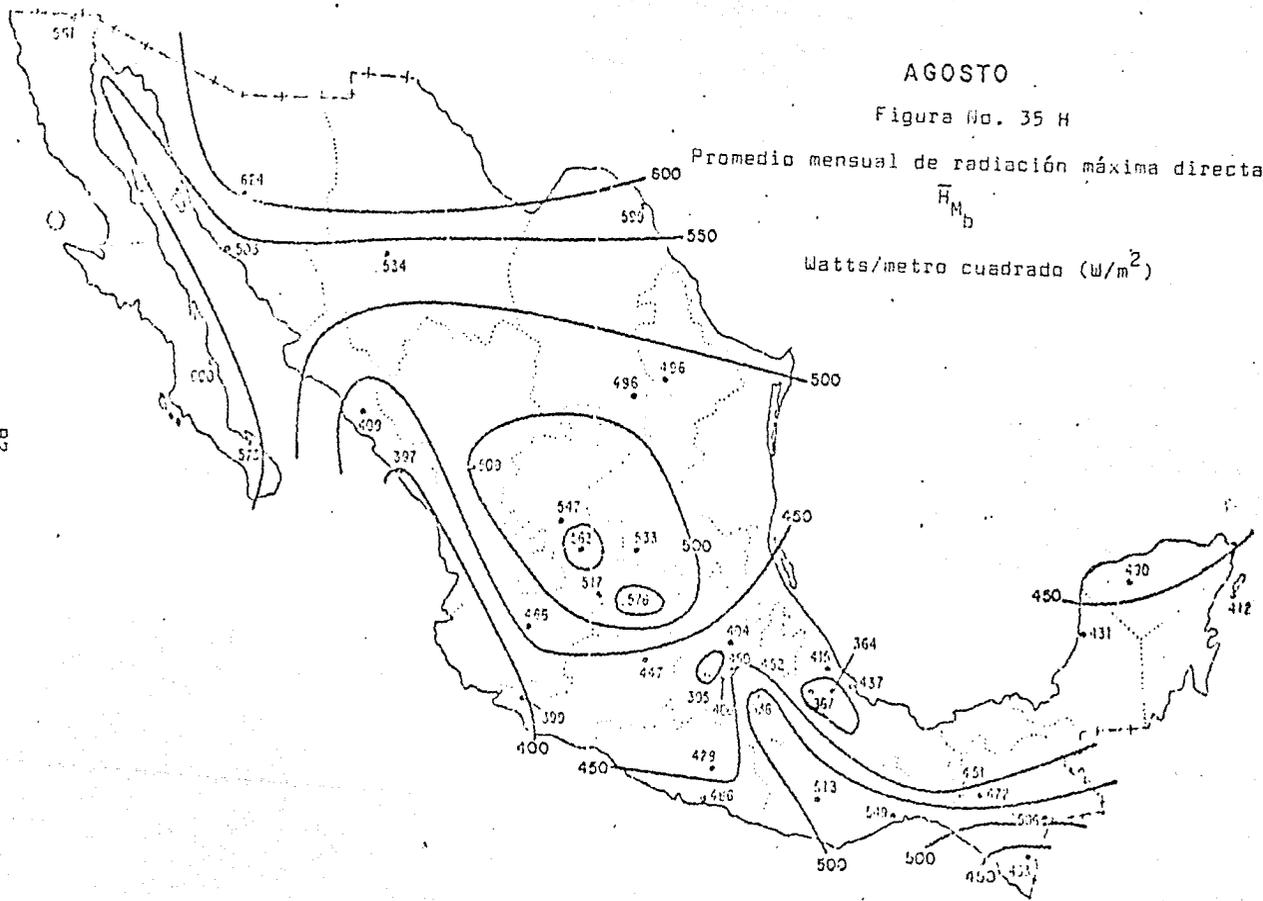
Figura No. 35 G

Promedio mensual de radiación máxima directa

\bar{H}_{Mb}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)





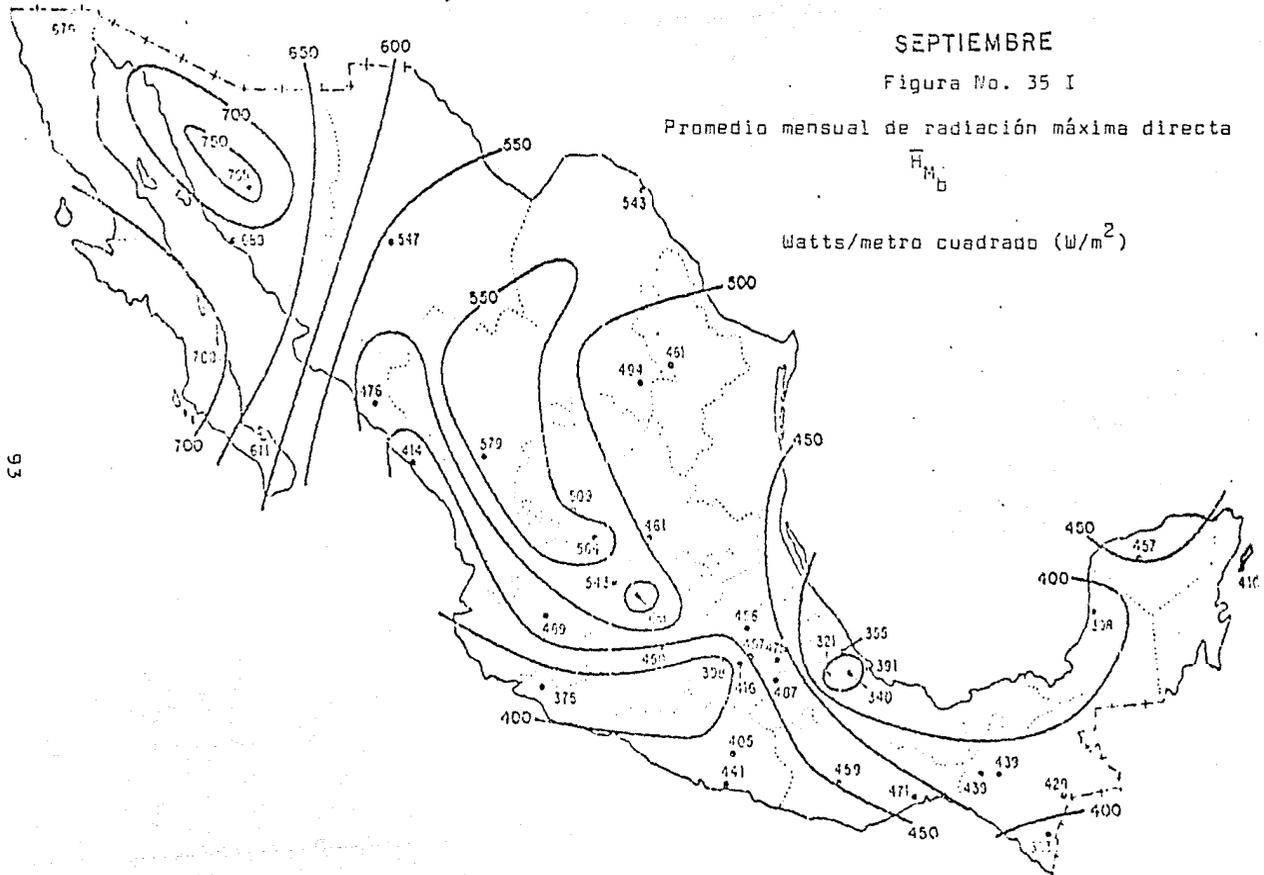
SEPTIEMBRE

Figura No. 35 I

Promedio mensual de radiación máxima directa

\bar{H}_{M_D}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



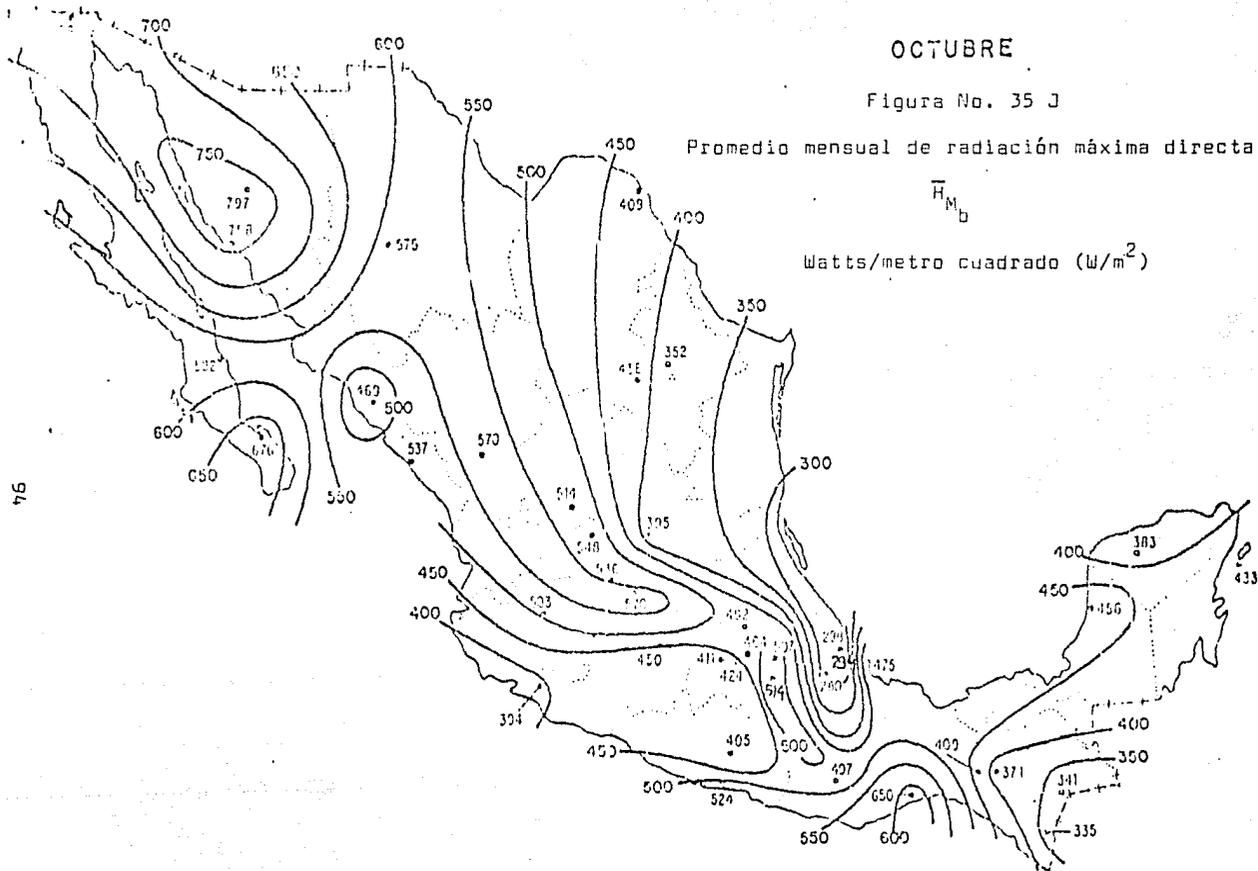
OCTUBRE

Figura No. 35 J

Promedio mensual de radiación máxima directa

\bar{H}_{M_b}

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



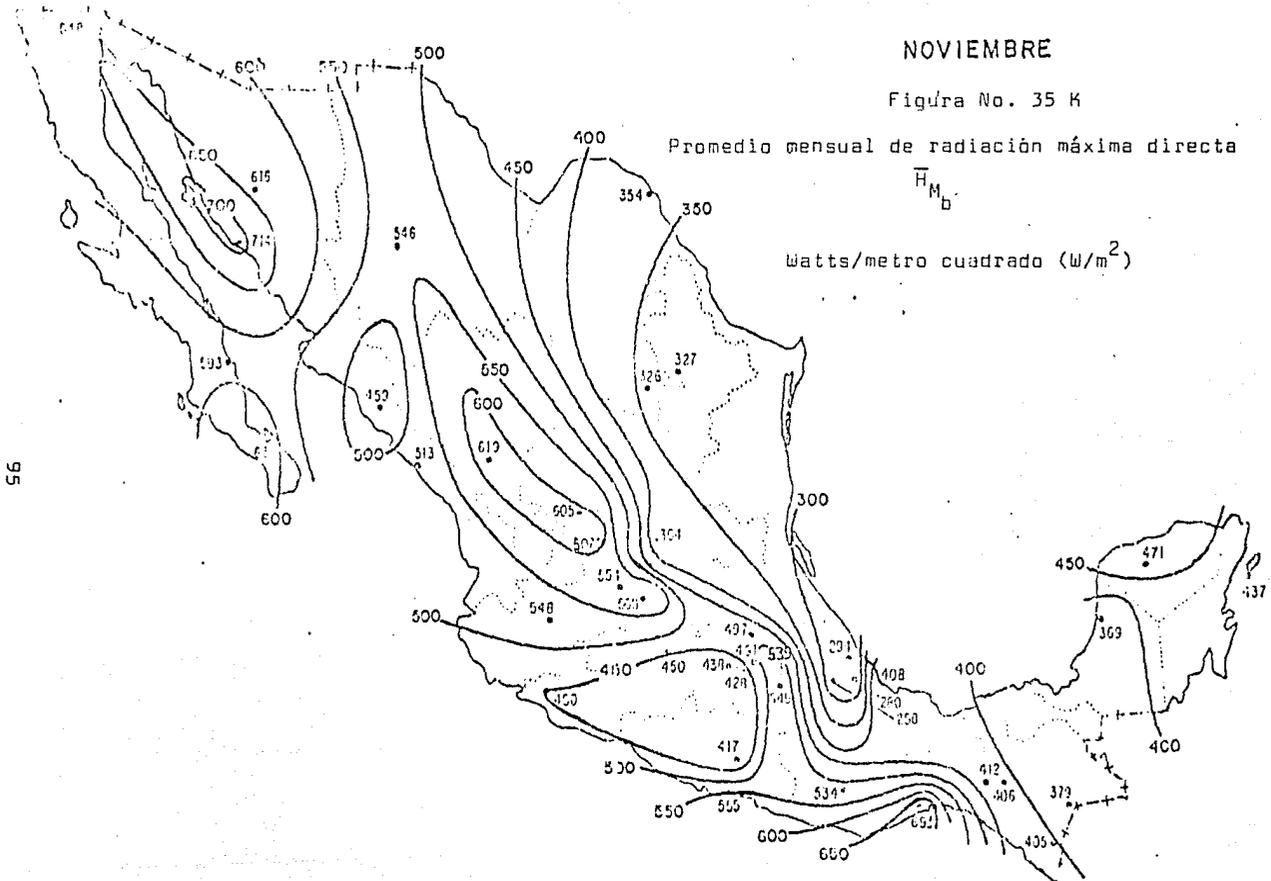
NOVIEMBRE

Figura No. 35 K

Promedio mensual de radiación máxima directa

$$\bar{H}_{M_b}$$

Watts/metro cuadrado (W/m^2)



III.5 RELACIONES GEOMETRICAS ENTRE PLANO Y RAYO SOLAR

Para determinar el ángulo de incidencia 'i', utilizamos la Figura No. 36 (relación entre un plano 'p' y el rayo solar), y la siguiente expresión:

$$\cos i = \underbrace{\sin \delta \sin \theta \cos \varphi}_{I} - \underbrace{\sin \delta \cos \theta \sin \varphi \cos A_{2 \text{ sup}}}_{II} + \underbrace{\cos \delta \cos \theta \cos \varphi \cos H}_{III} + \underbrace{\cos \delta \sin \theta \sin \varphi \cos A_{2 \text{ sup}}}_{IV} + \underbrace{\cos H + \cos \delta \sin \theta \sin A_{2 \text{ sup}} \sin H}_{V} \quad (3.5.1)$$

donde:

i = Ángulo de incidencia (signo positivo)

δ = Declinación (+, Norte Celeste; -, Sur Celeste)

θ = Latitud (+, Hemisferio Norte; - Hemisferio Sur)

φ = Ángulo de inclinación de la superficie receptora respecto a la horizontal (positivo)

$A_{2 \text{ sup}}$ = Azimut de la superficie de interés; medido desde el sur de 0° a 180° , + Este, - Oeste

H = Ángulo de hora solar (+, AM; - PM)

Para superficies orientadas exactamente al norte, --

$A_{2 \text{ sup}} = 180^{\circ}$ y el término V queda eliminado.

Para las superficies verticales ($\theta = 90^{\circ}$), los térmi-

hacia el Norte o Sur. Podemos observar que la superficie inclinada exactamente al Norte, tiene las mismas características de una superficie horizontal imaginaria, pero con actitud igual a: --- $'\theta - \phi'$ en lugar de $'\theta'$.

Así, reemplazando $'\theta - \phi'$ por $'\theta'$ en la última ecuación para superficie inclinada y exactamente hacia el Norte:

$$\cos i = \sin \delta \sin (\theta - \phi) + \cos \phi \cos (\theta - \phi) \cos H \quad (3.5.3)$$

En esta ecuación, $'\phi'$ será positivo para superficies exactamente inclinadas hacia el Sur y negativo para superficies exactamente inclinadas hacia el Norte.



Figura No. 37. Superficies exactamente orientadas hacia el Norte

- Hora de Salida del Sol y duración del Día

En el Capítulo II, se puede extraer esta información.

Así también tenemos en superficie horizontal :

$$\cos i = \cos 90^\circ = 0$$

$$\cos H = - \frac{\sin \delta \sin \theta}{\cos \delta \cos \theta} = - \operatorname{Tg} \delta \operatorname{Tg} \theta \quad \text{-----} \quad (3.5.4)$$

Por lo que H a la salida del Sol se representa como:

$$H_s = \operatorname{Arccos} (- \operatorname{Tg} \delta \operatorname{Tg} \theta) \quad (^\circ) \quad \text{-----} \quad (3.5.5)$$

Como 1 hr. = 15^o, la duración del día es igual a $N = 2/15 (H_s)$ (°).

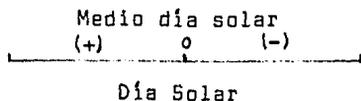
Con el monograma de la Figura No 38, uniendo la latitud del lugar con la declinación que corresponde y prolongando - hasta cortar la línea superior, se puede leer directamente la hora de la puesta del sol, en invierno o en verano.

Para la hora solar tenemos:



Tomando la hora solar (de la fórmula 2.6.1), la parte positiva es de 12 a 0 horas en la mañana y de 0 a -12 en la tarde.

De ahí que para el día solar tenemos:



En México la duración del día se encuentra en un rango de 10 a 13 horas, dependiendo del mes.

Invierno	16:00	17:00	18:00
Hora			
Verano	20:00	19:00	

Declinación
10
15
20

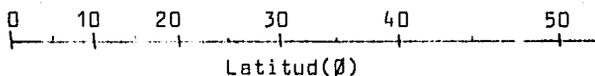


Figura No. 38. Nomograma para determinar hora solar de la puesta del Sol.

III.6. INSTRUMENTOS DE MEDICION

- Pirheliómetro

Es un instrumento que utiliza un detector para medir la radiación directa y la de una pequeña parte del cielo, en superficies perpendiculares a los rayos solares. Existe una gran variedad de pirheliómetros, entre los que se encuentran el diseño de Abbot, construido en 1905, y uno de los primeros diseños -

de este tipo. Utiliza un cuerpo cilíndrico negro, con una cavidad que absorbe la radiación y que es transmitida a través de un tubo "Collimated". El agua fluye alrededor y sobre la cavidad absorbente. La energía absorbida se determina por medio de la medición de la temperatura y la relación de flujo. Otro diseño de -- Abbot es el consistente en un disco de plata, dentro del cual se coloca el depósito de un termómetro; se expone a los rayos solares y posteriormente se coloca en la sombra; con la diferencia de temperaturas se conocen las calorías recibidas. Existe otro pirheliómetro que tiene un disco de plata y un obturador que admite la radiación y oscurece el detector con intervalos regulares. Es un diseño poco más adelantado que los anteriores; aquí los cambios de temperatura en el disco son medidos con un termómetro que marca la radiación absorbida. Por lo general los pirheliómetros eléctricos se basan en un par de receptores, uno de los cuales se deja calentar por el sol y el otro por medio de -- una corriente eléctrica. Con la ayuda de un par termoelectrónico -- se regula la igualdad de temperaturas y la potencia eléctrica -- consumida sirve para medir la radiación solar.

De los diseños con mayor exactitud se encuentra el -- pirheliómetro de incidencia normal, de la Compañía Eppley. Su uso es de gran aceptación en Estados Unidos.

Algunos de estos instrumentos son utilizados para calibrar otros más sofisticados, y se basan en escalas que han ido

de este tipo. Utiliza un cuerpo cilíndrico negro, con una cavidad que absorbe la radiación y que es transmitida a través de un tubo "Collimated". El agua fluye alrededor y sobre la cavidad absorbente. La energía absorbida se determina por medio de la medición de la temperatura y la relación de flujo. Otro diseño de -- Abbot es el consistente en un disco de plata, dentro del cual se coloca el depósito de un termómetro; se expone a los rayos solares y posteriormente se coloca en la sombra; con la diferencia de temperaturas se conocen las calorías recibidas. Existe otro pirheliómetro que tiene un disco de plata y un obturador que admite la radiación y oscurece el detector con intervalos regulares. Es un diseño poco más adelantado que los anteriores; aquí los cambios de temperatura en el disco son medidos con un termómetro que marca la radiación absorbida. Por lo general los pirheliómetros eléctricos se basan en un par de receptores, uno de los cuales se deja calentar por el sol y el otro por medio de -- una corriente eléctrica. Con la ayuda de un par termoeléctrico se regula la igualdad de temperaturas y la potencia eléctrica -- consumida sirve para medir la radiación solar.

De los diseños con mayor exactitud se encuentra el -- pirheliómetro de incidencia normal, de la Compañía Eppley. Su uso es de gran aceptación en Estados Unidos.

Algunos de estos instrumentos son utilizados para calibrar otros más sofisticados, y se basan en escalas que han ido

cambiando con el tiempo, como la AS05, SS13, IPS56 (International Pyrheliometric Scale, 1956). La organización mundial meteorológica (WMO) está de acuerdo, con que la calibración pirheliométrica al aire libre, se debe realizar en días con gran claridad atmosférica, para tener errores mínimos, que en el presente fluctúan entre el 5 y 10%.

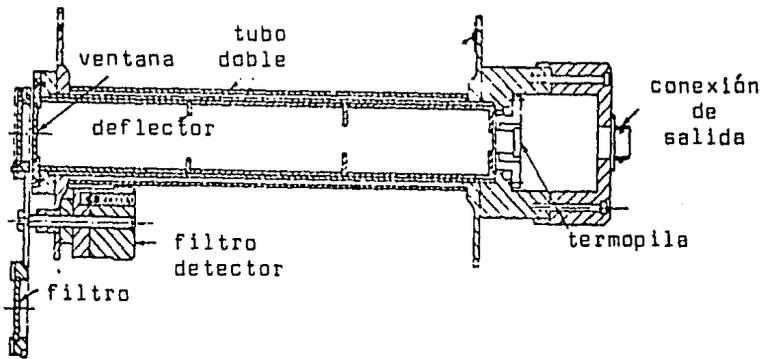
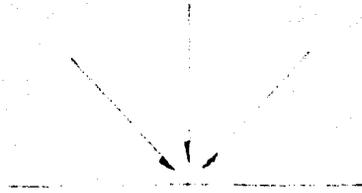


Figura No. 39. Corte del Pirheliómetro de Incidencia Normal de Eppley (Cortesía de los Laboratorios Eppley).

