

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**



TESIS DOCTORAL

**Modelización, simulación y optimización de sistemas  
térmicos de energía solar**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR  
PRESENTADA POR

**Francisco Ramos Berjano**

DIRECTOR:

**Diego Tinaut Plaza**

Madrid, 2015

TP  
1980  
-----  
018

Francisco Ramos Bergano



\* 5 3 0 9 8 5 2 6 4 8 \*  
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE

84-00-04809-1

MODELIZACION SIMULACION Y OPTIMIZACION  
DE SISTEMAS TERMICOS DE ENERGIA SOLAR

Facultad de Ciencias Físicas.  
Universidad Complutense de Madrid  
1980



BIBLIOTECA

© Francisco Ramos Berjano  
Edita e imprime la Editorial de la Universidad  
Complutense de Madrid  
Servicio de Reprografía-Noviciado, 3 Madrid-8  
Madrid, 1980  
Xerox 9200 XB 480  
Depósito Legal: M-2341-1980

**INSTITUTO DE OPTICA  
C.S.I.C.  
MADRID**

**MODELIZACION, SIMULACION Y OPTIMIZACION  
DE SISTEMAS TERMICOS DE ENERGIA SOLAR**

**Memoria presentada por  
FRANCISCO RAMOS BERJANO  
ante la**

**FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS DE LA  
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**para aspirar al grado de  
DOCTOR EN CIENCIAS FISICAS**

**Abril 1979**

Este trabajo ha sido realizado en el Instituto de Optica "Daza de Valdés" del C.S.I.C., bajo la dirección del Dr. D. Tinaut, jefe de la Unidad Estructural de Energía Solar.

Agradezco al Dr. D. Tinaut la constante ayuda y orientación durante el transcurso del mismo.

Al Dr. A. Hidalgo, Director del Instituto de Optica, las facilidades que me ha brindado para su realización.

Al Dr. L. Plaza y al Dr. S. Terol, la lectura crítica y sugerencias sobre el mismo.

Al Prof. D. J. Doria, el aceptar ser ponente de este trabajo ante la Facultad de Físicas de la Universidad Complutense de Madrid.

A los distintos miembros del Instituto de Optica, la ayuda y colaboración que en todo momento me han dispensado.

**INDICE**

## INTRODUCCION

I. RADIACION SOLAR .....	8
1.— Introducción. El uso de datos meteorológicos. ....	11
2.— Radiación solar global, directa y difusa incidente sobre una superficie en función de su inclinación y orientación. ....	13
NOMENCLATURA .....	15
2.1. Para una superficie horizontal. ....	18
2.1.1. Cálculo de la exposición solar directa ( $\overline{H_{dm}(0,0)}$ ) y difusa ( $\overline{H_{dm}^D(0,0)}$ ) diarias a partir de la global ( $\overline{H_{dm}^G(0,0)}$ ) diaria. ....	18
2.1.2. Cálculo de las componentes total, directa y difusa horarias a partir de las totales en el día. ....	21
2.2. Para una superficie ( <i>s,g</i> ) inclinada y orientada. ....	26
2.2.1. Cálculo del factor de conversión $F_1(s,g)$ de la exposición directa horaria sobre una superficie horizontal a una superficie con inclinación <i>s</i> y orientación <i>g</i> . ....	26
2.2.2. Cálculo del factor de conversión $F_{dc}(s)$ para la exposición difusa horaria sobre un plano horizontal a un plano ( <i>s,g</i> ), procedente de la porción de cielo "vista" por dicha superficie. ....	27
3. Radiación solar sobre superficies verticales acristaladas. ....	33
NOMENCLATURA .....	36
3.1. Transmitancia resultante de la reflexión. ....	36
3.2. Transmitancia resultante de la absorción. ....	37
3.3. Transmitancia global. ....	37
3.4. Efecto del retranqueo en ventanas. ....	38
3.4.1. Cálculo de la sombra proyectada sobre el cristal, por efecto del retranqueo. ....	38

<b>4.— Año "típico" de radiación solar. ....</b>	<b>45</b>
<b>4.1. Introducción. ....</b>	<b>45</b>
<b>4.2. Método. ....</b>	<b>51</b>
<b>4.3. Determinación del año típico mediante el volumen de almacenamiento. ....</b>	<b>55</b>
<b>Conclusiones.— ....</b>	<b>66</b>
<b>Bibliografía.— ....</b>	<b>68</b>