- Piranómetro o Actinómetro

Son instrumentos que miden la radiación hemisférica total (directa y difusa), generalmente en superficies horizontales, y es de ellos de donde se ha obtenido el mayor número de datos.

Rayos Solares



Superficie Horizontal

Figura No. 40

Los detectores de estos instrumentos deben tener una respuesta independiente de la longitud de onda de la radiación sobre el espectro de energía solar. Estos detectores por lo general están cubiertos con un vidrio hemisférico para protegerlos del viento y demás efectos externos. Las cubiertas deben tener un grosor uniforme para no producir una distribución irregular de la radiación en los detectores.

El piranómetro de cámara negra posee una cámara esférica de negro de humo, provista de un orificio pequeño que da paso a la luz. Los rayos luminosos son absorbidos por el negro de humo, que transforma la energía en calor. Dada la superficie del orificio y el incremento de temperatura experimentado, se conoce la intensidad de la energía radiante del sol.

El diseño que aparece en la siguiente figura es uno de los más usados en Estados Unidos. Es el piranómetro de la Compañía Eppley, de 180°. El detector consiste en dos anillos de pla

ta concéntricos; el anillo exterior tiene una capa de óxido de magnesio, el cual tiene una alta reflexión por radiación en el espectro de energía solar. El anillo interior está cubierto con Negro de Parson que tiene gran absorción de la radiación solar. La diferencia de temperaturas entre estos anillos nos da una medida de la radiación solar absorbida y se detecta por una serie de termopilas.

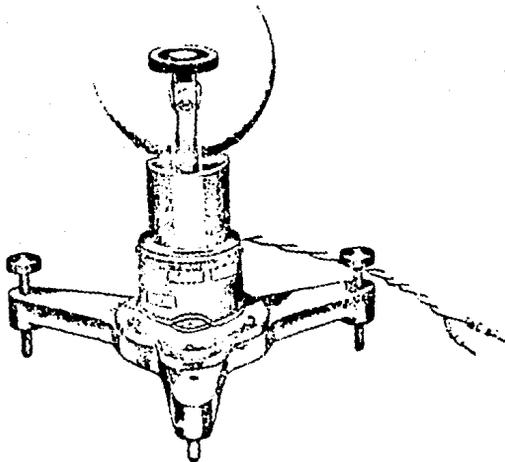


Figura No. 41. Piranómetro de 180° Eppley (Cortesía de Lab.Eppley)

Para la cubierta, se utiliza vidrio tipo "Soda Glime" que posee una transmisividad mayor de 0.9 sobre el espectro solar. Este piranómetro ha sido reemplazado por otros instrumentos también fabricados por la Compañía Eppley, como son el piranóme-

tro Blanco y Negro, y el de Precisión Espectral. Existen otras compañías dedicadas también a la fabricación de piranómetros, - con el mismo principio pero diferentes diseños. Entre ellas se encuentra Moll-Gorczyński, con un diseño muy difundido en Europa; de origen ruso existe el Yanishevskiy.

Todos ellos utilizan termopilas, por lo que se necesita un potenciómetro para poder calibrarlos.

Existen otros tipos de piranómetros, con detectores - fotovoltaicos, que han sido poco difundidos, o no tienen gran -- aceptación por el margen de error que puedan tener, así como sus altos costos que no resultan económicos en comparación con otro tipo de piranómetros no tan sofisticados y que dan excelentes re sultados.

- Heliógrafo o Heliotermómetro

Es un aparato que deja registrado en un gráfico las - horas del sol, cuando la radiación alcanza su nivel crítico. El primer modelo fue diseñado por Saussure. Existe otro más moderno y bastante difundido, el Campbell-Stoke, aparte de algunos bastante sofisticados que funcionan por medio de fotoceldas y amplificadores electrónicos.

En ciertos heliógrafos, la luz solar pasa por una abertura estrecha y se impresiona en un papel fotográfico graduado en

horas y minutos, y se va enrollando sobre un tambor arrastrado por un mecanismo de relojería. En otros casos una esfera de vidrio proyecta la imagen reducida del sol sobre una tira de papel y éste es chamuscado a lo largo de una escala que indica las horas de insolación.

CAPITULO IV. CALCULO DE LA RADIACION SOLAR TERRESTRE

- IV.1. CALCULO DE LA INSOLACION TOTAL MENSUAL Y DIARIA EN PLANO HORIZONTAL
- IV.2. CALCULO DE LA RADIACION TOTAL PARA HORA DETERMINADA Y EN PLANO HORIZONTAL
- IV.3. CALCULO DE LA RADIACION TOTAL MENSUAL, DIARIA Y HORA DETERMINADA EN SUPERFICIE HORIZONTAL
- IV.4. CALCULO DE LA RADIACION DIRECTA PARA UNA SUPERFICIE HORIZONTAL PARA HORA DETERMINADA O PERIODO MENSUAL
- IV.5. CALCULO DE LA RADIACION DIFUSA PARA UN SUPERFICIE HORIZONTAL, CON HORA DETERMINADA O PERIODO MENSUAL
- IV.6. INFLUENCIA DE LA ORIENTACION DE LA SUPERFICIE EN LA INSOLACION PARA PERIODOS LARGOS

IV. CALCULO DE LA RADIACION SOLAR TERRESTRE

Cuando se llevan a cabo estudios climatológicos de radiación solar, es muy frecuente encontrarse con zonas para las cuales no existe información de la energía aportada por el sol, en gran parte debido a la inexistencia de una red solarimétrica, por lo que esta información tiene que ser evaluada indirectamente, con modelos matemáticos que simulen la atenuación que sufre la radiación solar extraterrestre en su paso a través de la atmósfera, o bien con modelos puramente empíricos que requieren para su aplicación de diversos parámetros meteorológicos.

Mientras que han sido desarrollados varios métodos para estimar la radiación solar, no todos tienen validez en diferentes zonas con características particulares. En México se cuenta con poca información de mediciones solarimétricas. Ante esta situación, un método con posibilidades de ser aplicado en México es el propuesto por Angström y que ha sido utilizado con resultados satisfactorios en una gran diversidad de climas.

IV.1. CALCULO DE LA INSOLACION TOTAL MENSUAL Y DIARIA EN PLANO HORIZONTAL

La expresión que a continuación se formula es una variación de la fórmula empírica de Angström, propuesta por Prescott disminuyendo así la incertidumbre y dificultad de su evaluación; propo

ne que la relación quede en función de la irradiación extraterrestre (H_0), como se muestra:

$$H = H_0 (a + bXn/N) \text{ ----- (4.1.1.)}$$

donde:

H = es la irradiación total

a = constante teórica relacionada con los niveles de radiación difusa

b = constante teórica relacionada con la atenuación de la radiación directa

N = horas teóricas de sol

n = horas reales de sol

Para encontrar un sentido físico a los coeficientes se puede mostrar que si:

$$n/N = 1$$

muestra una atmósfera sin nubes, y nuestra ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{H}{H_0} = a + b$$

representando el coeficiente de transmisión de una atmósfera sin nubes. En el caso contrario, un cielo completamente nublado mostraría:

$$n/N = 0$$

y por lo tanto:

$$\frac{H}{H_0} = a$$

indicando la transmitancia a través de la atmósfera y de las nubes.

Enfocando nuestro problema a la Ciudad de Cuernavaca, - los valores obtenidos para las constantes son los que se muestran a continuación:

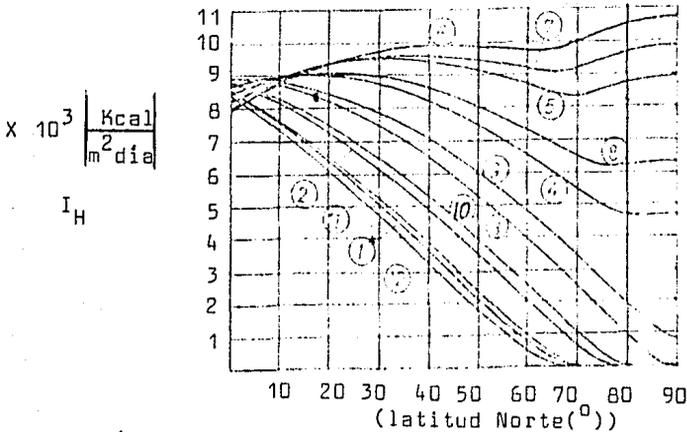
Tabla de Constantes para la Ciudad de Cuernavaca

Mes	Relación
	n/N
Enero	0.589
Febrero	0.666
Marzo	0.687
Abril	0.689
Mayo	0.738
Junio	0.725
Julio	0.724
Agosto	0.719
Septiembre	0.718
Octubre	0.716
Noviembre	0.686
Diciembre	0.586

Los valores H_0 , para Cuernavaca son aproximadamente los siguientes, para $G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$ (constante de la irradiación

extraterrestre).

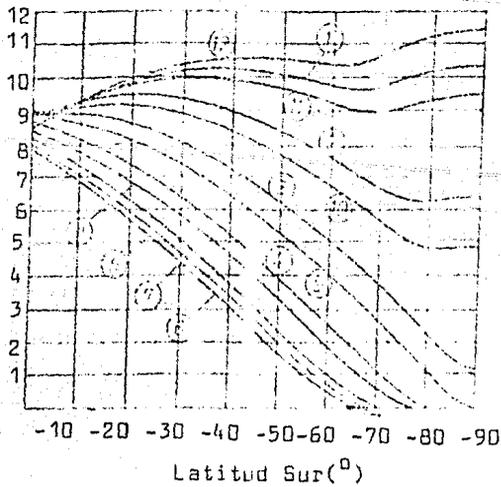
Mes	H_0 (MJ/m ²)	H_0 (10 ³ Kcal)
Enero	26.7	63.78
Febrero	30.2	72.14
Marzo	34.4	82.18
Abril	27.5	89.58
Mayo	38.9	92.93
Junio	39.1	93.40
Julio	38.9	92.93
Agosto	37.8	90.30
Septiembre	35.3	84.33
Octubre	31.3	74.77
Noviembre	27.4	65.45
Diciembre	25.5	60.91



* Los números del 1 al 12 enumeran los meses del año en forma ordenada

$$I_H \times 10^3 \left\{ \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2 \text{ día}} \right\}$$

I_H



Figuras Núms. 42a y 42b. Radiación solar en superficie horizontal fuera de la atmósfera terrestre 1 h, según Latitud y mes del año.

Para mayor exactitud, H_0 se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 \times G_{s0}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360 n}{365}\right) \right] \times \left[\cos \delta \cos \lambda \sin H_s + \frac{2 \pi \times H_s}{360} \sin \delta \sin \lambda \right] \quad (4.1.2)$$

así como también de las Figuras Núms. 42 a y b.

Para comprender mejor estas fórmulas, se expondrá un ejemplo a continuación.

Determinar la insolación total horizontal terrestre para: A) el mes de marzo B) el 16 de marzo, en la Ciudad de Cuerna-

vaca, Mar.

Resolviendo la segunda parte, primero tenemos que:

$$\delta = -2.4^\circ$$

$$\theta = 19^\circ$$

$$H_s = \text{Arcos}(-\text{Tg}\theta\text{Tg}\delta) = 89.17^\circ$$

$$G_{sc} = 1353 \text{ W/m}^2$$

$$B) H_o = 27501.974 \times G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360 \times 75}{365}\right) \right] \times$$

$$\left[(\cos 19 \cos -2.4 \sin 89.173) + \left(\frac{\pi}{360} \frac{89.173}{360}\right) \sin 19 \sin -2.4 \right]$$

$$H_o = 27501.974 G_{sc} (1.0091112) \times 0.94459 + (-0.0211848)$$

$$H_o = 27501.97 G_{sc} (0.93178454)$$

$$H_o = 25625.914 G_{sc}$$

$$H_o = 34681862 \text{ J/m}^2 = 34.671862 \text{ MJ/m}^2$$

Como se puede apreciar, para el 16 de marzo, tenemos en las tablas un valor muy parecido al obtenido con la ecuación anterior.

$$B) H_o = 34.4 \text{ MJ/m}^2 \text{ (tablas)} \quad 34.67 \text{ MJ/m}^2 \text{ (ecuación)}$$

A) Ahora bien, utilizando la fórmula 4.1.4 tenemos:

$$a = 0.28$$

$$b = 0.476$$

$$n/N (\text{marzo}) = 0.687$$

$$H_{16 \text{ marzo}} = H_0 \left(a + b \frac{n}{N} \right)$$

$$\begin{aligned} H_{16 \text{ Marzo}} &= 34.67 (0.28 + 0.476 (0.687)) \\ &= 21.0451 \text{ MJ/m}^2 \end{aligned}$$

IV.2. CALCULO DE LA RADIACION TOTAL PARA HORA DETERMINADA Y EN PLANO HORIZONTAL

Para conocer la insolación a una hora determinada, es necesario basarse en valores medidos directamente o calculados de la insolación total promedio diaria, en el plano horizontal. Se utilizará la gráfica de la Figura No. 43, donde por un lado, se tiene la hora en la cual se quiere conocer la insolación; por la parte inferior se tiene la duración del día, y del lado izquierdo la insolación total terrestre para una hora determinada. Para ilustrarlo recurriremos al siguiente ejemplo: Determinar la radiación total a las 11:30 a.m. del 16 de marzo:

$$\text{Tenemos } \phi = -2.4^\circ$$

$$\delta = 19^\circ$$

$$\text{horas de duración de día} = 11.889 \text{ hrs.}$$

por lo que la Figura No. 43 es:

$$\frac{H_{hr}}{H_{\text{día}}} = 0.142 \text{ para radiación total}$$

Del ejemplo anterior, tenemos:

$$H_{\text{diario}} = 21.0451 \text{ MJ/m}^2 \text{ para el 16 de marzo}$$

$H \text{ hora} = 21.0451 \times 0.141 = 2.9884 \text{ MJ/m}^2$ a las 11:30
a.m., el 21 de marzo.

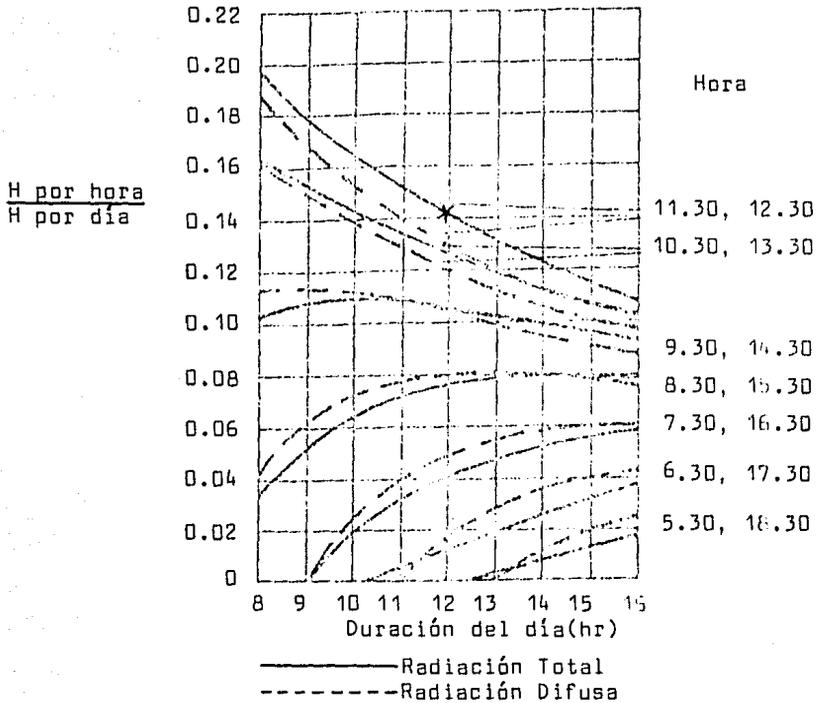


Figura No. 43. Relación de 1 h, T por hora a 1 h, T por día, para diferentes horas del día y período del año.

Los valores hasta aquí obtenidos, así como la radiación total directa, también los podemos obtener de los mapas de insolación que aparecen en las Figuras Núms. 34 y 35. A continuación se calcularán la radiación total, directa y difusa, que incide sobre

la superficie terrestre, para que después se relacione con el área de colector que sea más eficiente en la parte final de esta investigación.

IV.3. CALCULO DE LA RADIACION TOTAL MENSUAL, DIARIA Y HORA DETERMINADA EN SUPERFICIE HORIZONTAL

Como el propósito de esta investigación es la obtención de ciertos valores -que en este punto y los dos siguientes es la radiación total, directa y difusa- por medio de un modelo sencillo, que además describa fielmente la naturaleza del fenómeno físico en estudio, se propone el siguiente que cumple con estos requisitos.

La distribución instantánea de la radiación solar global, se puede obtener de la siguiente expresión:

$$\bar{G} = G_M \cos^{\alpha} \left(\frac{180 \varnothing}{N} \right) \text{-----} \quad (4.3.1)$$

donde:

G_M = radiación total máxima recibida en promedio mensual
se obtiene de las Figuras Núms. 34 A al 34 L.

α = exponente determinado empíricamente; con

$\alpha = 1.2$; se tiene la suficiente precisión para cálculos de ingeniería ambiental y térmica.

\varnothing = hora solar verdadera del día medida a partir del mediodía; (+) en la mañana y (-) en la tarde.

N = duración del día solar

Si se integra la ecuación entre las horas del alba y - del ocaso, el resultado es igual a la irradiación global diaria en promedio mensual por la longitud promedio de un día determinado -- del mes.

Para realizar el promedio mensual de radiación solar, - se tiene que hacer un cálculo diario; Klein* determinó el número - "n" del día en el año que mejor representa el día medio de cada mes. A continuación aparece la tabla correspondiente:

Mes	Día promedio del mes	Día del año correspondiente (n)
Enero	17	17
Febrero	16	47
Marzo	16	75
Abril	15	105
Mayo	15	135
Junio	11	162
Julio	17	198
Agosto	16	228
Septiembre	15	258
Octubre	15	288

* "Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces, Solar Energy". Pag. 325 - 329. Klein, 1977.

Noviembre	14	318
Diciembre	10	344

Ejemplo:

Calcular la radiación total mensual (G) el 16 de marzo, a las 12 a.m., en la Ciudad de Cuernavaca, Mor.

De la fórmula 4.3.1.

$$\bar{G} = G_M \cos \left(\frac{180 \theta}{N} \right)$$

G_M se obtiene de la Figura No. 34 D

$$G_M = 750 \text{ W/m}^2$$

$\theta = 12$ - hora solar verdadera

La hora solar verdadera se obtiene de la fórmula 2.6.1

$$\theta = 0.77$$

$$N = \frac{2}{15} H_s$$

H_s se obtiene de la fórmula 4.4.1.2.

$$H_s = 89.173$$

$$N = \frac{2}{15} (89.173)$$

$$N = 11.889$$

$$\theta = 1.2$$

$$G = 750 \cos^{1.2} \frac{180 \times 0.77}{11.889}$$

$$G = 731.473 \text{ W/m}^2$$

En las Figuras Núms. 35A al 35 L se obtiene la radiación total mensual.

Para la radiación total diaria se hace una suma de las radiaciones totales por hora durante el día y se dividen entre las horas del día.

IV.4. CALCULO DE LA RADIACION DIRECTA PARA UNA SUPERFICIE HORIZONTAL PARA HORA DETERMINADA O PERIODO MENSUAL.

Similarmente, para encontrar la radiación directa tenemos:

$$G_b = G_{bm} \cos^{\alpha} \left(\frac{180}{N} \theta \right) \text{-----} \quad (4.4.1)$$

donde:

G_b = Radiación directa (W/m^2 hr.)

G_{bM} = Promedio mensual de radiación máxima directa (W/m^2)

α = Exponente determinado empíricamente

En este caso, $\alpha = 1.5$

Para ilustrarlo, se presenta el siguiente ejemplo:

Calcular la radiación directa a las 11 a.m. del 16 de marzo.

De la Figura No. 35C.

$$G_{bM} = 550 \text{ W/m}^2$$

$$\alpha = 1.5$$

$$g = 0.77$$

$$N = 11.889$$

De la fórmula 4.4.1

$$G_b = 550 \cos^{1.5} \left(\frac{180 \times 0.77}{11.889} \right)$$

$$G_b = 533.069 \text{ W/m}^2$$

Para período mensual, se puede encontrar en las Figuras Núms. 35A al 35L.

IV.5. CALCULO DE LA RADIACION DIFUSA PARA UNA SUPERFICIE HORIZON- TAL CON HORA DETERMINADA O PERIODO MENSUAL

En este caso, podemos obtener la radiación difusa de la relación:

$$G = G_b + G_d$$

$$G_d = G - G_b \quad \text{-----} \quad (4.5.1)$$

ya que la suma de la radiación directa, más la radiación difusa nos da como resultado la radiación total.

De los ejemplos anteriores tenemos

$$G_b = 533.069 \text{ W/m}^2$$

$$G = 731.473 \text{ W/m}^2$$

por lo que a las 12 A.M. del 16 de marzo, en la Ciudad de Cuernava

ca, tenemos que la radiación difusa es:

$$G_d = -731.473 + 553.069$$

$$G_d = 178.404 \text{ W/m}^2$$

IV.6. INFLUENCIA DE LA ORIENTACION DE LA SUPERFICIE EN LA INSOLACION PARA PERIODOS LARGOS

Se ha estudiado la influencia de la orientación de la superficie en la radiación directa únicamente, por lo que la situación para insolación total puede diferir. Sin embargo existe poca información al respecto, siendo aún menos confiable. Con esta limitación, y para periodos largos donde no existen variaciones climáticas muy fuertes, se podrá deducir de la Figura No. 47, lo siguiente:

- a) Para superficies inclinadas exactamente al ecuador, el mejor rendimiento anual se obtiene con $\beta = 0.90$
- b) Para mejor aprovechamiento en verano $\beta = 0 - 10'$
- c) Para mejor aprovechamiento en invierno $\beta = 0 + 10'$
- d) Pequeñas variaciones de inclinación β de la inclinación óptima tienen escasa influencia en la insolación anual.

Para superficies inclinadas con $\beta = 0.90$ y con Az_{sup} anotadas, de la Figura No. 48 se desprende que:

- a) El mejor rendimiento se obtiene con superficie inclinada exacta

mente al ecuador ($Az_{sup} = 180^\circ$)

b) Desviaciones de pocos grados con respecto a $Az_{sup} = 180^\circ$ tienen poca influencia.

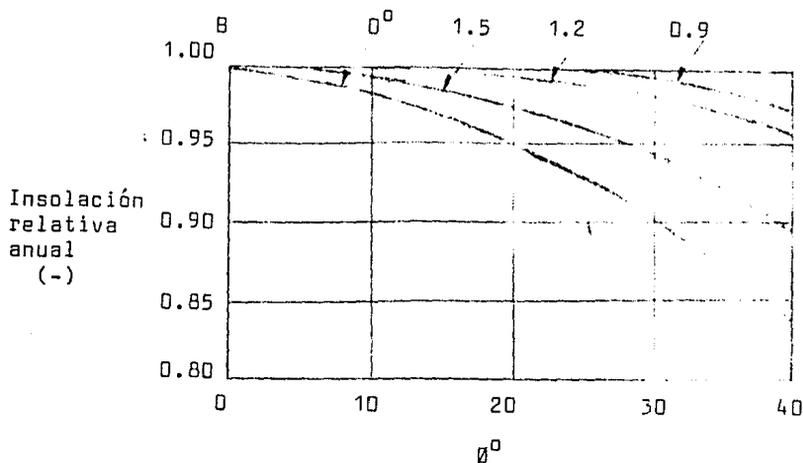


Figura No. 47. Insolatione relativa anual sobre superficies inclinadas y anotado y azimut = 0° , para diferentes latitudes L .

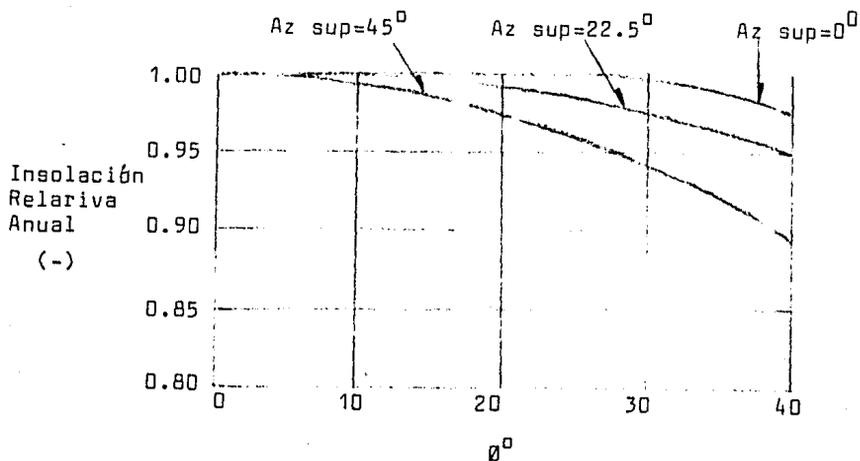


Figura No. 48. Insolatione relativa anual sobre superficies inclinadas en $\theta = 0.9L$ y azimut anotado Az_{sup} , para diferentes latitudes L .

La radiación total incidente en una superficie plana inclinada viene dada por la ecuación:

$$H_t = G_b R_b + G_d R_d + \bar{G} R_r$$

donde:

H_t = radiación total por unidad de área

R_d = razón de la radiación difusa en una superficie inclinada con la de una superficie horizontal.

R_b = razón de la radiación directa en una superficie inclinada con la de una superficie horizontal.

R_r = razón de la radiación reflejada en una superficie inclinada con la radiación total en una superficie horizontal.

Para obtener R_r tenemos:

$$R_r = \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

donde:

ρ = Reflectancia del terreno (Generalmente $\rho = 0.6$)

β = Inclinación de la superficie.

La inclinación de la superficie se puede tomar como la misma a la latitud en la que se encuentra localizada la ciudad donde será colocado el colector solar.

Para Cuernavaca:

$$\text{si } \varnothing = 19^{\circ}$$

$$\therefore \beta = 19^{\circ}$$

Si se busca más exactitud, se toman en cuenta las varia
ciones que aparecen en la página No. 122

Para obtener R_d tenemos:

$$R_d = \frac{(1 + \text{Cos } \beta)}{2}$$

El ángulo óptimo de orientación con respecto al lugar
de la superficie que recibe la insolación es de 0° . Esto quiere de
cir que se orienta de Norte a Sur.

En el hemisferio norte, la relación de R_b queda así:

$$R_b = \frac{\text{Cos } (\varnothing - \beta) \times \text{Cos } \delta \text{ Cos } W + \text{Sin } (\varnothing - \beta) \text{ Sin } \delta}{\text{Cos } \varnothing \text{ Cos } \delta \text{ Cos } W + \text{Sin } \varnothing \text{ Sin } \delta}$$

donde:

\varnothing = latitud del lugar

δ = declinación solar

W = ángulo solar horario.

CAPITULO V. SISTEMAS Y COLECTORES PLANOS PARA CALENTAMIENTO DE

AGUA

- V.1. CLASES DE COLECTORES
- V.2. SISTEMAS TIPICOS
 - POR CONVECCION NATURAL
 - POR CIRCULACION FORZADA
- V.3. CONTROLES EN SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA
- V.4. DISEÑO GENERAL DE LOS COLECTORES PLANOS
- V.5. DISTRIBUCION DE PRESION Y TEMPERATURA EN COLECTORES Y ESTANQUES
- V.6. CRITERIOS DE DISEÑO DE SISTEMAS

V.1. CLASES DE COLECTORES

Existe un amplio rango de colectores que pueden ser usados para capturar la radiación solar y convertirla en energía térmica. La selección del colector depende fundamentalmente de la temperatura deseada y del costo de los componentes. Los colectores más comunes están enumerados en orden de las temperaturas que alcanzan:

- a) Estanques poco profundos y estructuras translúcidas
- b) Colectores planos
- c) Colectores de vidrio tubulares
- d) Colectores de enfocamiento distribuido

y como una opción futura

- e) Sistemas de recepción central

cada uno de los cuales será descrito en forma muy general, y para la investigación presente se ampliará sobre el tema de los colectores planos.

- a) Estanques poco profundos y estructuras translúcidas.

Son sistemas de bajo costo y capaces de generar temperaturas de fluido abajo de los 150°F (65°C).

Los estanques poco profundos son un tipo de colectores planos horizontales donde los costos son minimizados cons--

truyendo módulos de grandes áreas y utilizando materiales 'Polymeric' para reemplazar el metal y el vidrio usado en los colectores planos convencionales. El plato absorbente de un estanque de baja profundidad es una capa de agua generalmente de 2 a 4 - pulgadas, de profundidad, estática o en movimiento, contenida en una bolsa de plástico con fondo negro y la superficie clara. La superficie, lustrosa, es un plástico claro corrugado, semirígido, arqueado sobre la bolsa de agua. Una plancha de material de insulación caliente debajo de la bolsa de agua reduce las pérdidas de calor con el suelo y protege la bolsa de los insectos y 'Prodent'.

Las estructuras translúcidas, como los invernaderos, - tienen la ventaja de poder utilizar y combinar la radiación directa y difusa. Las estructuras están hechas de vidrio o plástico para capturar la energía, y en forma pasiva calientan o secan los - productos que se encuentran en el interior; el calor no utilizado inmediatamente, es transferido a un sistema de almacenamiento normalmente con ayuda de la circulación del aire del interior.

b) Colectores planos.

Es uno de los tipos más usados de colectores. Consisten en una lámina metálica de absorción (acero, aluminio o cobre), con tubería unida o como parte integral de la lámina. Por detrás tiene un material aislante para evitar las pérdidas de calor. La lámina de absorción y el material aislante por lo general están -

cubiertos por una o dos hojas de material translúcido, en la mayoría de los casos vidrio, aunque se puede llegar a usar plástico. Estos se encuentran sellados herméticamente.

Los colectores se pueden encontrar montados en el piso o en los techos, volteando hacia el sur en el caso de que se encuentren en el hemisferio norte, y con una inclinación de alrededor de 10' de la latitud donde se encuentran localizados. - La radiación solar incidente (directa o difusa), entra al colector a través de la cubierta transparente y llega a la placa de absorción, que por lo general está pintada de negro o tiene algún tipo de superficie selectiva para incrementar la absorción de las ondas cortas de la radiación solar. Así también, las superficies selectivas reducirán en forma significativa las emisiones de la placa de absorción de la radiación térmica de las ondas largas, permitiendo así retener más calor en la placa y alcanzar temperaturas más altas. Las cubiertas del colector tienen dos propósitos: el primero es crear un área de aire muerto entre la placa de absorción y la cubierta, reduciendo las pérdidas por convección. La segunda es permitir el paso de las ondas cortas de la luz solar y llegar a la superficie de absorción; al mismo tiempo no permite que las ondas largas de la radiación emitida salgan del colector.

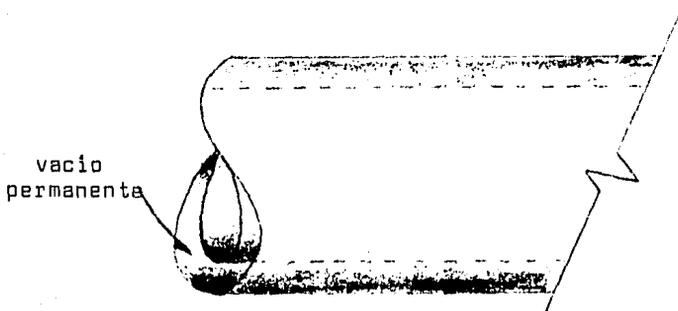
Las temperaturas máximas que se han alcanzado con este tipo de colectores fluctúan alrededor de 200°F (93°C), pero se -

pueden obtener temperaturas poco menores con sistemas mucho más económicos.

c) Colectores de Vidrio Tubulares

Este tipo de colectores tiene por lo general una configuración tubular para reducir las pérdidas debidas a la conducción y convección. Tienen eficiencias más altas que los colectores planos (temperaturas arriba de 200°F). En estos colectores se emplea la misma tecnología que en los bulbos tubulares de luz fluorescente.

En general estos colectores constan de dos tubos coaxiales (con el mismo eje central), entre los cuales existe un vacío permanente para reducir las pérdidas por conducción y convección.



Una cubierta selectiva es aplicada en la parte exterior del tubo interior para reducir las pérdidas por radiación. El flujo en operación entra y sale del tubo interior por la misma terminal, usando un flujo inverso ayudado por un tubo de alimentación que es coaxial a los otros dos tubos. El fluido es llevado a tra--

vés de una serie de estos tubos con un mecanismo múltiple formando un arreglo completo de los colectores.

Estos sistemas pueden utilizar líquido o aire como fluidos operantes y pueden trabajar con temperaturas de alrededor de -300°F (149°C). El espaciamiento de los tubos y la orientación, así como el nivel de evacuación y el grosor de las paredes de la tubería, son importantes en el funcionamiento de estos colectores. Así también, una superficie de reflexión difusa usada como una placa posterior, incrementa la radiación interceptada por el tubo absorbente.

En suma, estos colectores, por su configuración básica, tienden a mantener una eficiencia más estable a través del día, ya que son capaces de captar casi toda la radiación en las mañanas y en las tardes, así como en el período del medio día (el medio día alcanza su punto máximo, y el calor concentrado lo mantiene con la radiación absorbida durante la tarde, manteniendo la temperatura casi constante).

Será de gran ayuda la producción en masa de estos colectores, ya que se podrá reducir su precio y llegará a ser competitivo en el mercado de los colectores solares.

d) Colectores de Enfocamiento Distribuido

Estos aparatos enfocan la radiación solar sobre un punto o eje focal, que en cualquiera de los dos casos, representa un

área relativa muy pequeña con respecto al área reflejante. Esta -- concentración de la radiación en un área pequeña permite temperatu ras significativamente más altas de las que serían generadas con - un sistema sin enfocamiento.

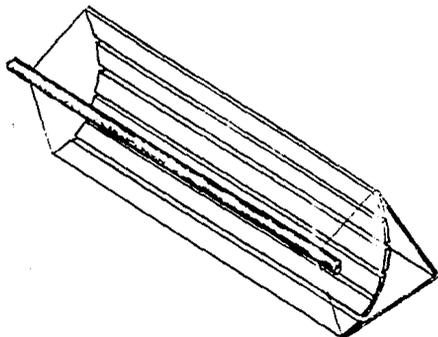
Los colectores de enfocamiento son aceptados por lo ge- neral en lugares con atmósfera muy limpia (libre de contaminación) y despejada, ya que solo puede utilizar la radiación directa.

Las unidades de enfocamiento emplean alguna de las con- figuraciones básicas existentes: el canal parabólico cilíndrico o el plato circular. La unidad cilíndrica emplea una forma de parábola reflejando la superficie, que por lo general es un metal pulido como el aluminio, que enfoca la radiación solar directa sobre un - tubo de absorción localizado en el foco de la parábola, y que con- tiene el líquido en operación. Los tubos absorbentes deben estar - interconectados con un arreglo lineal de canales colectores.

Los colectores circulares enfocan la radiación directa sobre la zona absorbente localizada en el punto focal del plato pa- rabólico. La zona absorbente de cada plato debe estar interconecta- da con la ayuda de una tubería aislada, a través de la cual, el - fluido en operación es bombeado.

También se pueden utilizar pequeños espejos planos, que se vayan moviendo en forma coordinada para colocarlos con los ángu- los necesarios para poder enfocar la radiación solar. En los colec-

tores cilíndricos se pueden utilizar espejos largos que se puedan mover desde los extremos para enfocarlos hacia la zona absorbente.



Así también, se han diseñado colectores parabólicos que no siguen la trayectoria del sol y que podrán ser adaptados en los techos, para dar servicio doméstico e industrial.

e) Sistemas de Recepción Central

Estos sistemas enfocan una amplia cantidad de radiación que llega a un receptor elevado sencillo. Este sistema representa a la larga, una opción para aplicaciones de procesos industriales donde se podrán generar temperaturas de arriba de 537°C . Aún así, este sistema necesita de un amplio desarrollo tecnológico para poder ser utilizado en la industria.

V.2. SISTEMAS TIPICOS

- Por Convección Natural

En estos sistemas, el estanque puede o no incluir un sistema auxiliar que permita calentar el agua cuando las condiciones climáticas sean desfavorables y sea necesaria mayor energía que la entregada por el sistema solar, o la demanda de agua caliente sea mayor que la prevista. En la Figura No. 52, se representa un esquema con un sistema típico completo.

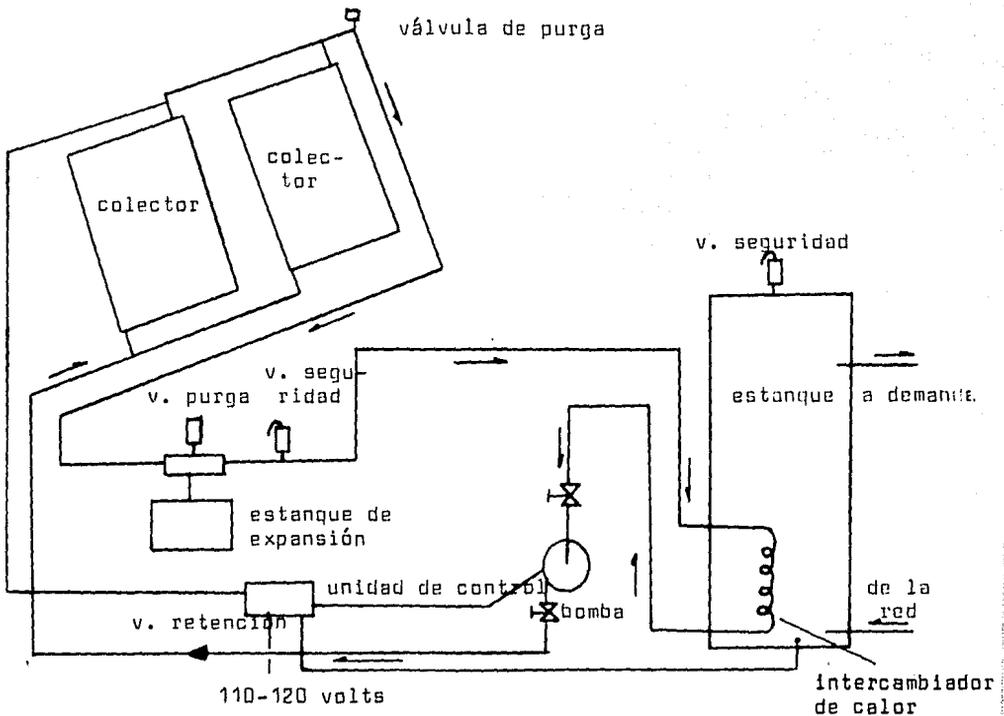


Figura No. 52. Esquema típico completo de un sistema de calentamiento de agua.

El principio de funcionamiento se basa en el movimiento del fluido del colector al estanque por la parte superior, y del estanque al colector por la parte inferior; este movimiento es causado por convección natural.

El estanque debe estar a una distancia mínima de 35 cm. y la tubería que comunica al colector con el estanque, debe tener un diámetro mínimo de 14 mm.

Las ventajas residen en el bajo costo de inversión, y los inconvenientes son el bajo rendimiento, y además, la base del estanque debe estar por lo menos a 35 cm. sobre la parte superior del colector.

En estas condiciones y en un día despejado, se alcanza un caudal a través del colector de unos $40 \text{ lt/m}^2\text{hr}$. Observar la Figura No. 49, que representa este sistema.

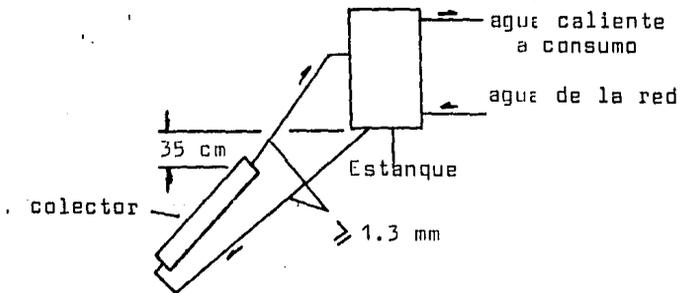


Figura No. 49. Esquema de un sistema típico de calentamiento de agua, en el cual el flujo se produce por efecto de convección natural o termostato.

- Por Circulación Forzada

El agua es impulsada por una bomba del colector al estanque y cuando las condiciones climatológicas así lo aconsejan -- (Figura No. 50).

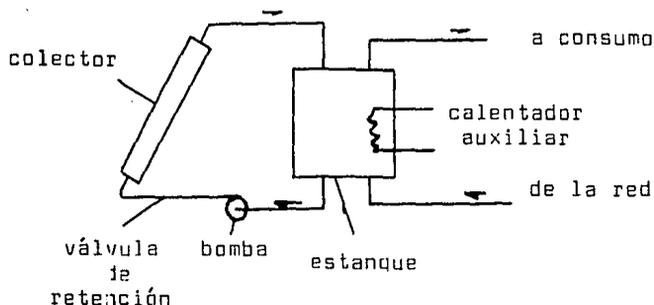


Figura No. 50. Esquema de un sistema típico de calentamiento de -- agua de circulación forzada.

En la Figura No. 51, se representa un sistema similar, incluyendo un intercambiador de calor. Este componente es necesario si hay peligro de congelamiento, y debe utilizarse otro fluido o -- agua con alcohol como sustancias a través de los colectores.

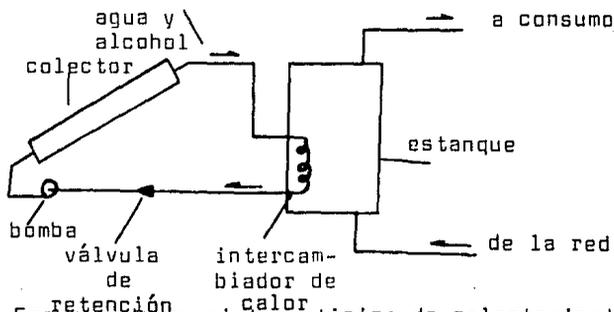


Figura No. 51. Esquema de un sistema típico de calentamiento de -- agua de circulación forzada y con intercambiador de calor.

En estos sistemas, el estanque puede o no incluir un sistema auxiliar que permita calentar el agua cuando las condiciones climáticas sean desfavorables y sea necesaria mayor energía que la entregada por el sistema solar, o la demanda de agua caliente sea mayor que la prevista. En la Figura No. 52, se representa un esquema con un sistema típico completo.

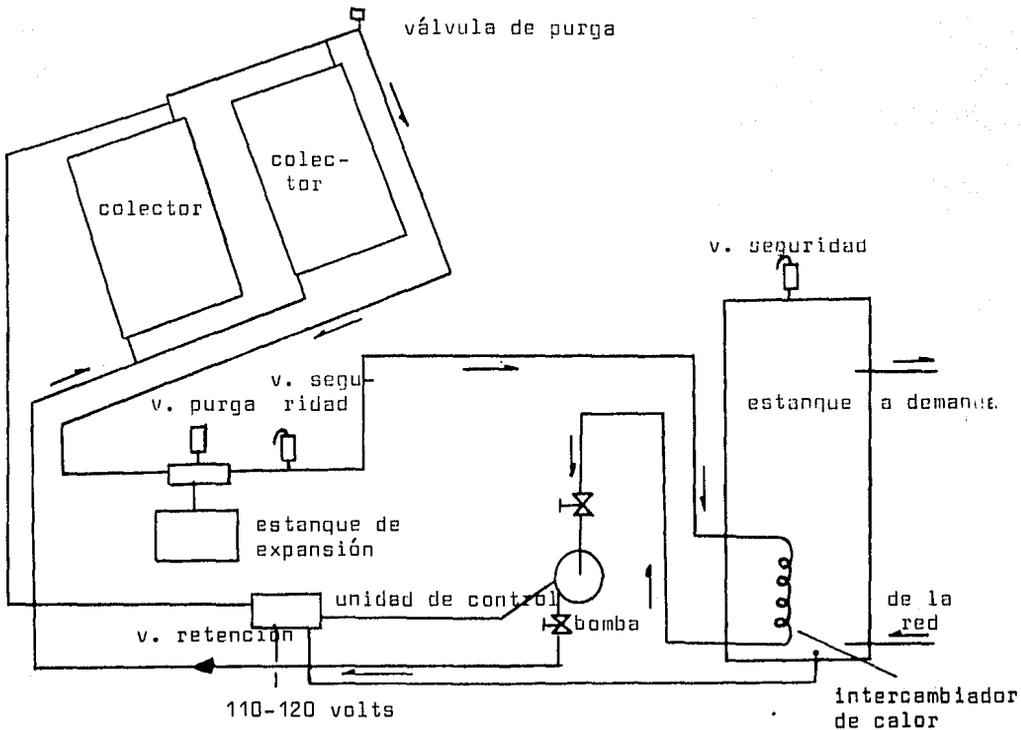


Figura No. 52. Esquema típico completo de un sistema de calentamiento de agua.

V.3. CONTROLES EN SISTEMA DE CALENTAMIENTO DE AGUA

Son sistemas convencionales como los usados en las diferentes ramas de la industria, por lo que son simples y actualmente muchos poseen componentes electrónicos, como se muestra en la Figura No. 53.

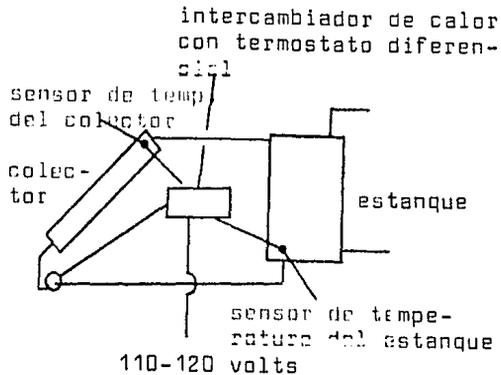


Figura No. 53. Sistema de control en instalación de calentamiento de agua.

En la Figura No. 52, la unidad de control recibe la señal de temperatura por medio de diferentes termostatos. Si la temperatura a la salida del colector es ligeramente mayor a la temperatura más fría del estanque, que se encuentra en la parte inferior, entonces es conveniente que el sistema funcione, es decir, el motor arranca haciendo actuar a la bomba.

Si la temperatura del colector llega a un valor igual o

menor a la del estanque, el sistema se detendrá, por lo que la unidad de control envía la señal correspondiente para detener la bomba y evitar enfriar el agua del estanque. Así, el sistema se pondrá en marcha en la mañana o cuando las condiciones de radiación solar sean las adecuadas y se detendrá en la tarde o cuando la radiación sea muy escasa y el colector no alcance una temperatura favorable.

Anotando esto en forma de tabla con valores típicos tenemos:

T_C : Temperatura del agua del colector en la parte superior

T_E : Temperatura del agua del estanque en la parte inferior

Si $T_C > T_E + 5^{\circ}\text{C}$ la bomba funciona

Si $T_C \geq T_E + 1^{\circ}\text{C}$ la bomba no funciona.

V.4. DISEÑO GENERAL DE LOS COLECTORES PLANOS

Como se muestra en la Figura No. 54, la radiación solar atraviesa la cubierta del colector y calienta la superficie de absorción. Esta, a su vez, entrega calor al fluido que se aprovecha a través de un intercambiador de calor o va directamente al estanque. Como la superficie de absorción emite su radiación en el rango infrarrojo, y a su vez el vidrio es opaco en ese rango, hay muy pocas pérdidas por la transmisividad del vidrio. Las pérdidas del colector serán principalmente por convección del aire que fluye

ye sobre la superficie del colector.

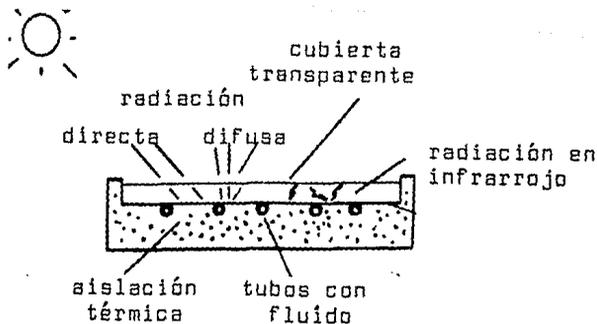


Figura No. 54. Principio de funcionamiento de un colector.

El aislamiento térmico, en contacto con la superficie de absorción debe resistir poco más de 100°C por lo que generalmente se usa lana de vidrio o poliuretano. El resto del aislamiento térmico es poliestireno, que es de menor costo; ambos materiales tienen una conductancia de alrededor de:

$$0.25 \text{ BTU/hr ft}^{2}\text{ }^{\circ}\text{F} = 0.4327 \text{ W/m}^{2}\text{ }^{\circ}\text{K} \text{ por cada } 2.5 \text{ cms. de grosor}$$

Con respecto a las cubiertas utilizadas en los colectores, la más confiable sigue siendo el vidrio, ya que se ha trabajado con plásticos de diferentes cualidades, pero el tiempo influye negativamente en sus características de transmisividad, degradándolos.

Para analizar las superficies de absorción, veremos la Figura No. 55, donde se observa que la superficie más deseable es

el cobre con 1 mm. de grosor.

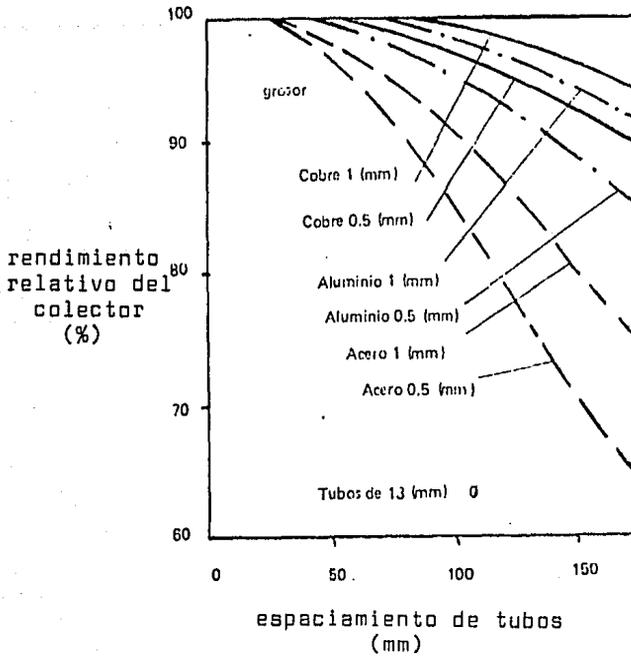


Figura No. 55. Influencia del material y del grosor de la superficie de absorción, como también del espaciamiento de tubos, en el calor entregado al fluido.

Con respecto a la distancia entre los tubos, se puede comprobar que una plancha más gruesa y con mayor espaciamiento de tubos obtiene el mismo rendimiento que una más delgada con separaciones menores. Aún así, una plancha gruesa o delgada, con menor espaciamiento entre los tubos, posee mayor rendimiento que con un espaciamiento mayor. (Esto se debe a que hay menor diferencia de temperatura cuando los tubos se encuentran más cerca, por la radiación que emiten). No se pueden encontrar demasiado juntos, por que

no se permite un calentamiento uniforme en los tubos (se debe encontrar la separación óptima).

La absorción de la superficie de absorción se ha mejorado con tratamientos superficiales y pinturas especiales, (llamadas superficies selectivas) para disminuir la emisividad de la superficie en infrarrojo.

En las Figuras Núms. 56 y 57, están representadas las posibilidades más comunes de construcción de tubos y superficies de absorción. Se muestra como el tubo puede estar soldado a la superficie de absorción, o como puede ser parte integral de ésta. Se muestra también una configuración típica y un colector de flujo --abierto y sin cubierta. Este último tiene algunos inconvenientes, como es la contaminación del agua (polvo, animales, ...) y que en algún momento se podría tapar la tubería del lugar a donde está --destinada el agua.

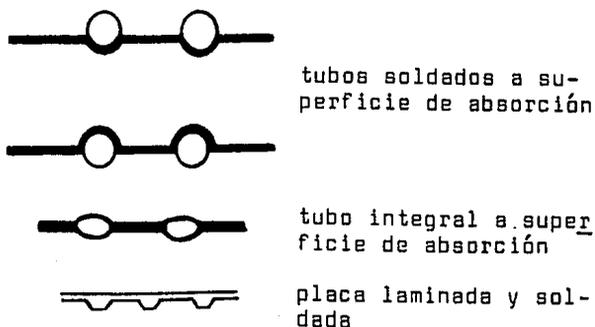


Figura No. 56. Posibilidades de conformación de tubos y superficie de absorción.

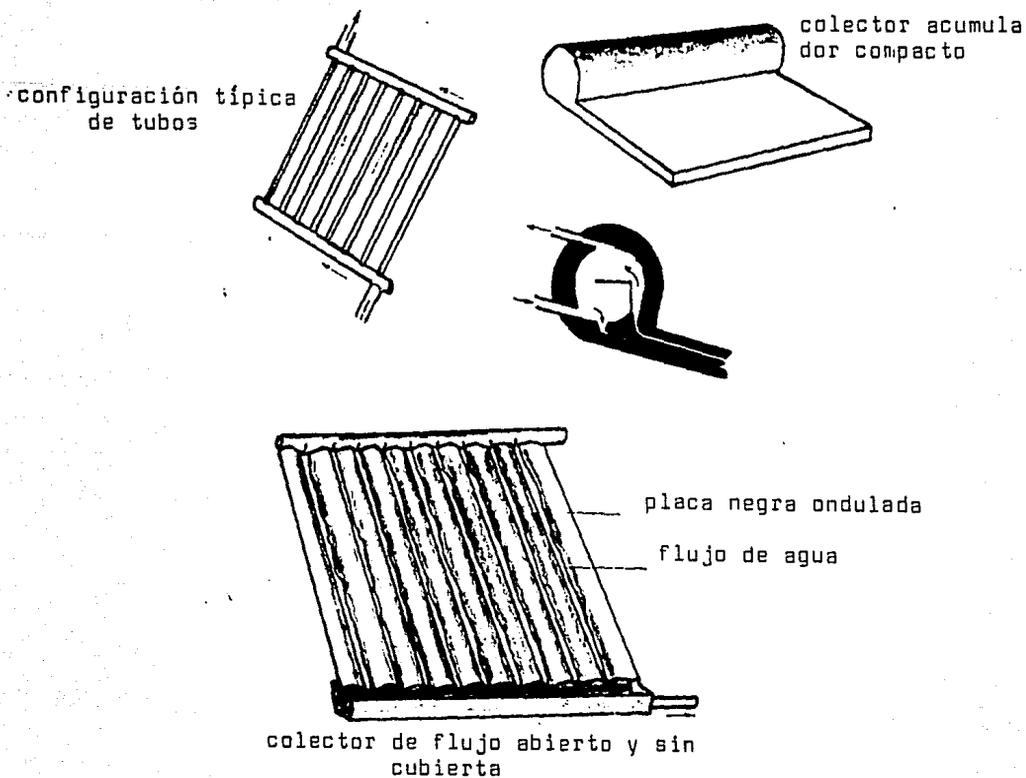


Figura No. 57. Diseños típicos de colectores

En la Figura No. 58, se representan los flujos de diversos colectores y en la Figura No. 59 las conexiones de estos. Las conexiones en serie significan altas caídas de presión, bajo caudal y altas temperaturas de salida de los últimos colectores. Los colectores conectados en paralelo implican mayor caudal de la bomba, menor caída de presión y una temperatura menor de descarga.

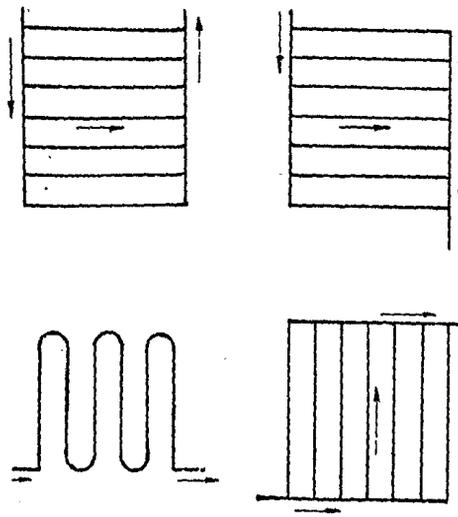


Figura No. 58. Distribución común de flujo a través de colectores

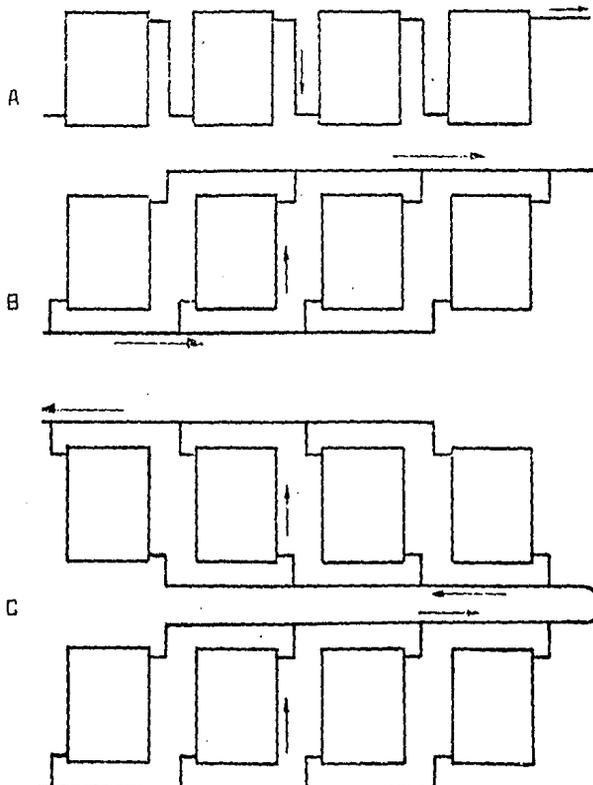


Figura No. 59. Conexiones de colectores: A serie, B paralelo, C serie-paralelo.

V.5. DISTRIBUCION DE PRESION Y TEMPERATURA EN COLECTORES Y ESTAN-

QUES

Analizando el flujo en el colector y representando la variación de presión a través del mismo, se deduce que habrá flujos mayores a través de los tubos exteriores. A su vez, si la diferencia de presión es demasiado baja entre los extremos del tubo central, se puede dar el caso de que este tubo carezca de flujo (Figura No. 60). Es por ello que los fabricantes de colectores (especialmente los que tienen tubos integrales en la placa de absorción), tienen los tubos centrales con mayor diámetro para obtener un flujo conveniente a través de ellos.

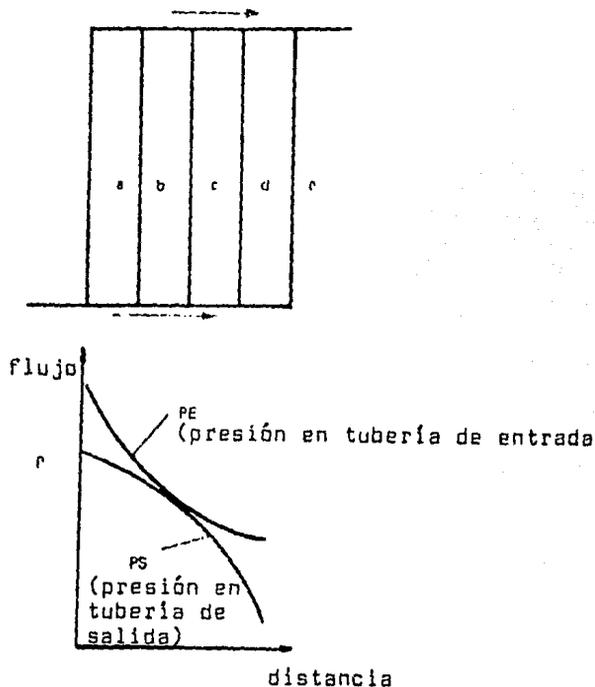


Figura No. 60. Variación de la presión en la tubería de entrada y salida del colector.

-Distribución de temperatura a través de la superficie de absorción del colector.- La temperatura más alta se encuentra equidistante entre los dos tubos, y a su vez será ligeramente menor en la periferia, según las pérdidas existentes por convección (Figura No. 61).

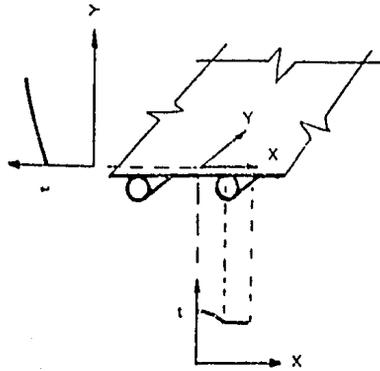


Figura No. 61. Distribución de la temperatura en la superficie de absorción del colector.

Se ha comprobado experimentalmente que la distribución de temperatura en un estanque permanece estatificada, si el agua del colector o intercambiador de calor llega por la parte superior y el agua que va al colector se descarga por la base.

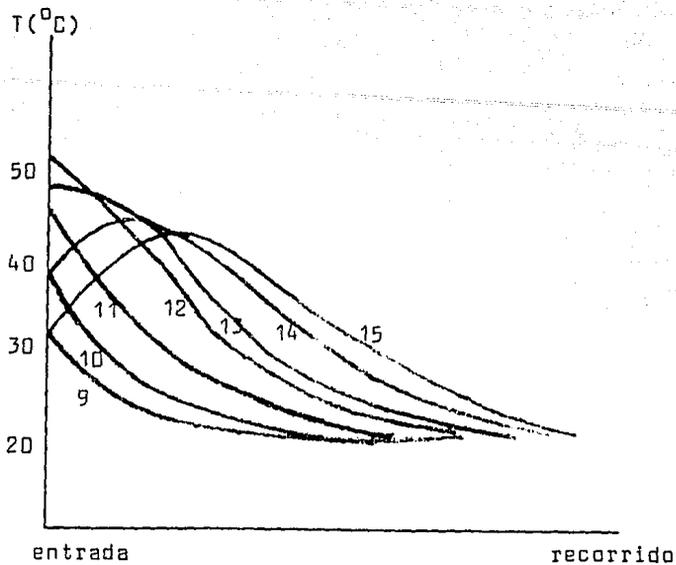


Figura No. 62. Distribución de temperatura del aire a través del acumulador, al acumular energía entre las 9 y las 15 hrs.

V.6. CRITERIOS DE DISEÑO DE SISTEMAS

- Caudal.- Analizando la ecuación 5.6.1., que se estudiará posteriormente ($\eta_i = F_R \tau \alpha_B - \frac{F_R U (T_{ef} - T_{ext})}{I_{ns}}$), nos muestra que un -

caudal alto a través del colector significa baja temperatura de --descarga y mayor rendimiento. Pero este último debe tener un límite práctico, porque altos caudales significan bombas mayores (costo-potencia). Para diseño, es bastante aceptable tomar un valor de 0.9 lt/min-m^2 ($0.022 \text{ gpm/ft}^2 \text{ col}$).

- Estanque.- Se acostumbra aislarlo con 15 o 20 cms. de poliestireno. Los materiales pueden ser acero inoxidable, material galvaniza

do, plásticos, concreto y asbesto-cemento. Se han intentado sales en fusión como dispositivo y como acumulador de energía, pero aún se encuentra en investigación.

Debe considerarse un soporte adecuado y acceso para mantenimiento.

Respecto al volúmen del estanque, no depende principalmente de la ubicación, demanda o insolación. Si el volúmen es reducido, la temperatura en el colector será alta; las pérdidas mayores y habrá poco tiempo de suministro. Si el volúmen es de gran tamaño, la temperatura del fluido en el colector será baja, las pérdidas menores, pero no se usará toda la capacidad y el costo de inversión será alto. Experimentalmente se ha demostrado que un volúmen óptimo para un estanque con agua es de 100 lt/m^2 colector.

Los criterios para seleccionar el área apropiada de un colector para una instalación se explican en el Capítulo VII.

CAPITULO VI. COMPORTAMIENTO DE LOS COLECTORES

- VI.1. RESUMEN DE LOS PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR
- VI.2. ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COLECTORES
- VI.3. COMPORTAMIENTO DE LOS COLECTORES
 - INFLUENCIA DE LA DISTANCIA ENTRE LA SUPERFICIE DE ABSORCION Y LA CUBIERTA
 - INFLUENCIA DEL NUMERO DE CUBIERTAS
 - INFLUENCIA DE LA EMISIVIDAD EN INFRARROJO
 - INFLUENCIA DE LA INSOLACION
 - INFLUENCIA DEL ANGULO DE INCIDENCIA
 - INFLUENCIA DE LA HORA DEL DIA
- VI.4. DETERMINACION EXPERIMENTAL DEL RENDIMIENTO DE LOS COLECTORES
- VI.5. DETERMINACION TEORICA DEL RENDIMIENTO DE LOS COLECTORES

VI.1. RESUMEN DE LOS PRINCIPIOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

En el presente capítulo, se expondrá una síntesis de las relaciones que rigen los fenómenos de la transferencia de calor.

La transmisión de calor puede realizarse por tres métodos distintos: conducción, radiación y convección.

Conducción.- Es el flujo de calor desde una zona de alta temperatura hacia otra de menor, por contacto físico directo. Si se designa:

Q_k = Flujo de calor por conducción (cal/seg)

k = Conductividad térmica (cal cm/seg $cm^2/^\circ C$)

Δ_T / Δ_X = Gradiente de temperatura a través del medio

A = Area perpendicular al flujo de calor (cm^2)

Entonces:

$$Q_k = kA \Delta_T \text{ ----- (6.1.1)}$$

y designando la resistencia térmica por conducción = R_k

$$R_k = \frac{\Delta_X}{kA} \text{ ----- (6.1.2)}$$

por lo que nos queda:

$$Q_k = \frac{T_1 - T_2}{R_k} \text{ ----- (6.1.3)}$$

Radiación.- Como vimos anteriormente, es una de las -- formas de transmisión de energía por medio de ondas electromagnéticas o fotones.

La cantidad de energía que un emisor ideal, o "cuerpo negro" emite, depende de su temperatura.

Designando:

T = Temperatura de la superficie en 'K

σ = Constante = 5.6699×10^{-8} ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$)

Q_r = Energía radiante emitida (W/m^2)

Tenemos:

$$Q_r \text{ negro} = \sigma T^4 \text{ ----- (6.1.4)}$$

Como un cuerpo real emite menor energía que uno ideal, se define la 'emisividad' " ϵ " como:

$$\epsilon = Q_r \text{ real} / Q_r \text{ negro} \text{ ----- (6.1.5)}$$

Por lo que:

$$Q_r \text{ real} = \epsilon \sigma T^4 \text{ ----- (6.1.6)}$$

Convección.- Es la transferencia de calor por el desplazamiento de un fluido.

Si designamos:

Q_c = Flujo de calor por convección (cal/seg)

A = Area de transferencia de calor (cm^2)

T_s = Temperatura de la superficie ($^{\circ}C$)

T_f = Temperatura del fluido ($^{\circ}C$)

h_c = Coeficiente de transferencia de calor por convección --
(cal/seg cm^2 $^{\circ}C$).

Tenemos:

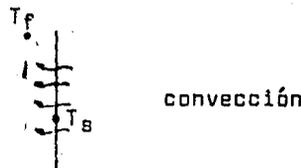
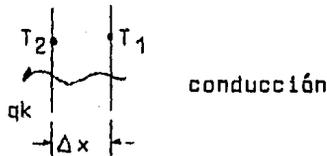
$$Q_c = h_c A (T_s - T_f) \text{ ----- (6.1.7)}$$

Definiendo la resistencia térmica por convección = R_c

$$R_c = 1/(h_c A) \text{ ----- (6.1.8)}$$

Nos queda:

$$Q_c = \frac{T_s - T_f}{R_c} \text{ ----- (6.1.9)}$$



fluído
Figura No. 63. Transferencia de calor por conducción y convección

Transferencia de calor combinada.- En la Figura No. 64, se supone que hay una temperatura mayor a la derecha del obstáculo. Se deduce que el aire entregará calor a la pared por convección, atravesará el sólido por conducción y transmitirá calor al exterior por convección. Se ha despreciado la transferencia de calor por radiación, que es válido para situaciones similares de la vida real.

Según las fórmulas 6.1.3 y 6.1.9, se puede escribir:

$$Q_{c1} = \frac{T_{in} - T_{p1}}{R_1}$$

$$Q_k = \frac{T_{p1} - T_{pe}}{R_2}$$

$$Q_{c2} = \frac{T_{pe} - T_{ex}}{R_3}$$

Si consideramos solo T_{in} y T_{ex} tendremos:

$$Q = \frac{T_{in} - T_{ex}}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Definiendo el coeficiente total de transferencia de calor como U:

$$AU = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1}{\frac{1}{k_{c1}A} + \frac{X}{kA} + \frac{1}{k_{c2}A}}$$

Es decir:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{k_{c1}} + \frac{X}{k} + \frac{1}{k_{c2}}} \quad (\text{Kcal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) \quad \text{-----} \quad (6.1.10)$$

Por lo que:

$$Q = AU (T_{in} - T_{ex}) \quad \text{-----} \quad (6.1.11)$$

El coeficiente total de transferencia de calor 'U', se puede ubicar en tablas para los materiales, fluidos y condiciones diferentes. Por lo que conociendo ese valor 'U' y la diferencia de temperatura entre dos puntos, se puede estimar la cantidad de calor que se transmite por convección y conducción entre esos dos puntos de interés.

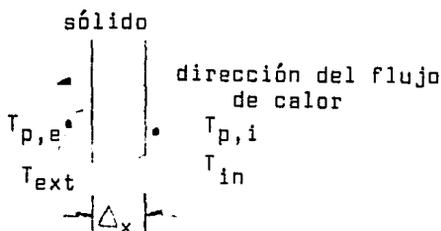


Figura No. 64. Esquema y definiciones para determinar transferencia de calor combinada, por convección y conducción.

VI.2. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COLECTORES

En el siguiente análisis, se han despreciado las pérdidas por conducción y radiación en infrarrojo de la superficie de absorción o superficie colectora.

Para estudiar la distribución de la energía en el colector, es necesario conocer ciertas variables:

$$T_{ext} = \text{Temperatura ambiente (}^{\circ}\text{C)}$$

T_{col} = Temperatura de la superficie del colector ($^{\circ}C$)

T_{ef} = Temperatura del fluido a la entrada del colector ($^{\circ}C$)

Q_f = Calor entregado al fluido por m^2 de colector en la unidad de tiempo (Kcal/hr m^2)

I_{ns} = Insolación en la superficie del colector (Kcal/hr m^2)

τ = Transmisividad de la cubierta (-)

α_B = Absorbencia de la superficie colectora (-)

U = Coeficiente total de transferencia de calor del colector al ambiente (Kcal/hr m^2 $^{\circ}C$)

Haciendo un balance de energía (correspondiendo a la Figura No. 65) tenemos:

Energía absorbida por la superficie colectora = Energía entregada al fluido + Pérdidas por convección

Es decir:

$$I_{ns} \tau \alpha_B = Q_f + U(T_{col} - T_{ext})$$

Por lo que:

$$Q_f = I_{ns} \tau \alpha_B - U(T_{col} - T_{ext}) \quad (\text{Kcal/hr } m^2) \quad \text{-----} \quad (6.2.1)$$

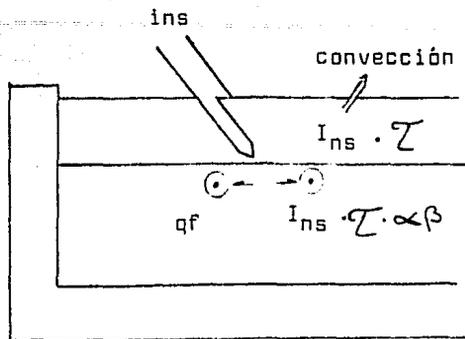


Figura No. 65. Distribución de energía en el colector.

Factor de remoción de calor del colector (F_R).- Por ser más cómodo en el laboratorio obtener la temperatura de entrada del fluido al colector, que la temperatura de la superficie colectora, se define este factor como un valor que relaciona el calor entregado al fluido, con el calor que recibiría del fluido si toda la superficie colectora estuviera a temperatura de entrada del fluido del colector.

Se puede decir que: $F_R = Q_f / Q_s$

si el colector estuviera a T_{ef} , por lo tanto: $Q_f = F_R Q_s$

Reemplazándolo en la ecuación tenemos que:

$$Q_f = F_R [I_{ns} \rho \alpha_B - U(T_{ef} - T_{ext})] \text{ (Kcal/hr m}^2\text{)} \text{ ----- (6.2.2)}$$

Designando el rendimiento instantáneo del colector como η_i , tenemos: $\eta_i = Q_f / I_{ns}$

y usando la ecuación:

$$\eta_i = F_R \tau \alpha_B - \frac{F_R U (T_{ef} - T_{ext})}{I_{ns}} \quad (-) \quad \text{-----} \quad (6.2.3)$$

Esta ecuación es del tipo de: $y = b - mx$, por lo que si se representa en la ordenada el rendimiento de un colector y en la abscisa el valor: $\frac{T_{ef} - T_{ext}}{I_{ns}}$ obtendremos la curva característica

de un colector.

La intersección de la recta con la ordenada sera: ---

$F_R \tau \alpha_B$ y la tangente de la recta será: $F_R U$.

Estos valores se pueden obtener experimentalmente al -- construir el gráfico de la Figura No. 66, calculando el rendimiento para cada $\frac{T_{ef} - T_{ext}}{I_{ns}}$ y midiendo cada término de la última expresión.

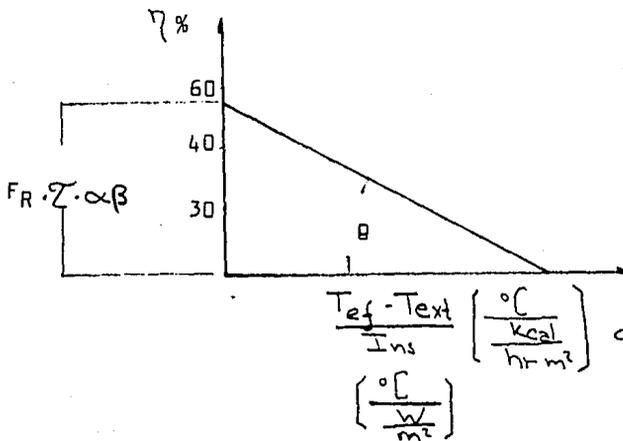


Figura No. 66. Curva característica del colector

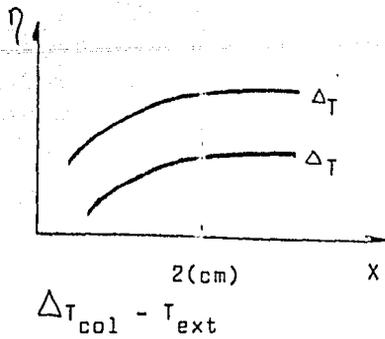
VI.3. COMPORTAMIENTO DE LOS COLECTORES

De la expresión 6.2.3, se puede señalar que los parámetros que influyen en el rendimiento del colector son $F_R, \tau, \alpha_B, U, T_{ef}, T_{ext}, I_{ns}$. Para estudiarlos, recurriremos a las gráficas que se muestran a continuación, correspondiendo a un colector típico, orientado hacia el ecuador y considerando:

Colector en estado de equilibrio térmico, sin gradiente de temperatura en cubierta; propiedades térmicas y de radiación de los materiales son independientes de la temperatura y las pérdidas de calor laterales son despreciables.

- Influencia de la distancia entre la superficie de absorción y la cubierta.

Si la distancia es pequeña, el rendimiento disminuirá, porque las pérdidas debido a la transferencia de calor al medio -- por conducción y convección de la capa de aire encerrada entre la cubierta y la superficie de absorción. Experimentalmente, se recomienda una distancia de dos centímetros, para evitar estas pérdidas: Distancias mayores aumentarán el costo sin ventajas.



X: Distancia entre superficie de absorción y cubierta

Figura No. 67. Influencia de la distancia entre la superficie de absorción y cubierta, en el rendimiento del colector.

- Influencia del número de cubiertas

Dos o tres cubiertas están justificadas si $T_{col} - T_{ext}$ es alto. Para valores pequeños, una cubierta tiene mejores resultados. Esto se explica al mostrar los colectores para el calentamiento de agua de las piscinas que no llevan ninguna cubierta, ya que la temperatura de descarga es muy baja. En la mayoría, los colectores constan de una sola cubierta, agregándole otra para altas temperaturas de descarga o cuando las condiciones climatológicas son muy severas, debido a bajas temperaturas y altas velocidades del viento.

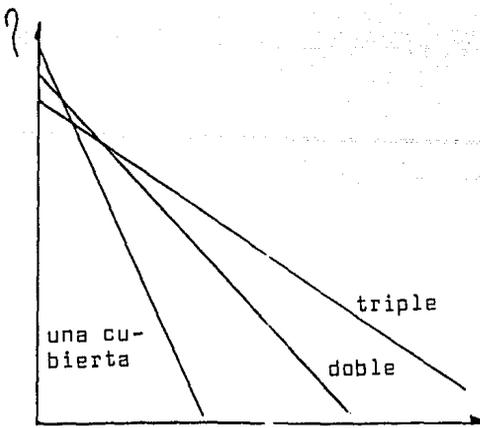


Figura No. 68. Influencia del número de cubiertas en el rendimiento del colector.

- Influencia de la emisividad en infrarrojo (ϵ_j).

Se designan como superficies selectivas aquellas en que $\alpha_B > \epsilon_j$ y las no selectivas cuando $\alpha_B = \epsilon_j$. De la Figura No. 69 se desprende la influencia favorable que tienen las superficies selectivas de las superficies de absorción de los colectores en el -- rendimiento de los mismos.

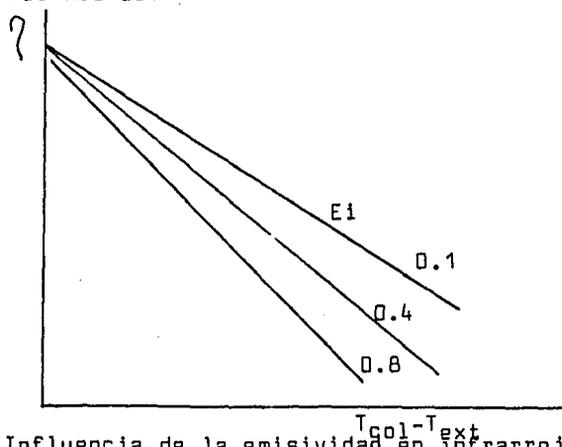


Figura No. 69. Influencia de la emisividad en infrarrojo, en el rendimiento del colector.

- Influencia de la insolación.

Al estudiar la ecuación 6.2.3, se deduce que a mayores valores de insolación, el rendimiento es más alto. También se confirma estudiando la Figura No. 70.

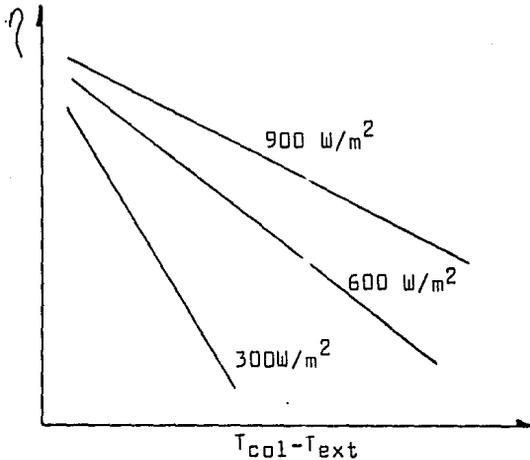


Figura No. 70. Influencia de la insolación sobre la superficie del colector, en el rendimiento del mismo.

- Influencia del ángulo de incidencia.

Si el ángulo es mayor de 50° , la transmisividad disminuye, pues aumenta la reflexividad. Por lo tanto, el rendimiento será menor con un ángulo de incidencia mayor o cerca de 90° (Ver la Figura No. 71).

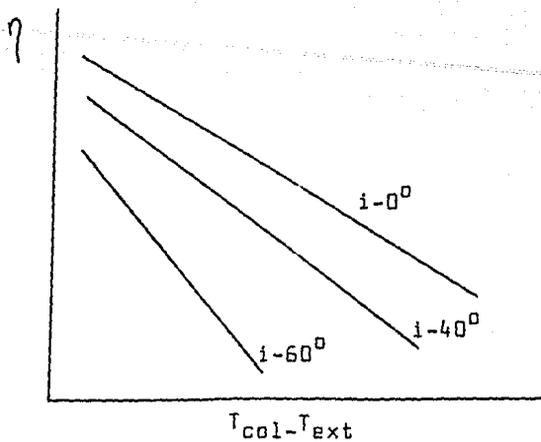


Figura No. 71. Influencia del ángulo de incidencia del rayo solar en el rendimiento del colector.

- Influencia de la hora del día.

Durante el día varía el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre el colector, así como la insolación. El rendimiento máximo será al medio día solar y la fracción más importante de la energía acumulada se lleva a cabo dos horas antes y después del 'medio día solar'.

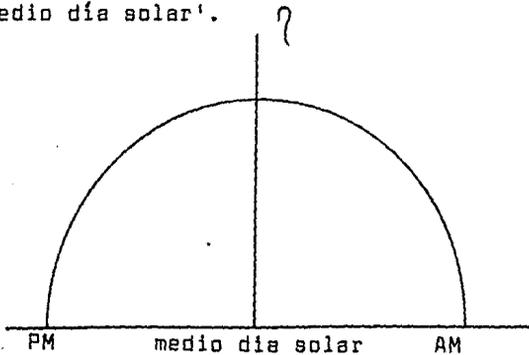


Figura No. 72. Influencia de la hora del día en el rendimiento del colector.

VI.4. DETERMINACION EXPERIMENTAL DEL RENDIMIENTO DE LOS COLECTORES

Designando:

η_j = Rendimiento instantáneo

Q_f = Calor entregado al fluido, ya definido en 8.2 Kcal/hr m²

\dot{m} = Caudal de masa del fluido por unidad de área del colector --
(1t/hr m²)

C_f = Calor específico del fluido (Kcal/1t °C)

T_e = Temperatura del fluido a la entrada del colector (°C)

T_s = Temperatura del fluido a la salida del colector (°C)

I_{ns} = Insolación en la superficie del colector (Kcal/hr m²)

Tenemos:

$$Q_f = \dot{m} C_f (T_s - T_e) \text{ ----- (6.4.1)}$$

Por lo tanto:

$$\eta_j = Q_f / I_{ns} \text{ ----- (6.4.2)}$$

$$\eta_j = \frac{\dot{m} C_f (T_s - T_e)}{I_{ns}} (-) \text{ ----- (6.4.3)}$$

Como los rendimientos más altos se alcanzan a medio día en un colector, los fabricantes entregan los gráficos discutidos - en la figura No. 66, en esas condiciones más favorables.

VI.5. DETERMINACION TEORICA DEL RENDIMIENTO DE UN COLECTOR

Aparte de las variables vistas en punto anterior, se tiene:

Pérdidas por ρ = Pérdidas por reflexividad de la cubierta

Energía placa = Energía absorbida en la superficie de absorción

ρ_{dir} = Reflexividad de radiación directa

ρ_{dif} = Reflexividad de radiación difusa

α_{dir} = Absortancia de radiación directa

α_{dif} = Absortancia de radiación difusa

j = Angulo de incidencia del rayo solar

r = Angulo de refracción

r_j = Indice de refracción de cubierta

= 1.52 para vidrio

Se puede escribir:

$$\eta_j = Q_f / I_{ns} \text{ ----- (6.5.1)}$$

Además:

$$Q_f = I_{ns} - \text{Pérdidas por } \rho - \text{Pérdidas placa colector (6.5.2)}$$

$$Q_f = \text{Energía de placa} - \text{Pérdidas de placa} \text{ ----- (6.5.3)}$$

$$\text{Energía de placa} = I_{ns} \text{ directa } (1 - \rho_{dir}) \alpha_{dir} +$$

$$I_{ns} \text{ difusa } (1 - \rho_{dif}) \alpha_{dif} \text{ ----- (6.5.4)}$$

Para radiación directa:

$$\rho_{dir} = .5 \left[\frac{\text{Sin}^2(j - r)}{\text{Sin}^2(j + r)} + \frac{\text{Tg}^2(j - r)}{\text{Tg}^2(j + r)} \right] \text{ ----- (6.5.5)}$$

y:

$$\text{Sin } r = \frac{\text{Sin } j}{r_j} = \frac{\text{Sin } j}{1.52} \text{ ----- (6.5.6)}$$

Si $j = 0$, entonces:

$$\rho_{dir} = \frac{(r_j - 1)^2}{(r_j + 1)^2} \text{ ----- (6.5.7)}$$

y para n cubiertas:

$$\alpha_{dir} = \frac{1 - \rho_{dir}}{1 + 2(n - 1)\rho_{dir}} + 1 \text{ ----- (6.5.8)}$$

Para superficies no selectivas, tenemos la siguiente tabla:

$j(^{\circ})$	$\alpha_{dir} = \epsilon$
0 - 30	0.96
30 - 40	0.95
40 - 50	0.93
50 - 60	0.91

60 - 70

0.88

70 - 80

0.81

80 - 90

0.66

ϵ_{dif} no se puede obtener por medio de una ecuación simple, pero se pueden tomar los valores de la siguiente tabla sin error apreciable:

ϵ_{dif}	Número de cubiertas
0	0
0.16	1
0.24	2
0.29	3

y se puede considerar $\epsilon_{dif} = 0.80$

Una expresión para determinar las pérdidas de placa por convección y radiación de un colector es la siguiente:

$$\text{Pérdidas de placa} = \frac{T_{col} - T_{ext}}{\frac{1}{h_c} + \frac{n/c}{\sqrt[4]{\frac{T_{col} - T_{ext}}{n + f}}}} + \frac{\sigma (T_{col}^4 - T_{ext}^4)}{\frac{1}{C_{col}} + \frac{2n + F - 1}{C_{cub}}} - n \quad \frac{\text{BTU}}{\text{hrft}^2} \quad (6.5.9)$$

siendo:

T_{ext} = Temperatura ambiente en $^{\circ}\text{R}$

h_c = Coeficiente de transferencia de calor por convección de la placa ($\text{BTU}/\text{hrft}^2\text{ }^{\circ}\text{F}$)

f = Relación de resistencia térmica entre cubierta exterior e interior

θ = Constante dimensional = 0.1713×10^{-8} BTU/hrft²°F

C_{col} = Emisividad del colector = 0.95

C_{cub} = Emisividad de la cubierta = 0.90

c = Factor que considera el ángulo de inclinación de la cubierta para coeficiente de convección natural.

T_{col} = Temperatura promedio del colector =

$$\frac{T_{salida\ fluido} - T_{entrada\ fluido}}{2}$$

También:

$$h_c = 1.0f + 0.35v \text{ ----- (6.5.10)}$$

donde 'v' es la velocidad del viento en nudos

$$\text{si } v \leq 8; f = 0.76 \times 10^{-0.037v}$$

$$v \leq 17; f = 0.36 \times 10^{-0.20(v - 8)}$$

$$v \geq 17; f = 0.24 \times 10^{-0.011(v - 17)} \text{ ----- (6.5.11)}$$

$$\text{y } c = 0.17 - 0.00078 \theta \text{ ----- (6.5.12)}$$

Con las expresiones 6.5.10, 6.5.11, 6.5.12 se resuelve la ecuación 6.5.9. Con las expresiones 6.5.5, 6.5.6, 6.5.7 y 6.5.8 se resuelven las ecuaciones 6.5.3 y 6.5.4, lo que nos permite resol

ver la ecuación 6.5.1; es decir, determinar el rendimiento instantáneo de un colector por medio de cálculo.

CAPITULO VII. PROCEDIMIENTOS DE CALCULO PARA EL DISEÑO DE

SISTEMAS

VII.1. CRITERIOS GENERALES PARA DETERMINAR LA DEMANDA DE ENERGIA

- COMO CALEFACCION
- REQUERIMIENTOS PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA DE USO DOMESTICO
- REQUERIMIENTOS PARA CALENTAMIENTO DE AGUA DE USO INDUSTRIAL

VII.2. ANALISIS ECONOMICO DE SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR

VII.3. DETERMINACION DEL AREA DE LOS COLECTORES

VII.1. CRITERIOS GENERALES PARA DETERMINAR LA DEMANDA DE ENERGIA

Existen tres tipos principales donde se puede aplicar la energía solar: como calefacción, para calentamiento de agua de uso doméstico y en el proceso industrial y agrícola.

- Como calefacción

No se relaciona con el tema principal de este trabajo, pero se puede señalar que para este servicio se tiene que determinar primero las pérdidas de calor del edificio (paredes, techos, pisos, ventanas, filtraciones...), para conocer el incremento necesario, donde las condiciones interiores son efectivas. En la siguiente tabla se muestran las temperaturas aceptables en diferentes lugares:

Aplicación	Temperatura* (°C)
En general: casas, departamentos, oficinas colegios, teatros, hoteles, restaurantes, cuartos de hospitales	23.33
Enfermos e inválidos	25.0
Ocupaciones que requieren trabajo ligero	21.0
Ocupaciones que requieren trabajo pesado	18.89
Garages	18.33
Gimnasios	18.33

Quirófanos	26.67
Cocinas	21.0
Lavanderías	21.0
Vestidores	21.0
Tiendas: clientes con ropa de calle	18.33
Albercas (techadas)	26.67
Tocadores	20.55

De "Modern Air Conditioning Heating and Ventilating" 3a. Edición, por Willis H. Carrier, Realto E. Cherne, Walter A. Grant y William H. Robert.

*Estas temperaturas son principalmente para le época de invierno pero no varía mucho con respecto a las de verano.

Por medio de la experiencia se ha definido, en México, que si la temperatura en algún momento del día baja de 18.3°C --- (65°F), es necesario el uso de calefacción.

Por lo general, el uso de esta energía es aceptado como calefacción, si es utilizada también para el calentamiento de agua. Las desventajas que tiene son: Los ductos de aire ocupan mayor espacio que las cañerías; el ventilador necesita un motor mayor que el que necesita la bomba; se debe evitar el polvo o la suciedad en el acumulador.

- Requerimientos para el Calentamiento de Agua de Uso Doméstico

En una forma resumida se verá el calor requerido por cada litro de agua. Se puede considerar en promedio 50 lt/día-persona, en el consumo doméstico (de agua caliente; el agua fría no se está tomando en cuenta). Por ello, si el agua llega a la instalación a una temperatura de 10°C y se necesita a 70°C, se requerirá entonces:

$$\begin{aligned}\frac{\text{Calor requerido}}{\text{lt}} &= \text{Calor específico} \times \Delta T \\ &= 1 \times 60 \text{ (Kcal/lt)}\end{aligned}$$

Para una familia de tres personas tendremos:

$$3 \times 50 \times 60 \text{ (Kcal/día)} = 9,000 \text{ Kcal/día}$$

$$9,000 \times 30 \text{ (Kcal/mes)} = 270,000 \text{ Kcal/mes}$$

Si designamos:

ΔT = Diferencia de temperatura entre el agua de la red y la suministrada (°C)

n = Número de personas que utilizan agua caliente del sistema solar

Q_{agua} = Calor requerido por litro de agua (Kcal/lt)

días = Número de días del mes

$lt_{d.p.}$ = Litros de agua al día estimada por persona (lt/día-p)

Tendremos:

$$Q_{\text{agua}} = \Delta T \text{ (Kcal/lt)} \text{ ----- (6.1.1)}$$

y

$$\bar{Q}_{\text{agua}} = n_i \times \text{lt}_{d.p} \times \text{días (Kcal/mes)} \text{ ----- (6.1.2)}$$

- Requerimientos para calentamiento de agua de uso industrial

Son los mismos principios que en el caso anterior, pero se puede tomar en conjunto el consumo de agua de la planta o el agua que utilizan los trabajadores; aún así, se podría tomar en cuenta el agua que gasta cada empleado y dejar la misma fórmula.

VII.2. ANALISIS ECONOMICO DE SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR

Si se designa:

C_a = Costo anual del sistema despreciando costos de mantenimiento (\$/año)

C_{es} = Costo de la energía solar (\$/Mcal)

C_j = Costos de la inversión total (\$)

F.R.C. = Factor de recuperación del capital (\$/año)

i_a = Interés anual (%)

t = Vida útil del sistema

Se puede escribir que:

$$C_{es} = \frac{C_a}{\text{Energía anual efectiva aportada por el sistema y de relaciones básicas financieras}} \text{ (\$/Mcal)} \text{ ----- (6.2.1)}$$

$$C_a = C_j \text{ (F.R.C.) (\$/año)} \text{ ----- (6.2.2)}$$

$$\text{F.R.C.} = \frac{i_a (1 + i_a)^t}{(1 + i_a)^{t-1}} \text{ ----- (6.2.3)}$$

Definiendo el factor solar como "f_s":

$$f_s = \frac{\text{Demanda de energía} - \text{déficit}}{\text{Demanda de energía}}$$

$$f_s = \frac{\text{Energía solar efectiva aportada}}{\text{Demanda de energía}} \text{ (-)} \text{ ----- (6.2.4)}$$

y se utilizará generalmente como porcentaje (X 100).

Se debe destacar que el criterio para determinar el tamaño de la instalación debe ser aquel, que entregue un menor costo de la energía de un sistema combinado (solar y auxiliar), para un determinado requerimiento, y no decidirse solamente por un alto rendimiento del colector o bajo costo de inversión.

Para exponer una justificación aproximada sin tomar en cuenta el incremento en el costo de combustibles ni la variación de las tasas de interés, definimos:

Ahorro anual = A.A. (\$)

Energía anual aportada por el sistema (M_{cal})

M_{cal} de energía en el mercado ($\$/M_{cal}$)

A.A. = Energía solar anual efectiva - Valor de la energía
aportada por el sistema en el mercado

Si se representa el valor del ahorro anual acumulativo (ordenada) y cada año de uso de equipo (abscisa), obtendremos las siguientes conclusiones:

a) Donde el ahorro acumulativo anual alcanza el valor del costo de inversión (abscisa), determinamos el periodo de amortización de la inversión (Figura No. 73).

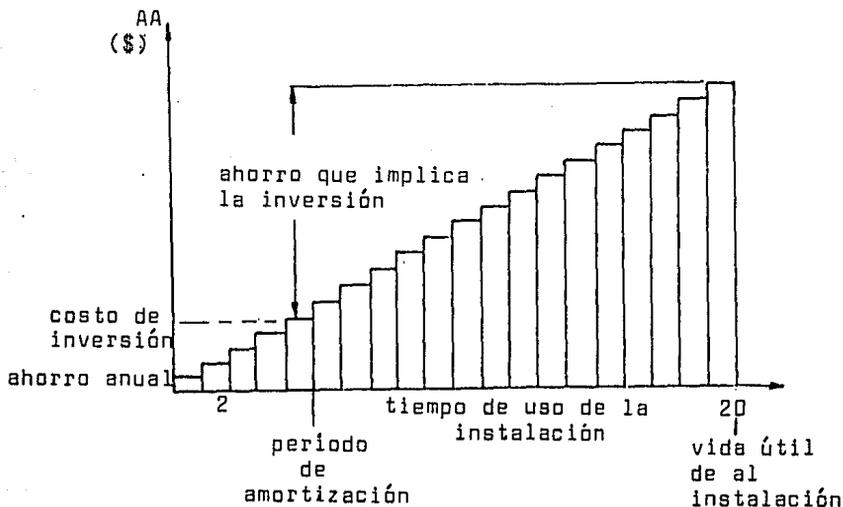


Figura No. 73. Costo de la energía de un sistema combinado en función del factor solar, f_s .

b) La diferencia entre el ahorro acumulativo anual al término de -

la vida útil del sistema y el costo de la inversión (Figura No. 74), nos indica el ahorro total que implica la inversión.

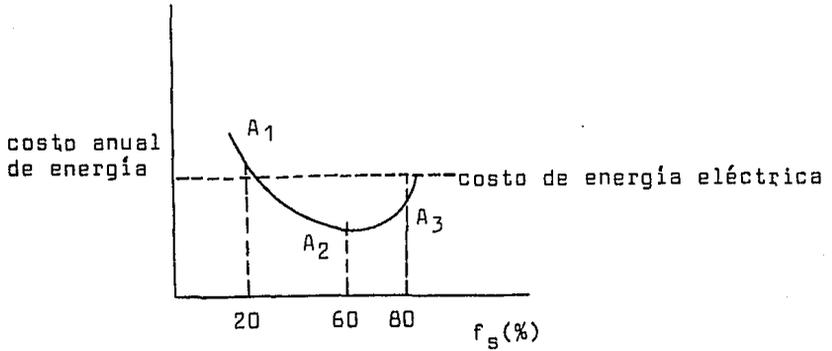


Figura No. 74. Justificación económica de inversión de una instalación de energía solar.

VII.3. DETERMINACION DEL AREA DE LOS COLECTORES

(Modelo de Hottel & Whillier)

Una vez que se obtienen las radiaciones (inciso anterior), se debe conocer la radiación que incide en un colector que tiene una inclinación dada (19° Cd. Cuernavaca).

Obtenido H_T (según lo expuesto en el Capítulo IV, se procede al cálculo del área del colector. A continuación se expone el modelo de Hottel Whillier.

$$Q_U = A F_r \left[H_T \tau \alpha - U_L (T_i - T_a) \right] = \dot{m} (t_o - T_i)$$

$$F_r = \frac{\dot{m} C_p}{A U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{F' U_L A}{\dot{m} C_p} \right) \right]$$

donde:

T_i = Temperatura de entrada del fluido

T_o = Temperatura de salida del fluido

U_L = Coeficiente de pérdida total del colector

F^1 = Factor de eficiencia geométrica del colector

A = Area del colector

C_p = Capacidad Térmica del fluido

F_r = Factor de eficiencia del colector

H_T = Radiación Total por unidad de área

T_a = Temperatura Ambiente

τ = Transmitancia de las cubiertas

α = Absortancia de la placa del colector para la radiación solar

\dot{m} = Razón de flujo del fluido en el colector

Despejando m de la fórmula inicial, tenemos:

$$AF_r [H_T \tau \alpha - U_L (T_i - T_a)] = \dot{m} C_p (T_o - T_i)$$

$$F_r = \frac{\dot{m} C_p}{A U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{F U_L A}{\dot{m} C_p} \right) \right]$$

realizando el siguiente cambio de Variables:

$$H_T \tau \alpha = U_L (T_i - T_a) = K_{\text{cons}}$$

nos queda:

$$\frac{A \dot{m} C_p}{A U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{F' U_L A}{m C_p} \right) \right] K_{\text{cons}} = \dot{m} C_p (T_o - T_i)$$

$$1 - \exp \left(- \frac{F' U_L A}{m C_p} \right) = \frac{(T_o - T_i) U_L}{K_{\text{cons}}}$$

$$\exp \left(- \frac{F' U_L A}{m C_p} \right) = 1 - \left(\frac{(T_o - T_i) U_L}{K_{\text{cons}}} \right)$$

$$\text{Ln} \left[\exp \left(- \frac{F' U_L A}{m C_p} \right) \right] = \text{Ln} \left[1 - \left(\frac{(T_o - T_i) U_L}{K_{\text{cons}}} \right) \right]$$

$$- \frac{F' U_L A}{m C_p} = \text{Ln} \left[1 - \left(\frac{(T_o - T_i) U_L}{K_{\text{cons}}} \right) \right]$$

$$m = - \frac{F' U_L A}{\text{Ln} \left[1 - \left(\frac{(T_o - T_i) U_L}{K_{\text{cons}}} \right) \right] C_p}$$

y la fórmula final queda de la siguiente forma:

$$\dot{m} = \frac{F' U_L A}{\text{Ln} \left[1 - \left(\frac{(T_o - T_i) U_L}{\frac{H_r \gamma \alpha - U_L (T_i - T_a)}{K_{\text{cons}}}} \right) \right] C_p}$$

Ahora bien, obtenida esta expresión, se irá variando el valor de "m" y de "A", donde "m" tiende a acercarse lo más posible al requerimiento de agua, y "A" será la variación del tamaño del colector, tomando en cuenta la radiación que incide en el colector (H_T), así como el requerimiento solicitado.

En el Capítulo VIII, se observará la aplicación de este modelo, con un programa de computación realizado para encontrar el área óptima del colector solar.

CAPITULO VIII EJEMPLO DE APLICACION PARA EL CALCULO DE UN SISTEMA CAPTADOR DE ENERGIA SOLAR (COLECTOR SOLAR) PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA EN LA CIUDAD DE CUERNAVACA, MORELOS.

- VIII.1 CALCULO HORARIO DE LA RADIACION SOLAR
- VIII.2 CALCULO DEL AREA DEL COLECTOR
- VIII.3 COSTOS DEL SISTEMA FINAL PROMEDIO
- VIII.4 COSTOS DE UN SISTEMA CONVENCIONAL
- VIII.5 COMPARACION DE COSTOS

VIII. EJEMPLO DE APLICACION PARA EL CALCULO DE UN SISTEMA CAPTADOR DE ENERGIA SOLAR (COLECTOR SOLAR) PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA EN LA CIUDAD DE CUERNAVACA, MORELOS.

Se realizarán los cálculos necesarios para determinar el área (número de colectores necesarios) que cubrirá la demanda de agua caliente para una familia de 4 personas, tomando como consumo promedio 50 lts/persona diarios, y una reserva de 50 lts; es decir, el cálculo de un área para 250 lts. diarios. Así también, se calculará el costo del equipo, el tiempo en el que se amortiza, y el ahorro al ser comparado con un sistema convencional. (La utilización del gas L.P. para un calentador de agua).

Para obtener el sistema final, se dimensionará a través del año, obteniendo sistemas mensuales, y realizando un promedio final que será el área requerida.

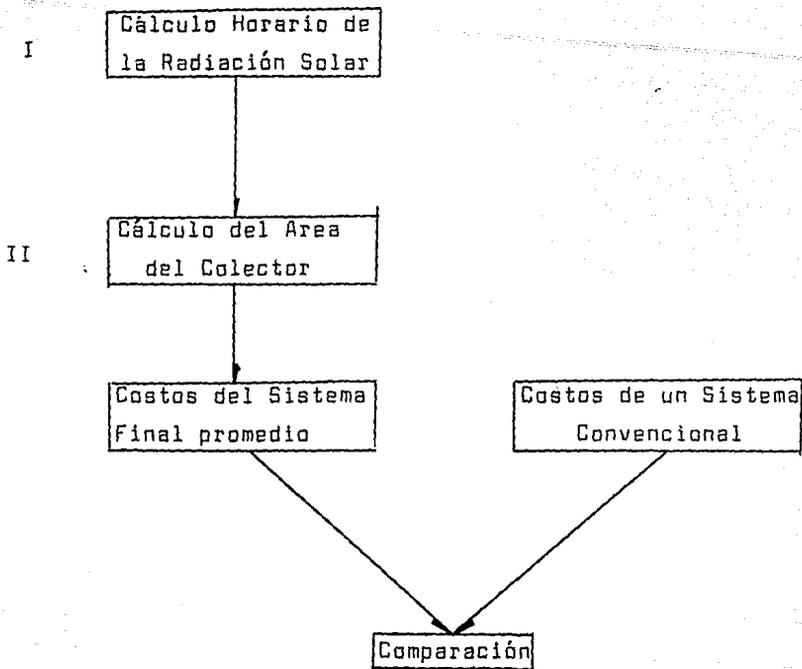
Así tendremos, para cada uno de los meses del año:

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----

y el sistema a usar será:

$$\text{Area Solar} = \sum_{i=1}^{12} \frac{A_i}{12}$$

Los cálculos se dividirán de la siguiente forma:



I. Cálculo Horario de la Radiación Solar

a) Para realizar los cálculos del promedio mensual de radiación solar, se tiene que hacer un cálculo diario. Klein* determinó el número "n" del día en el año que mejor representa el día medio de cada mes. A continuación aparece la tabla correspondiente:

Mes	Día Promedio del Mes	Día Correspondiente al Año
Enero	17	17
Febrero	16	47

*"Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces, Solar Energy". Pag. 325 - 329, Klein, 1977.

Marzo	16	75
Abril	15	105
Mayo	15	132
Junio	11	162
Julio	17	198
Agosto	16	228
Septiembre	15	258
Octubre	15	288
Noviembre	14	318
Diciembre	10	348

Con esto se reducen los cálculos a 12 únicamente.

b) Cálculo del Tiempo Solar Verdadero (Hora Solar)

De la fórmula 2.6.1 tenemos:

$$\text{Hora Solar} = \text{Hora Local} - 1(X) + 4(M_{cpm} - M_{loc})$$

donde:

Hora Local = Tiempo Standard de la localidad

$1(X) = 0$ Ya que en México no se tiene cambio de horario durante el año.

$E =$ Como los cálculos se realizarán para determinados días del año (los más representativos), se tiene que para estos, el valor de 'E' se obtiene de la figura (2.6.1) y aparece en forma de tabla a continuación:

Para E en décimas = $E(\text{min})/60$

Mes	E (min)	E (décimas de hora)
Enero	- 9	- 0.15
Febrero	- 14.5	- 0.2416
Marzo	- 9	- 0.15
Abril	0	0
Mayo	4	0.0666
Junio	1	0.0166
Julio	- 6	- 0.1
Agosto	- 2.5	- 0.0416
Septiembre	7.5	0.125
Octubre	16	0.2666
Noviembre	14	0.2333
Diciembre	5.5	0.0916

Mcon = Se tienen 2 usos horarios en la República Mexicana, referidos a los meridianos de 90° y 105° W. El de 105° W - solo rige en Nayarit, Sinaloa, Sonora y la Península de Baja California, por lo que para nuestro caso tendremos

$$Mcon = 90^{\circ} W$$

Mloc = El meridiano local para la Ciudad de Cuernavaca es:

$$Mloc = 99.3^{\circ} W$$

De aquí obtendremos:

$$4 (Mloc - Mcon) = 4 (90^{\circ} - 99.3^{\circ}) = 37.2^{\circ}$$

y su conversión en décimas de hora

$$4 (Mloc - Mcon) = - 0.62$$

La fórmula queda ahora de la siguiente manera:

$$\text{Hora Solar} = \text{Hora Local E} - 0.62$$

A continuación se calculará la hora solar en un intervalo entre las 7 y 18 horas. Tiempo Standard, por mes:

Hora Local	Hora Solar Verdadera	Hora Solar Verdadera	Hora Solar Verdadera	Hora Solar Verdadera
	Enero	Febrero	Marzo	Abril
7	6.23	6.138	6.23	6.38
8	7.23	7.138	7.23	7.38
9	8.23	8.138	8.23	8.38
10	9.23	9.138	9.23	9.38
11	10.23	10.138	10.23	10.38
12	11.23	11.138	11.23	11.38
13	12.23	12.138	12.23	12.38
14	13.23	13.138	13.23	13.38
15	14.23	14.138	14.23	14.38
16	15.23	15.138	15.23	15.38
17	16.23	16.138	16.23	16.38
18	17.23	17.138	17.23	17.38
	Mayo	Junio	Julio	Agosto
7	6.44	6.29	6.28	6.33
8	7.44	7.39	7.28	7.33
9	8.44	8.39	8.28	8.33
10	9.44	9.39	9.28	9.33
11	10.44	10.39	10.44	10.39
12	11.28	11.33	11.44	11.39
13	12.28	12.33	12.44	12.39
14	13.28	13.33	13.44	13.39
15	14.28	14.33	14.44	14.39

16	15.28	15.33	15.44	15.39
17	16.28	16.33	16.44	16.39
18	17.28	17.33	17.44	17.39

	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
7	6.50	6.64	6.61	6.47
8	7.50	7.64	7.61	7.47
9	8.50	8.64	8.61	8.47
10	9.50	9.64	9.61	9.47
11	10.50	10.64	10.61	10.47
12	11.50	11.64	11.61	11.47
13	12.50	12.64	12.61	12.47
14	13.50	13.64	13.61	13.47
15	14.50	14.64	14.61	14.47
16	15.50	15.64	15.61	15.47
17	16.50	16.64	16.61	16.47
18	17.50	17.64	17.61	17.47

c) Cálculo de la Radiación Instantánea

El algoritmo propuesto* para el cálculo de la radiación instantánea, necesita el promedio mensual de radiación máxima total (Figs. 34 A a 34 L) y el promedio mensual de radiación máxima directa (Figs. 35 A a 35 L).

De estas figuras se obtienen los promedios mensuales de radiación máxima total y máxima directa, para la Ciudad de Cuernavaca, Mor. y que se presentan a continuación.

*Ref. Cálculo de la Radiación Solar
V. Estrada Cajigal, J.C. Fernández

Cuernavaca, Mor.

Tabla de Radiaciones

Mes	Promedio Mensual de Rad. Max. Total G_M (W/m^2)	Promedio Mensual de Rad. Max. Directa G_{BM} (W/m^2)
Enero	650	500
Febrero	750	560
Marzo	750	550
Abril	750	560
Mayo	705	470
Junio	632	425
Julio	640	410
Agosto	650	430
Septiembre	640	430
Octubre	635	435
Noviembre	630	450
Diciembre	590	400

Prosiguiendo con el cálculo del algoritmo para el cálculo de la radiación, debemos utilizar al calcular la declinación solar, dada por la Fórmula 2.3.1

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 - \frac{284 + n}{365} \right)$$

Tabla de Declinaciones Solares

Mes	n	δ
Enero	17	- 20.9
Febrero	47	- 13
Marzo	75	- 2.4
Abril	105	9.4
Mayo	135	18.8

Junio	162	23.1
Julio	198	21.2
Agosto	228	13.5
Septiembre	258	2.2
Octubre	288	- 9.6
Noviembre	318	- 18.9
Diciembre	344	- 23

Dada que la latitud (\emptyset) de la Cd. de Cuernavaca, Mor. es de 19° , la ecuación del ángulo horario al alba, viene dada por la fórmula 4.4.1.2

$$Hs = \text{Arccos} (- \text{tg } \emptyset \text{ tg } S)$$

Donde: $\text{tg } \emptyset = \text{tg } 19 = 0.3443$

Así tenemos:

Mes	Hs
Enero	82.444
Febrero	85.44
Marzo	89.173
Abril	93.267
Mayo	96.731
Junio	98.445
Julio	97.675
Agosto	94.741
Septiembre	90.759
Octubre	86.661
Noviembre	83.229
Diciembre	81.595

La forma usual para encontrar la radiación total por ho-

ra, \bar{G} puede aproximarse para fines de cálculo con la expresión

4.3.1

$$\bar{G} = \bar{G}_M \cos \frac{180 \theta}{N}$$

La duración del día Solar, tomando los días más representativos de cada mes durante el año, es de:

Mes	N (hrs)
Enero	10.992
Febrero	11.392
Marzo	11.889
Abril	12.435
Mayo	12.897
Junio	13.126
Julio	13.023
Agosto	12.632
Septiembre	12.101
Octubre	11.554
Noviembre	11.097
Diciembre	10.879

La hora solar (θ) para los días más representativos del año, es:

$$\theta = 12 - \text{hora Solar Verdadera}$$

Enero

Hora V.	Hora Solar (8)
6.23	5.77
7.23	4.77
8.23	3.77
9.23	2.77
10.23	1.77
11.23	0.77
12.23	-0.23
13.23	-1.23
14.23	-2.23
15.23	-3.23
16.23	-4.23
17.23	-5.23

Febrero

Hora V.	Hora Solar (8)
6.138	5.86
7.138	4.86
8.138	3.86
9.138	2.86
10.138	1.86
11.138	0.86
12.138	-0.138
13.138	-1.138
14.138	-2.138
15.138	-3.138
16.138	-4.138
17.138	-5.138

Marzo

Hora V.	Hora Solar (8)
6.23	5.77
7.23	4.77
8.23	3.77
9.23	2.77
10.23	1.77
11.23	0.77
12.23	-0.23
13.23	-1.23
14.23	-2.23
15.23	-3.23
16.23	-4.23
17.23	-5.23

Abril

Hora V.	Hora Solar (8)
6.38	5.62
7.38	4.62
8.38	3.62
9.38	2.62
10.38	1.62
11.38	0.62
12.38	-0.38
13.38	-1.38
14.38	-2.38
15.38	-3.38
16.38	-4.38
17.38	-5.38

Mayo

Junio

Hora V. Hora Solar (θ)

Hora V. Hora Solar (θ)

6.44 5.56
 7.44 4.56
 8.44 3.56
 9.44 2.56
 10.44 1.56
 11.44 0.56
 12.44 -0.44
 13.44 -1.44
 14.44 -2.44
 15.44 -3.44
 16.44 -4.44
 17.44 -5.44

6.39 5.61
 7.39 4.61
 8.39 3.61
 9.39 2.61
 10.39 1.61
 11.39 0.61
 12.39 -0.39
 13.39 -1.39
 14.39 -2.39
 15.39 -3.39
 16.39 -4.39
 17.39 -5.39

Julio

Agosto

Hora V. Hora Solar (θ)

Hora V. Hora Solar (θ)

6.28 5.72
 7.28 4.72
 8.28 3.72
 9.28 2.72
 10.28 1.72
 11.28 0.72
 12.28 -0.28
 13.28 -1.28
 14.28 -2.28
 15.28 -3.28
 16.28 -4.28
 17.28 -5.28

6.33 5.67
 7.33 4.67
 8.33 3.67
 9.33 2.67
 10.33 1.67
 11.33 0.67
 12.33 -0.33
 13.33 -1.33
 14.33 -2.33
 15.33 -3.33
 16.33 -4.33
 17.33 -5.33

Septiembre

Hora V.	Hora Solar (θ)
6.50	5.50
7.50	4.50
8.50	3.50
9.50	2.50
10.50	1.50
11.50	0.50
12.50	-0.50
13.50	-1.50
14.50	-2.50
15.50	-3.50
16.50	-4.50
17.50	-5.50

Octubre

Hora V.	Hora Solar (θ)
6.64	5.36
7.64	4.36
8.64	3.36
9.64	2.36
10.6	1.36
11.64	0.36
12.64	-0.64
13.64	-1.64
14.64	-2.64
15.64	-3.64
16.64	-4.64
17.64	-5.64

Noviembre

Hora V.	Hora Solar (θ)
6.61	5.39
7.61	4.39
8.61	3.39
9.61	2.39
10.61	1.39
11.61	0.39
12.61	-0.61
13.61	-1.61
14.61	-2.61
15.61	-3.61
16.61	-4.61
17.61	-5.61

Diciembre

Hora V.	Hora Solar (θ)
6.47	5.53
7.47	4.53
8.47	3.53
9.47	2.53
10.47	1.53
11.47	0.53
12.47	-0.47
13.47	-1.47
14.47	-2.47
15.47	-3.47
16.47	-4.47
17.47	-5.47

A continuación obtendremos los valores de la Radiación Total (\bar{E}), de la fórmula (4.3.1.), de la Radiación Directa, de la fórmula (4.4.1.), y la Radiación Difusa, de la fórmula -- (4.5.1.) todas dadas en W/m^2 hr., y por meses utilizando un programa que se desarrolló, obteniendo los siguientes datos.

IRON

CALCULO DE LA RADIACION SOLAR EN CUERNAVACA, MORELOS

MESES : ENERO

PRIM. MENS. RAD. MAX. TOT. 650	PRIM. MENS. RAD. MAX. DIR. 500	DUR. DIA SOLAR 10.982	
RAD. TOTAL WATTS/M2	RAD. DIRECTA WATTS/M2	RAD. DIFUSA WATTS/M2	H. SOLAR
97.7723993	46.8280032	50.9343662	4.77
265.177077	120.623775	102.154302	3.77
425.673475	224.560185	121.113289	2.77
553.304315	409.100124	144.5062	1.77
631.240522	432.037597	149.212933	.77
648.316347	493.381820	149.93472	-1.23
602.611413	454.857122	147.754291	-1.23
500.09972	380.267397	139.812321	-2.23
354.550278	224.382724	120.137555	-3.23
187.074111	105.901168	81.6729441	-4.23
29.6130195	10.5240203	19.0899993	-5.23

---RADIACION TOTAL (Kcal/M2-Hr
EN UNA SUPERFICIE INCLINADA:19
GRADOS---

0

165.582142

416.140535

651.668510

840.971445

951.392972

979.93315

912.892622

762.392298

538.30286

300.043504

98.4557972

MESES : FEBRERO

FROM. MENS. RAD. MAX. T.01. 750	FROM. MENS. RAD. MAX. DIR. 550	DUR. DIA SOLAR 11.392	
RAD. TOTAL WATTS/M2	RAD. DIRECTA WATTS/M2	RAD. DIFUSA WATTS/M2	H. SOLAR
127.733518	61.3692469	66.4642715	4.86
314.644936	187.226666	125.61827	3.86
492.936473	331.3331	161.538273	2.86
635.763356	455.433072	180.371224	1.86
724.83708	536.66995	188.226729	.86
749.348633	559.392123	189.95651	-1.138
703.276633	519.493436	186.783234	-1.138
600.79114	424.390637	176.400451	-2.138
446.003334	292.130826	153.565158	-3.138
262.368147	153.66154	111.707607	-4.138
79.1627937	33.6909173	45.4718762	-5.138

--- RADIACION TOTAL (Kcal/M2-Hr)
EN UNA SUPERFICIE INCLINADA: 19
GRADOS

127.731406

314.64672

492.910034

635.619136

724.62715

749.62024

703.7754

601.593373

446.291503

262.311131

79.131733

MES : MARZO

PROM. MENS. RAD. MAX. TO1. 750	PROM. MENS. RAD. MAX. DIR. 550	SUR. DIA SOLAR 11.839	
RAD. TOTAL WATTS/M2	RAD. DIRECTA WATTS/M2	RAD. DIFUSA WATTS/M2	H. SOLAR
18.8223993	5.49388845	13.3285100	5.77
130.835344	33.2226449	97.6086995	4.77
360.951867	320.439098	140.482769	3.77
527.222645	352.222918	172.992752	2.77
654.446582	463.851392	190.595189	1.77
721.480063	533.076119	188.403944	.77
743.338268	543.478034	199.861184	-1.23
703.117657	507.392774	195.754883	-1.23
639.953494	413.253085	134.69041	-2.23
453.438886	293.285661	160.223025	-3.23
278.42355	159.374402	119.049148	-4.23
100.397426	44.8111633	56.0862625	-5.23

---RADIACION TOTAL (Kcal/M2-Hr)
EN UNA SUPERFICIE INCLINADA: 19
GRADOS-----

27.2602506

354.325183

508.935789

741.713814

923.839783

1033.16709

1057.10963

992.943409

847.99356

639.157498

393.153028

142.576622

MES : ABRIL

PROM. HENS. RAD. MAX. TOT. 750	PROM. HENS. RAD. MAX. DIR. 550	DUR. DIA SOLAR 12.435	
RAD. TOTAL WATTS/M2	RAD. DIRECTA WATTS/M2	RAD. DIFUSA WATTS/M2	H. SOLAR
77.3762671	32.7432035	44.6330638	5.62
214.475149	137.930034	106.546915	4.62
414.659968	266.978682	147.681286	3.62
541.563652	392.385617	171.877035	2.62
676.323461	492.100352	184.223089	1.62
816.299339	549.75161	189.547729	.62
745.859142	506.137871	189.721270	-0.98
596.204708	516.719933	155.955680	-1.98
590.112911	419.382676	175.730069	-2.97
453.166776	298.321096	154.84561	-3.95
286.088904	167.87589	110.213264	-4.98
115.445333	58.9921363	61.4528964	5.98

--- RADIACION TOTAL (Kcal/M2-Hr.)
EN UNA SUPERFICIE INCLINADA A 15
GRADOS-----

95.95805
322.533123
557.303338
765.531548
922.153551
1009.97345
1019.59373
947.994828
808.595776
610.944909
379.710323
146.922397

MES : MAYO

FROM. MENS. RAD. MAX. '01. 705	FROM. MENS. RAD. MAX. DIR. 470	OUR. DI. SOLAR 12009	
RAD. TOTAL WATTS/M2	RAD. DIRECTA WATTS/M2	RAD. FUSA WATTS/M2	H. SOLAR
111.450532	46.8501131	64.602419	5.56
266.211122	139.123310	127.090107	4.56
418.172188	244.853166	173.518417	3.56
548.981388	343.807307	205.180151	2.56
645.116127	426.684001	226.476126	1.56
707.151111	462.460553	233.689158	.56
730.130131	465.961041	234.18819	.41
801.02137	427.747012	226.076126	1.41
962.07115	324.479136	203.092138	-2.14
413.27108	357.289454	176.052155	-3.41
201.0151	151.512102	128.513717	-4.14
111.07109	56.4530612	33.8256164	-3.14

---RADIACION TOTAL (Watt/H2-M2)
EN UNA SUPERFICIE INCLINADA: 15
GRADOS---

101.312997

303.312567

515.552247

725.173411

957.036243

119.854855

334.06957

585.104539

743.899576

588.787491

364.143267

105.750114

MES : JUNIO

PROM. MENS. RAD. MAX. TOT. 632	FROM. MENS. RAD. MAX. DIR. 425	DUR. DIA SOLAR 12.126	
RAD. TOTAL WATTS/M2	RAD. DIRECTA WATTS/M2	RAD. DIFUSA WATTS/M2	H. SOLAR
106.289677	40.1730964	66.1165813	0.81
244.747957	100.624087	144.123870	4.61
376.546568	222.467195	154.079373	8.61
451.390139	310.52361	140.866529	2.61
576.324490	371.137245	197.187245	1.61
651.243167	412.23337	239.009797	.61
629.761138	422.233337	207.527801	-1.37
576.161453	394.541634	201.619818	-1.37
519.336241	327.701329	191.634912	-1.37
449.216795	242.960761	166.256034	-1.37
273.159902	148.967805	124.192097	-4.37
155.633755	62.062307	93.571448	-5.37

---RADIACION TOTAL (WATTS/M2) EN UNA SUPERFICIE INCLINADA 15 GRADOS---

- 172.204419
- 308.01232
- 433.25790
- 641.131123
- 758.136078
- 823.166787
- 829.735031
- 777.25612
- 670.8339
- 521.657955
- 343.725822
- 160.117141

NES : JUL10

FROM. MENS. RAD. MAX. TOT. 640	FROM. MENS. RAD. MAX. DIR. 410	DIR. DIA SOLAR 13.023	
RAD. TOTAL WATTS/M2	RAD. DIRECTA WATTS/M2	RAD. DIFUSA WATTS/M2	H. SOLAR
87.2526376	33.9250372	53.2876004	0.71
205.263909	111.215252	114.148658	4.72
363.262748	201.892372	161.270376	9.72
484.989055	289.211141	194.977615	13.72
575.123119	358.951119	216.465001	14.72
628.182176	400.785007	227.411406	15.72
698.249763	408.589012	289.265084	16.72
604.864769	381.270998	223.594051	11.72
528.514562	322.76026	205.754271	10.72
419.217497	241.899804	177.647004	8.72
284.113727	150.588564	131.218131	6.72
144.873134	60.0120924	61.4662413	3.72

---RADIACION TOTAL (Kcal/M2-H)
EN UNA SUPERFICIE INCLINADA 15
GRADOS

100.280914

280.001679

467.005639

604.001733

743.457916

898.027511

842.12085

799.022704

695.20376

516.120455

366.206653

173.001029

MES : AGOSTO

FROM. MENS. RAD. MAX. TOT. 800	FROM. MENS. RAD. MAX. DIR. 400	OMS. DIA SOLAR 12.932	
RAD. TOTAL WATTS/M2	RAD. DIRECTA WATTS/M2	RAD. DIFUSA WATTS/M2	H. SOLAR
722.21918	27.5891993	61.6325877	5.67
213.211208	108.05914	107.252848	4.67
355.394488	305.730821	154.663631	5.67
881.061102	306.551918	137.509103	4.67
581.287937	376.366017	207.921812	1.67
128.115571	491.100679	218.114093	1.67
347.376121	427.821707	219.544823	-1.33
437.265782	38.526571	212.439191	1.67
324.887368	329.161703	195.725581	-2.33
87.340337	29.173367	167.371811	-3.67
265.34211	148.440884	125.101246	-4.33
119.812522	31.5126616	67.5265078	-5.33

---RADIACION TOTAL (Kcal/1/12-H)
EN UNA SUPERFICIE INCLINADA: 19
GRADOS

87.1957939

128.115571

477.71246

800.349471

797.242647

880.502121

874.90539

876.134457

704.213365

511.257173

347.394983

149.326307

MES : SEPTIEMBRE

PROM. MENS. RAD. MAX. TOT. 640	PROM. MENS. RAD. MAX. DIR. 100	DUR. DIA SOLAR 12.161	
RAD. TOTAL WATTS/M2	RAD. DIRECTA WATTS/M2	RAD. DIFUSA WATTS/M2	H. SOLAR
61.0763217	23.179094	38.8912278	5.5
207.228106	105.515853	102.482252	4.5
257.00359	207.059574	145.738614	3.5
111.150173	89.804721	101.455052	2.5
233.258429	301.240911	200.318525	1.5
111.546579	124.587	208.438399	.5
201.041089	424.587	208.809599	-1.5
200.201469	251.510944	200.318525	1.5
411.25873	805.804721	161.105051	-2.5
257.00359	207.059574	145.738614	-3.5
207.228106	105.515853	102.482252	-4.5
61.0763218	23.179094	38.8912278	-5.5

-----RADIACION TOTAL (Real H2-H6)
EN UNA SUPERFICIE INCLINADA: 19
GRADOS

89.2331269
285.154939
492.965074
675.234165
809.621571
886.739966
960.769966
969.431571
675.234165
492.965074
285.154939
89.2339268

MES : OCTUBRE

PRIM. MENS. RAD. MAX. TOT. 635	TRIM. MENS. RAD. MAX. DIR. 435	DUR. DIA SOLAR 11.554	
RAD. TOTAL WATTS/M2	RAD. DIRECTA WATTS/M2	RAD. DIFUSA WATTS/M2	H. SOLAR
46.5991086	16.6147615	29.9843471	5.36
176.957457	100.307025	76.6504323	4.36
351.603213	207.772577	143.830688	3.36
471.068197	311.934427	174.70077	2.36
533.824398	351.622759	192.201839	1.36
631.35543	431.3314	197.47403	.36
633.513138	425.126152	193.326936	-1.64
551.261406	372.862293	188.459113	1.64
452.014054	284.421239	167.592016	-2.64
307.266322	176.791504	132.279113	3.64
152.421809	73.0654607	73.3363479	4.64
11.360862	3.16288242	9.19797957	5.64

----RADIACION TOTAL (Kcal/M2-H)
EN UNA SUPERFICIE INCLINADA: 19
GRADOS

72.1790058

287.104673

508.593339

701.274234

840.015804

907.899443

896.637191

637.713689

651.326893

448.200325

224.026886

21.5421085

 MES : NOVIEMBRE

FRON. MENS. RAD. MAX. TOT. 600	FRON. MENS. RAD. MAX. DIR. 50	DUR. DIA SOLAR 11.077	
RAD. TOTAL WATTS/M2	RAD. DIRECTA WATTS/M2	RAD. DIFUSA WATTS/M2	H. SOLAR
15.3068991	4.3169551	0.9887302	5.39
141.791343	27.3570060	27.5210000	4.39
323.551911	173.643428	127.967590	3.4
477.016720	232.941030	157.555607	2.37
553.427311	322.425447	173.266924	1.39
725.10125	445.697727	179.503524	.39
618.725932	410.000923	173.775000	-1.4
552.659142	321.261030	152.755104	-1.1
431.458717	226.052742	152.264902	-2.11
278.648553	127.628222	117.020156	-3.6
126.741352	50.6299012	66.1119103	-4.61

---RADIACION TOTAL (Watt/M2-Hr)
 EN UNA SUPERFICIE INCLINADA: 19
 GRADOS

32.1370206
 254.808283
 421.101844
 701.279061
 854.346141
 930.94307
 921.016925
 636.026726
 453.141205
 140.733152
 202.725674
 -4.7344862

MES : DICIEMBRE

FROM. MENS. RAD. MAX. TOT. 590	PEL. MENS. RAD. MAX. DIR. 100	OUR. DIA SOLAR 10.878	
RAD. TOTAL WATTS/M2	RAD. DIRECTO WATTS/M2	RAD. DIFUSA WATTS/M2	H. SOLAR
117.101118	50.8902803	64.1102304	4.50
231.711809	151.750531	119.961078	3.50
414.328205	257.143529	197.184676	2.50
532.70721	313.809672	178.897538	1.50
581.736354	383.007438	188.727186	.50
591.337737	394.196828	183.066493	-1.47
527.755550	347.965043	172.73921	-1.47
421.980079	263.092376	153.856704	-2.47
280.867062	155.168860	122.498199	-3.47
126.182017	59.1757441	68.0068051	-4.47

---RADIACION TOTAL (Kcal/M2-Hr
EN UNA SUPERFICIE INCLINADA 19
GRADOS---

3.08202109

192.768812

421.893812

631.040217

799.394248

875.525263

878.098409

796.763125

642.332497

485.361612

206.200798

-82.7249245

A continuación tenemos el cálculo del área de un colector plano utilizando el modelo Hottel y Whillier, expuesto en el punto VII.3, donde la fórmula final queda de la siguiente forma

$$\dot{m} = \frac{F' U_c A}{\ln \left[1 - \left(\frac{(T_o - T_i) U_c}{h_r \tau_{oc} - U_c (T_i - T_a)} \right) \right] C_p}$$

Los valores que permanecen constantes se presentan a continuación, mientras que las variables aparecen en la página 193 a la 204.

JRUM

CALCULO DEL AREA DEL COLECTOR PLANO POR
MEDIO DEL MODELO DE HOTTEL Y WHILLIER

LAS VARIABLES UTILIZADAS SON :

CP=CAPACIDAD TERMICA DEL FLUIDO($Kcal/Kg^{\circ}C$)

TA=TEMPERATURA AMBIENTE ($^{\circ}C$)

TI=TEMPERATURA DE ENTRADA($^{\circ}C$)

TS=TEMPERATURA DE SALIDA($^{\circ}C$)

FL=FACTOR DE EFICIENCIA GEOMETRICA DEL COLECTOR

GAMA=ABSORTANCIA DE LA PLACA

TA=TRANSMITANCIA DE LA CUBIERTA

UL=COEFICIENTE DE PERDIDA DEL COLECTOR($Kcal/m^2h^{\circ}C$)

HCCI=RADIACION TOTAL POR UNIDAD DE AREA($Kcal/m^2h$)

M=RAZON DE FLUJO DE FLUIDO EN EL COLECTOR (Kg/h)

AREA=AREA DEL COLECTOR (m^2)

LOS VALORES QUE PERMANECEN CONSTANTES SON :

TA=20

TI=25.1

TS=35

FL=1.8

GAMA=0.9

TA=0.93

UL=4.067

MES: ENERO

REQ. CUBIERTO: 101.793077 CON UN AREA DE : 8
EX=-.421290049

REQ. CUBIERTO: 144.677488 CON UN AREA DE : 1.12702204
EX=-.264857157

REQ. CUBIERTO: 183.285711 CON UN AREA DE : 1.44045719
EX=-.158972972

REQ. CUBIERTO: 211.506707 CON UN AREA DE : 1.65224865
EX=-.0834077567

REQ. CUBIERTO: 227.193081 CON UN AREA DE : 1.80039208
EX=-.0435187305

REQ. CUBIERTO: 229.120305 CON UN AREA DE : 1.87926575
EX=-.0222433928

REQ. CUBIERTO: 244.439152 CON UN AREA DE : 1.921067
EX=-.0112467794

REQ. CUBIERTO: 247.188305 CON UN AREA DE : 1.94267281
EX=-5.65519118E-01

REQ. CUBIERTO: 248.598202 CON UN AREA DE : 1.953659
EX=-2.93561356E-03

REQ. CUBIERTO: 249.271077 CON UN AREA DE : 1.95919382
EX=-1.41931929E-03

REQ. CUBIERTO: 249.645015 CON UN AREA DE : 1.96195053
EX=-7.10414246E-04

REQ. CUBIERTO: 249.822396 CON UN AREA DE : 1.96337435
EX=-3.55325541E-04

REQ. CUBIERTO: 249.911167 CON UN AREA DE : 1.964072
EX=-1.77690114E-04

REQ. CUBIERTO: 249.955375 CON UN AREA DE : 1.96442102
EX=-3.82569225E-05

REQUERIMIENTO CUBIERTO = 249.955375
CON UN AREA DE COLECTOR = 1.96442102

REQ. CUBIERTO: 118.518018 CON UN AREA DE :.8
EX=-.356785762

REQ. CUBIERTO: 160.803559 CON UN AREA DE :1.03542861
EX=-.217126716

REQ. CUBIERTO: 125.718318 CON UN AREA DE :1.32110419
EX=-.121784705

REQ. CUBIERTO: 319.550816 CON UN AREA DE :1.48199452
EX=-.0448496686

REQ. CUBIERTO: 238.789828 CON UN AREA DE :1.57809304
EX=-.0370968311

REQ. CUBIERTO: 241.002842 CON UN AREA DE :1.63026415
EX=-.0170387714

REQ. CUBIERTO: 245.711307 CON UN AREA DE :1.65875498
EX=-0.58259748607

REQ. CUBIERTO: 247.051353 CON UN AREA DE :1.67200707
EX=-4.31483208107

REQ. CUBIERTO: 248.901092 CON UN AREA DE :1.68022982
EX=-2.162080738603

REQ. CUBIERTO: 249.459418 CON UN AREA DE :1.68985586
EX=-1.002216128603

REQ. CUBIERTO: 249.728448 CON UN AREA DE :1.69528009
EX=-5.413279356604

REQ. CUBIERTO: 249.864651 CON UN AREA DE :1.68857951
EX=-0.767723228604

REQ. CUBIERTO: 249.932307 CON UN AREA DE :1.6870502
EX=-1.354044418604

REQ. CUBIERTO: 249.966149 CON UN AREA DE :1.68727863
EX=-8.776687728605

REQUERIMIENTO CUBIERTO = 249.966149
CON UN AREA DE COLECTOR = 1.68727863

MES: MARZO

REQ. CUBIERTO: 117.464599 CON UN AREA DE : 1.8
EX=-.36067529

REQ. CUBIERTO: 159.831177 CON UN AREA DE : 1.08854023
EX=-.220014552

REQ. CUBIERTO: 194.996362 CON UN AREA DE : 1.32803492
EX=-.123604691

REQ. CUBIERTO: 219.098327 CON UN AREA DE : 1.49218327
EX=-.0350734812

REQ. CUBIERTO: 233.53163 CON UN AREA DE : 1.59046178
EX=-.0349535188

REQ. CUBIERTO: 241.485071 CON UN AREA DE : 1.64465123
EX=-.0172242782

REQ. CUBIERTO: 245.66073 CON UN AREA DE : 1.67314362
EX=-8.73732745E-02

REQ. CUBIERTO: 247.815543 CON UN AREA DE : 1.68776326
EX=-4.30300493E-02

REQ. CUBIERTO: 248.902979 CON UN AREA DE : 1.69516231
EX=-2.19366855E-02

REQ. CUBIERTO: 249.450383 CON UN AREA DE : 1.69889576
EX=-1.10064351E-02

REQ. CUBIERTO: 249.724939 CON UN AREA DE : 1.70076364
EX= 5.56624636E-04

REQ. CUBIERTO: 249.862344 CON UN AREA DE : 1.70170312
EX=-2.75388042E-04

REQ. CUBIERTO: 249.931153 CON UN AREA DE : 1.70217175
EX=-1.37712763E-04

REQ. CUBIERTO: 249.965572 CON UN AREA DE : 1.70246616
EX=-6.88613385E-05

REQUERIMIENTO CUBIERTO = 249.965572
CON UN AREA DE CUBIERTO = 1.70246616

MES: ABRIL

REQ. CUBIERTO: 110.890.54 CON UN AREA DE : 6
EX= 1.262789089

REQ. CUBIERTO: 109.000.19 CON UN AREA DE : 1.07000.23
EX= 1.001536871

REQ. CUBIERTO: 109.000.00 CON UN AREA DE : 1.0710.00
EX= 1.124590007

REQ. CUBIERTO: 210.850.178 CON UN AREA DE : 1.40771029
EX= 1.066436071

REQ. CUBIERTO: 200.000.00 CON UN AREA DE : 1.00000.00
EX= 1.051100000

REQ. CUBIERTO: 241.100.86 CON UN AREA DE : 1.45010004
EX= 1.017100004

REQ. CUBIERTO: 240.000.00 CON UN AREA DE : 1.00000.00
EX= 0.012000000

REQ. CUBIERTO: 247.000.00 CON UN AREA DE : 1.00000.00
EX= 4.400000000

REQ. CUBIERTO: 248.000.00 CON UN AREA DE : 1.70000.00
EX= 2.200000000

REQ. CUBIERTO: 249.145.18 CON UN AREA DE : 1.70710.00
EX= 1.110000000

REQ. CUBIERTO: 249.000.00 CON UN AREA DE : 1.70000.00
EX= 5.550000000

REQ. CUBIERTO: 249.000.00 CON UN AREA DE : 1.70000.00
EX= 2.770000000

REQ. CUBIERTO: 249.000.00 CON UN AREA DE : 1.71000.00
EX= 1.000000000

REQ. CUBIERTO: 249.000.00 CON UN AREA DE : 1.71000.00
EX= 6.940000000

REQUERIMIENTO CUBIERTO = 00.000000
CON UN AREA DE COLECCION = 1.000000

REQ. CUBIERTO: 100.481592 CON UN AREA DE :.8
EX=-.394771758

REQ. CUBIERTO: 151.307061 CON UN AREA DE :1.11581741
EX=-.245928739

REQ. CUBIERTO: 100.517815 CON UN AREA DE :1.39021397
EX=-.139294591

REQ. CUBIERTO: 214.948867 CON UN AREA DE :1.58514338
EX=-.164529470

REQ. CUBIERTO: 221.153232 CON UN AREA DE :1.70464484
EX=-.027169990

REQ. CUBIERTO: 110.307502 CON UN AREA DE :1.77141076
EX=-.101996229

REQ. CUBIERTO: 210.001943 CON UN AREA DE :1.80680197
EX=-.010000000

REQ. CUBIERTO: 217.471779 CON UN AREA DE :1.82503059
EX=-5.63991711E-02

REQ. CUBIERTO: 210.732450 CON UN AREA DE :1.03428152
EX=-2.54145139E-03

REQ. CUBIERTO: 219.324637 CON UN AREA DE :1.83394537
EX=-1.37234329E-03

REQ. CUBIERTO: 219.681914 CON UN AREA DE :1.84123333
EX=-6.36576193E-04

REQ. CUBIERTO: 219.310856 CON UN AREA DE :1.84245715
EX=-3.18339660E-04

REQ. CUBIERTO: 219.920400 CON UN AREA DE :1.84304377
EX=-1.58219016E-04

REQ. CUBIERTO: 219.960195 CON UN AREA DE :1.84333722
EX=-7.76121176E-05

REQUERIMIENTO CUBIERTO = 219.960195 CON UN AREA DE CUBIERTO = 1.84333722

REQUERIMIENTO CUBIERTO = 219.960195
CON UN AREA DE CUBIERTO = 1.84333722

MES: JUNIO

REQ. CUBIERTO: 96.1415256 CON UN AREA DE :.8
EX=-.444493858

REQ. CUBIERTO: 136.876035 CON UN AREA DE :1.15559669
EX=-.285756782

REQ. CUBIERTO: 176.569804 CON UN AREA DE :1.48561628
EX=-.166695989

REQ. CUBIERTO: 206.326103 CON UN AREA DE :1.7334953
EX=-.090126911

REQ. CUBIERTO: 227.26825 CON UN AREA DE :1.97111131
EX=-.0476284919

REQ. CUBIERTO: 228.092877 CON UN AREA DE :1.9811866
EX=-.0240951972

REQ. CUBIERTO: 248.9012 CON UN AREA DE :2.02951304
EX=-.012343213

REQ. CUBIERTO: 246.912946 CON UN AREA DE :2.05457327
EX=-6.21246554E-03

REQ. CUBIERTO: 248.446084 CON UN AREA DE :2.06734297
EX=-3.11591138E-04

REQ. CUBIERTO: 249.321222 CON UN AREA DE :2.07378463
EX=-1.56038676E-03

REQ. CUBIERTO: 249.609903 CON UN AREA DE :2.07702093
EX=-7.60302625E-04

REQ. CUBIERTO: 249.894799 CON UN AREA DE :2.07864223
EX=-1.90750717E-04

REQ. CUBIERTO: 249.902863 CON UN AREA DE :2.0791541
EX=-1.95011971E-04

REQ. CUBIERTO: 249.951171 CON UN AREA DE :2.07956025
EX=-8.766699E-05

REQUERIMIENTO CUBIERTO = 249.951171
CON UN AREA DE COLECTOR = 2.07956025

REQ. CUBIERTO: 98.2271349 CON UN AREA DE : 1.8
EX=-.435944450

REQ. CUBIERTO: 141.2890 CON UN AREA DE : 1.1101756
EX=-.271848211

REQ. CUBIERTO: 180.29885 CON UN AREA DE : 1.11144091
EX=-.131875011

REQ. CUBIERTO: 204.391117 CON UN AREA DE : 1.70651294
EX=-.182665990

REQ. CUBIERTO: 217.75031 CON UN AREA DE : 1.05678714
EX=-.15068919

REQ. CUBIERTO: 230.134752 CON UN AREA DE : 1.742110
EX=-.022573411

REQ. CUBIERTO: 244.106647 CON UN AREA DE : 1.05661150
EX=-.071021220

REQ. CUBIERTO: 272.010179 CON UN AREA DE : 2.11110119
EX=-5.72912031517

REQ. CUBIERTO: 240.500145 CON UN AREA DE : 2.02398186
EX=-3.00373562E-04

REQ. CUBIERTO: 219.247913 CON UN AREA DE : 2.02997119
EX=-1.50667191E-06

REQ. CUBIERTO: 171.020311 CON UN AREA DE : 2.00142641
EX=-7.52824912E-04

REQ. CUBIERTO: 019.011577 CON UN AREA DE : 2.04156228
EX=-3.70043791E-04

REQ. CUBIERTO: 219.802707 CON UN AREA DE : 2.00510948
EX=-1.00078198E-04

REQ. CUBIERTO: 219.752956 CON UN AREA DE : 2.0045112
EX=-3.42871028E-05

MES: AGOSTO

REQ. CUBIERTO: 93.9298374 CON UN AREA DE : 1.2
 EX=-.432952834

REQ. CUBIERTO: 141.761791 CON UN AREA DE : 1.14686127
 EX=-.276435772

REQ. CUBIERTO: 130.923557 CON UN AREA DE : 1.46308595
 EX=-.160285138

REQ. CUBIERTO: 207.928716 CON UN AREA DE : 1.69759 77
 EX=-.10811349077

REQ. CUBIERTO: 228.218753 CON UN AREA DE : 1.84549997
 EX=-.045546419

REQ. CUBIERTO: 258.612345 CON UN AREA DE : 1.92955615
 EX=-.0233040128

REQ. CUBIERTO: 244.173495 CON UN AREA DE : 1.97453256
 EX=-.0117389979

REQ. CUBIERTO: 317.852455 CON UN AREA DE : 1.99780096
 EX=-.9.92964321E-02

REQ. CUBIERTO: 319.517507 CON UN AREA DE : 2.00964721
 EX=-2.9736276E-02

REQ. CUBIERTO: 311.353591 CON UN AREA DE : 2.01562317
 EX=-1.4993295E-03

REQ. CUBIERTO: 297.637742 CON UN AREA DE : 2.0188245
 EX=-7.4837121E-04

REQ. CUBIERTO: 319.313732 CON UN AREA DE : 2.00013952
 EX=-9.72674302E-03

REQ. CUBIERTO: 314.906321 CON UN AREA DE : 2.02088137
 EX=-1.86371841E-04

REQ. CUBIERTO: 317.953407 CON UN AREA DE : 2.021258
 EX=-9.31947083E-05

REQUERIMIENTO CUBIERTO = 317.953407
 CON UN AREA DE COLECTOR = 1.0211258

MES: SEPTIEMBRE

REQ. CUBIERTO: 98.0115485 CON UN AREA DE : 1.3
EX=-.436733931

REQ. CUBIERTO: 140.816517 CON UN AREA DE : 1.14988714
EX=-.1279372714

REQ. CUBIERTO: 180.156814 CON UN AREA DE : 1.47049459
EX=-.162366801

REQ. CUBIERTO: 227.4603 CON UN AREA DE : 1.70925409
EX=-.1889064933

REQ. CUBIERTO: 277.91088 CON UN AREA DE : 1.86027774
EX=-.2163291455

REQ. CUBIERTO: 328.144959 CON UN AREA DE : 1.94626011
EX=-.24467824

REQ. CUBIERTO: 374.655802 CON UN AREA DE : 1.99232323
EX=-.273027901

REQ. CUBIERTO: 427.207508 CON UN AREA DE : 2.0161021
EX=-.3013288790

REQ. CUBIERTO: 476.494713 CON UN AREA DE : 2.02820205
EX=-.3296091E+03

REQ. CUBIERTO: 529.245092 CON UN AREA DE : 2.03441413
EX=-.3578505E+03

REQ. CUBIERTO: 582.821979 CON UN AREA DE : 2.03490284
EX=-.38614318E+04

REQ. CUBIERTO: 637.810346 CON UN AREA DE : 2.02968193
EX=-.41450075E+04

REQ. CUBIERTO: 694.705283 CON UN AREA DE : 2.02890361
EX=-.44284081E+04

REQ. CUBIERTO: 749.702695 CON UN AREA DE : 2.04010108
EX=-.47099943E+05

REQUERIMIENTO CUBIERTO = 241.05227
CON UN AREA DE COLECTOR = 0.646189

MES:OCTUBRE

REQ. CUBIERTO: 97.4187168 CON UN AREA DE : 0
EX= - .439195559

REQ. CUBIERTO: 110.20861 CON UN AREA DE : 1.15134845
EX= - .291382301

REQ. CUBIERTO: 179.354425 CON UN AREA DE : 1.47531752
EX= - .165.25947

REQ. CUBIERTO: 209.068515 CON UN AREA DE : 1.71686527
EX= - .091629405

REQ. CUBIERTO: 278.170249 CON UN AREA DE : 1.86934448
EX= - .046661230

REQ. CUBIERTO: 308.334694 CON UN AREA DE : 1.95719339
EX= - .023907936

REQ. CUBIERTO: 311.073017 CON UN AREA DE : 2.00995181
EX= - .012669393

REQ. CUBIERTO: 341.27213 CON UN AREA DE : 2.0634792
EX= - 6.03992275E-03

REQ. CUBIERTO: 371.47768 CON UN AREA DE : 2.04050977
EX= 3.649766E-07

REQ. CUBIERTO: 391.697566 CON UN AREA DE : 2.04673249
EX= 1.153719714E-03

REQ. CUBIERTO: 394.315291 CON UN AREA DE : 2.04693825
EX= 7.6413197E-04

REQ. CUBIERTO: 397.068905 CON UN AREA DE : 2.05142472
EX= 3.8216675E-04

REQ. CUBIERTO: 399.764441 CON UN AREA DE : 2.05225575
EX= 1.4115501E-07

REQ. CUBIERTO: 402.492211 CON UN AREA DE : 2.05266114
EX= 8.55666144E-05

REQUERIMIENTO CUBIERTO = 341.27213
CON UN AREA DE CUBIERTO = 2.0634792

MES: NOVIEMBRE

REQ. CUBIERTO: 97.503106 CON UN AREA DE : 1.8
EX=-.48863971

REQ. CUBIERTO: 140.291507 CON UN AREA DE : 1.15108713
EX=-.281093723

REQ. CUBIERTO: 179.728569 CON UN AREA DE : 1.47462194
EX=-.16353057

REQ. CUBIERTO: 209.117358 CON UN AREA DE : 1.71577119
EX=-.0390481794

REQ. CUBIERTO: 227.738457 CON UN AREA DE : 1.83855405
EX=-.0465977615

REQ. CUBIERTO: 238.35056 CON UN AREA DE : 1.95562448
EX=-.0230546679

REQ. CUBIERTO: 244.036333 CON UN AREA DE : 2.00227525
EX=-.0120713121

REQ. CUBIERTO: 246.798170 CON UN AREA DE : 2.02644501
EX=-6.07230645E-03

REQ. CUBIERTO: 248.481903 CON UN AREA DE : 2.03875054
EX=-3.0453995E-01

REQ. CUBIERTO: 249.238865 CON UN AREA DE : 2.04495933
EX=-1.32502173E-03

REQ. CUBIERTO: 249.618745 CON UN AREA DE : 2.04807796
EX=-7.6303983E-01

REQ. CUBIERTO: 249.809227 CON UN AREA DE : 2.04964033
EX=-2.81692011E-04

REQ. CUBIERTO: 249.904577 CON UN AREA DE : 2.05042516
EX=-1.90832513E-04

REQ. CUBIERTO: 249.952279 CON UN AREA DE : 2.05081475
EX=-9.54303331E-05

REQUERIMIENTO CUBIERTO = 249.952279
CON UN AREA DE COLECTOR = 2.05081475

MES: DICIEMBRE

REG. CUBIERTO: 89.8902532 CON UN AREA DE : 1.0
EX=-.471050083

REG. CUBIERTO: 132.132473 CON UN AREA DE : 1.1768407
EX=-.308087325

REG. CUBIERTO: 172.172167 CON UN AREA DE : 1.50109500
EX=-.182094105

REG. CUBIERTO: 214.176474 CON UN AREA DE : 1.81103699
EX=-.100768937

REG. CUBIERTO: 256.211979 CON UN AREA DE : 2.10750711
EX=-.0377750167

REG. CUBIERTO: 298.231046 CON UN AREA DE : 2.38402115
EX=-.0137036932

REG. CUBIERTO: 340.250975 CON UN AREA DE : 2.64432776
EX=-8.90925993E-03

REG. CUBIERTO: 382.270682 CON UN AREA DE : 2.89180393
EX=-8.70666555E-03

REG. CUBIERTO: 424.280919 CON UN AREA DE : 3.12714718
EX=-1.75631013E-03

REG. CUBIERTO: 466.290922 CON UN AREA DE : 3.35079602
EX=-8.68910425E-04

REG. CUBIERTO: 508.292773 CON UN AREA DE : 3.56289757
EX=-4.34644095E-04

REG. CUBIERTO: 549.291329 CON UN AREA DE : 3.76201746
EX=-2.17968993E-04

REG. CUBIERTO: 591.294623 CON UN AREA DE : 3.94941776
EX=-1.05763355E-04

REG. CUBIERTO: 632.297226 CON UN AREA DE : 4.12641011
EX=-5.45370625E-05

REGISTRIMIENTO CUBIERTO = 200.12203
CON UN AREA DE 13.000000 = 2.140100

El requerimiento de los 12 meses se presenta a continuación, junto con el área del colector. Haciendo una sumatoria podemos obtener el área total requerida y el requerimiento promedio.

Mes	Requerimiento	Area del Colector
Enero	249.995575	1.96442102
Febrero	249.9966149	1.68727863
Marzo	249.965572	1.70240610
Abril	249.965256	1.71068981
Mayo	249.960195	1.84333722
Junio	249.951171	2.07986025
Julio	249.952856	2.0357133
Agosto	249.953407	2.021258
Septiembre	249.952685	2.04018966
Octubre	249.952211	2.05260114
Noviembre	249.952279	2.05081455
Diciembre	<u>249.972826</u>	<u>2.22461924</u>

$$\sum_{i=1}^{12} \dot{m} = 249.96168181 \text{ ts.} \quad \sum_{i=1}^{12} A = 1.951099077 \text{ m}^2$$

Estos son los valores del área total final y del requerimiento promedio anual de agua caliente.

El colector tendrá un área teórica de 1.95 m para una casa situada en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, y para una familia de cuatro personas, pudiendo utilizar como máximo un promedio diario de 249.96 lts.

Ahora se obtendrán los costos de este sistema y el de un sistema convencional (gas LP), comparándolos para definir -- cual es mas rentable y así poder obtener las conclusiones de este trabajo.

VIII.3. COSTOS DEL SISTEMA SOLAR PROMEDIO

El costo promedio de un colector plano en Agosto de--
1985 es de:

$$\text{Inv. Colector} = \$131,000.$$

La vida útil es de 20 años, pero para fines mas reales
estableceremos su tiempo de uso en 15 años.

Del punto tenemos que:

$$C_a = C_I \cdot \tau \cdot FRC$$

$$i_a = 10\%$$

que es la tasa que involucra el factor social de inver-
tir en un colector solar; si se toma como un servicio, por el--
que en algún momento se tendrá que pagar, la pérdida de oportuni-
dad de inversión no existe.

$$F.R.C. \quad 10\%, \quad 15 \text{ años} = 0.13147$$

y:

$$C_j = \$131,000 + (0.02(\$131,000))(15 \text{ años})$$

$$C_j = \$170,300 \text{ an.}$$

donde 0.02 es el porcentaje de mantenimiento anual de
un colector solar.

$$C_a = \$170,300 \times 0.13147 = \$22,389 \text{ an.}$$

El calor cedido al agua es igual a la energía efectiva.

El requerimiento cubierto multiplicado por los días -- del mes donde se puede aprovechar el colector solar es:

$$249.96 \frac{\text{lbs.}}{\text{día}} \times (30-3) = 6748.96 \frac{\text{lbs.}}{\text{mes}}$$

$$6748.96 \frac{\text{lbs.}}{\text{mes}} \times 12 \text{ meses} = 80,987.5 \frac{\text{lbs.}}{\text{año}}$$

$$Q = m C_p \Delta T = 80,987.5 \frac{\text{Kgs}}{\text{año}} \times 1 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg } ^\circ\text{C}} \times (55-25.1) ^\circ\text{C}$$

$$= 2,421,526 \frac{\text{Kcal}}{\text{año}}$$

$$C_{es} = \frac{C_a}{Q} = \frac{22,389 \text{ \$/año}}{2,421,526 \text{ Kcal/año}} = 0.009 \frac{\$}{\text{Kcal}}$$

El factor solar es igual a:

$$f_s = \frac{H_{T \text{ anual}}}{Q_{\text{anual}}}$$

Para obtener $H_{T \text{ anual}}$ se realiza una sumatoria de H_T -- por horas durante un día y luego se multiplica por los días efectivos del mes (27) realizando una sumatoria anual.

Para el día mas representativo del mes 'n' tenemos:

$$(H_T - \text{Kcal/m}^2\text{-día})$$

Enero	6592.34	Julio	6514.59
Febrero	7573.72	Agosto	6586.97
Marzo	7561.3	Septiembre	6450.9
Abril	7589.16	Octubre	6316.58
Mayo	7166.36	Noviembre	6315.76
Junio	6434.42	Diciembre	5869.04

Para cada mes tenemos:

$$(H_T - \text{Kcal/m}^2\text{-mes})$$

Enero	178,009.38	Julio	175,893.93
Febrero	214,490.44	Agosto	177,848.19
Marzo	204,155.10	Septiembre	174,174.30
Abril	204,907.32	Octubre	170,547.66
Mayo	193,491.72	Noviembre	170,525.52
Junio	173,729.34	Diciembre	158,464.08

Ahora bien

$$H_{T\text{mens}} (\text{Kcal/m}^2) = 2,186,232 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2}$$

y esto multiplicado por el área total (1.95m^2) es:

$$2,186,232 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2\text{año}} \times 1.95 \text{ m}^2 = 4,265,555 \frac{\text{Kcal}}{\text{año}}$$

y

$$f_s = \frac{H_T}{Q} = \frac{2,421,526 \text{ Kcal/año}}{4,265,555 \text{ Kcal/año}} = 0.56$$

Este valor se puede tomar como el rendimiento global del colector solar, que sería

=56%

VIII.4. COSTOS DE UN SISTEMA CONVENCIONAL

Inv. = \$55,000²

Instalación = \$10,000²

Vida Util = 5 años

Mantenimiento anual = \$5,000²

Inv.tot = \$55,000 + \$10,000 = \$65,000²

Cj = \$65,000 + (\$5,000 x 5 años) = \$90,000²

Cj a 15 años es igual a:

$$\$90,000 \times 3 = \$270,000²$$

que es la inversión de tres calentadores.

Cada metro cúbico de gas tiene un valor de

\$27.63²

y el consumo promedio al mes, es de

16 m³/mens.

por lo que el gasto en 15 años en gas sería de

$$= \$27,63 \times 16 \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \times 15 \text{ años} \times 12 \text{ meses}$$

$$= \$79,574.4 \text{ an.}$$

y

$$Cj_{15 \text{ años}} = \$349,574²$$

El valor de (Cj·FRC) 10%, 15 años sería

$$Cj \cdot \text{FRC} = \$349,574.4 \times 0.13147 = \$45,958/\text{año}$$

VIII.5. COMPARACION DE COSTOS

Tomando en cuenta los valores vistos anteriormente como un parámetro medible en precio a valor presente, se puede utilizar la relación del ahorro anual y multiplicarla por los 15 años como parámetro donde

$$A.A = \$45,958 - \$22,389 = \$23,569$$

$$\$23,569 \times 15 = \$353,535$$

Ahora bien, no se han tomado en cuenta aspectos como el alza de precios en algunos puntos.

En el lapso de un año, los precios en el gas han aumentado de la siguiente forma:

		\$/m ³
Septiembre	1984	23.41
Noviembre	1984	23.41
Enero	1985	24.56
Marzo	1985	25.58
Mayo	1985	26.61
Julio	1985	27.63

es decir, un 18.02% por lo que en un promedio lineal, para el año 2000, el metro cúbico de gas costará

$$\$63.29$$

Un calentador convencional, en Julio de 1984 tenía un precio de \$35,000, y se ha incrementado el 63%. También con un promedio lineal, el costo será dentro de 15 años de

$$\$334,090.89$$

Como se puede observar, la inversión de ambos equipos no es muy alta, pero en el aspecto referente al ahorro anual -- muestra el costo de un colector solar (\$22,389²) y un sistema - convencional (\$45,958²), que es la diferencia de costos anuales.

CONCLUSIONES

En el desarrollo histórico de las naciones, se han dado cambios energéticos, económicos, sociales y tecnológicos, por señalar algunos.

Desde el punto de vista energético, como zona de -- partida en el desarrollo mundial, no se han buscado fuentes al ternas comercialmente explotables, reservando las de mayor capacidad energética, para el desarrollo industrial y tecnológico.

Por ello, en esta investigación presento un sistema aplicable en un gran número de regiones en México (ver mapas de insolación), económicamente viable y con gran desarrollo potencial en el futuro, sin entrar a desarrollos técnicos que en el presente tendrían poca demanda y cuyos costos no podrían -- ser absorbidos por gran parte de la población. Como ejemplo, -- los colectores no muestran sistemas de almacenamiento de energía utilizando celdas solares.

Esta investigación es una solución final, que aunada a las ya existentes, y que, como ingenieros preocupados por la situación actual, tenemos que reubicar según los requerimientos de la sociedad.

Desde el punto de vista económico, en la última parte de la investigación (VIII.5), se comparan los costos de un sistema convencional (utilizando gas) y un sistema solar, tomando en un lapso de quince años, la diferencia de costos a valor presente, pero no se señala que un calentador de gas en un

año aumentó un 63% y el metro cúbico de gas un 18.02%; no se consideró el factor de extinción de recursos; con el mismo ritmo de inflación, en quince años, el metro cúbico de gas aumentará alrededor de 270.3% y un calentador de gas 945%. Por la baja demanda de los sistemas solares, no se ha producido un aumento de precios mayor al 18% anual desde 1983.

Se ha tomado como referencia quince años la duración de un sistema solar, que, aunque tenga una vida mayor a los veinte años, el desarrollo de nuevos conceptos tecnológicos harían en cierto momento obsoletos estos sistemas, teniendo por tanto, que renovarlos.

Aún así, en México no se espera un cambio drástico de tecnología en el transcurso de este siglo, y el nivel de seguridad de inversión en un sistema solar para el calentamiento de agua de uso doméstico tiene rendimientos altos.

Así mismo, un sistema híbrido sería otra solución presente que ayudaría al desarrollo de nuevas perspectivas energéticas, siendo la mezcla en este caso de un sistema solar, apoyado por un sistema seguro, constante y no renovable (sistema convencional de gas).

Y SEÑALO,

QUE SOLO EL DESARROLLO DE LA ENERGIA SOLAR NOS PODRIA
ADVERTIR DE UNA EVENTUAL CRISIS ENERGETICA.

JOHN ERICSON

(1902)

BIBLIOGRAFIA

1. Analysis & Experimental Tests of High Performance Tubular Collectors.
Internatinal Solar Energy Congress & Exposition -
Extended Abstracts
D.C. Beckley, C.R. Mather, Jr.
2. A Golden Thread
Ken Butti & John Perlin
Cheshire Books
1980
3. A Time Analysis of Sunshine
Benford & Bock
Trans. Am. Illum. Eng. Soc.
1939
4. Build Your Own Minimum-Cost Solar Heating System
Robert P. Haviland
Tab Books, Inc.
1982
5. Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted
Surfaces, Solar Energy
S.A. Klein
1977
6. Cálculo de la Radiación Solar Instantánea en la
República Mexicana
Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M.
José Luis Fernández, Vicente Estrada Cajigal
Diciembre, 1982
7. Design of Factors Influencing Solar Collector Perfor
mance
A. Whillier
ASHRAE ed.
1967
8. Direct Use of Sun's Energy
F. Daniels
Yale University Press
1964

9. Energía Solar. Aplicaciones e Ingeniería
Pedro Sarmiento
Ediciones Universitarias de Valparaíso, Chile
1980
10. Energía Solar y Edificación
S. V. Szokolay
Ed. Blume
1982
11. Estimación de la Radiación Solar y de la Temperatura Ambiente Instantánea, Memorias.
A. Palacios y A. Rodríguez
IV Reunión Nacional de Energía Solar, UASLP, Mex.
1980
12. Fundamentos de Aire Acondicionado y Refrigeración
Eduardo Hernández Goribar
Ed. Limusa
1982
13. Inter Technology Corporation, "Survey of Application of Solar thermal Energy to Industrial Process Heat"
Monthly Progress Report, Number 4
Mayo, 1976
14. La Energía Solar en la Edificación
Ch. Chauliaguet
Editores Técnicos Asociados
1978
15. La Radiación Solar. Conversión Térmica y Aplicaciones
R. Bernard, C. Menguy, M. Schwarts
Ed. Lavoissier
1982
16. L'énergie Solaire, de la Recherche Appliquée aux Utilisations Pratiques-Perspectives d'avenir
Service d'Information et de Diffusion Ministre de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat, Délégation aux Energies Nouvelles
17. Performance of Flat Plate solar Heat Collectors
H.C. Hottel, B.B. Woerts
Trans. A.S.M.E.
1942

18. Proceedings of the "Solar Industrial Process Heat Workshop", College Park, Maryland
E.R.D.A. and the University of Maryland
June 28, 29, of 1976
19. Revista Solar
Asociación Nacional de Energía Solar
No. 5, México
1983
20. Solar Energy of Thermal Processes
John A. Duffie, William A. Beckman
John Wiley & Sons
1974
21. Solar Energy Engineering
A. A. M. Sayigh
Academic Press Inc.
1982
22. Solar Engineering of Thermal Processes
John A. Duffie, William A. Beckman
John Wiley & Sons
1980
23. Solar Heating Design
William A. Beckman, Stanford A. Klein, John A. Duffie
John Wiley & Sons
1977
24. Solar Heating Systems
Gordon Tully
Mc. Graw Hill
25. Solar Program Assessment: Environmental Factors.
Solar Agricultural & Industrial Process Heat
Energy Research & Development Administration
National Technical Information Service
26. Solar Thermal Engineering (Space Heating & Hot Water -
Systems)
Peter J. Lunde
John Wiley & Sons