## II. MODELIZACION DE COMPONENTES DE INSTALACIONES SOLARES

<b>1.- Introducción. Modelización y simulación de instalaciones solares.</b> .....	<b>74</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>78</b>
<b>2.- Balance energético del colector solar.</b> .....	<b>82</b>
<b>2.1. Base</b> .....	<b>83</b>
<b>2.2. Vidrio</b> .....	<b>84</b>
2.2.1. Absorción de la radiación solar. ....	84
2.2.2. Intercambio energético entre vidrio y placa. ....	86
2.2.3. Intercambio energético entre vidrio y atmósfera. ....	88
<b>2.3. Placa.</b> .....	<b>90</b>
<b>3.- Método de resolución del sistema de funciones no lineales obtenido.</b> .....	<b>94</b>
<b>4.- Estudio de la influencia de las variables de diseño de componentes.</b> .....	<b>95</b>
<b>4.1. Distancia placa-vidrio.</b> .....	<b>96</b>
<b>4.2. Distancia entre tubos.</b> .....	<b>97</b>
<b>4.3. Cociente conductividad/espesor aislamiento base.</b> .....	<b>102</b>
<b>4.4. Producto conductividad-espesor de la superficie absorbente.</b> .....	<b>104</b>
<b>4.5. Coeficiente de transferencia de calor en el interior de los tubos.</b> .....	<b>105</b>
<b>4.6. Coeficiente de extinción de la superficie transparente.</b> .....	<b>106</b>
<b>4.7. Selectividad de la superficie absorbente.</b> .....	<b>107</b>
<b>4.8. Coeficiente de conductividad en soldadura.</b> .....	<b>109</b>
<b>4.9. Coeficiente de albedo.</b> .....	<b>110</b>

<b>5.- Descripción de las instalaciones de la Planta Experimental de Energía Solar de Arganda del Rey.</b> .....	<b>112</b>
<b>5.1. Instalaciones y equipos.</b> .....	<b>114</b>
<b>5.2. Laboratorio y taller.</b> .....	<b>114</b>
<b>5.3. Explanada exterior de experimentación</b> .....	<b>114</b>
<b>5.4. Instalación de agua caliente sanitaria.</b> .....	<b>119</b>
<b>5.5. Instalación de calefacción.</b> .....	<b>123</b>
<b>5.6. Climatización de piscinas.</b> .....	<b>127</b>
<b>Conclusiones.-</b> .....	<b>129</b>
<b>Biografía.-</b> .....	<b>134</b>

### III. ESTUDIO TECNICO ECONOMICO DE INSTALACIONES SOLARES

Determinación de los puntos óptimos de diseño de las variables de dimensionado.

1.- Introducción. ....	139
<b>NOMENCLATURA</b> .....	142
2.- Estudio termodinámico	
Cálculo del rendimiento horario de un colector solar a partir de su curva de normalización. ....	144
3.- Estudio económico.	
Cálculo del ahorro total producido por la instalación solar a lo largo de la vida de la misma. ....	149
4.- Período de recuperación del capital invertido. ....	159
5.- Estudio de la influencia de las variables de dimensionado. ....	161
5.1. Superficie colectora. ....	161
5.2. Inclinación. ....	162
5.3. Volumen de almacenamiento. ....	169
6.- Estudio de instalaciones tipo. ....	173
6.1. Agua caliente sanitaria. ....	173
6.2. Calefacción solar. ....	184
7.- Influencia sobre la rentabilidad de los siguientes parámetros. ....	207
7.1. Precio del combustible convencional. ....	207
7.2. Incremento de precio de combustibles. ....	209
7.3. Precio del m <sup>2</sup> de colector solar. ....	211

<b>7.4. Inversión inicial de la instalación convencional .....</b>	<b>213</b>
<b>7.5. Aporte solar a la carga térmica. ....</b>	<b>215</b>
<b>7.6. Consideración global de los parámetros económicos. ....</b>	<b>216</b>
<b>8.- Determinación de los puntos óptimos de diseño de las variables de dimensionado.</b>	
<b>Método de cálculo de las variables de dimensionado en instalaciones solares .....</b>	<b>218</b>
<b>Conclusiones. ....</b>	<b>223</b>
<b>Bibliografía. ....</b>	<b>228</b>

<b>INTERPRETACION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>229</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>242</b>

## INTRODUCCION

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

El Sol; como es sabido, constituye el imprescindible sostén de la vida sobre la Tierra (fotosíntesis); y las llamadas fuentes actuales de energía convencionales (térmica e hidráulica) no son sino depósitos de energía solar almacenada en forma de combustibles fósiles ó embalses de agua, energías cuyo aprovechamiento supone la utilización indirecta de la energía solar.

La energía solar inmediata - no diferida -, considerada en la actualidad como una de las nuevas fuentes de energía no convencionales, se ha empleado también en numerosas aplicaciones de menor cuantía : obtención de sal en las salinas, potabilización de agua de mar, suministro de energía eléctrica para los dispositivos de comunicaciones en satélites artificiales, etc... Otras aplicaciones más simples, como la obtención de agua caliente para usos domésticos, viene aprovechándose en diversos países (Australia, Israel y Japón) desde hace muchos años.

En 1970 irrumpe la crisis energética mundial, ocasionada por la elevación de los precios de los crudos - el petróleo constituye, en la actualidad, la más poderosa fuente de energía en explotación - desde 0.91 \$ en Enero de 1970 hasta 14.5 \$ por barril que se prevee para finales de 1979, es decir, un 1493 % en 10 años, lo que significa un 31 % anual como promedio.

Esta drástica elevación de precios, unida al hecho de que los derivados del petróleo son, actualmente, valiosas materias primas, ha motivado la búsqueda de otras fuentes de energía que, por de pronto, ahorren combusti-

bles, o compitan en precios con el petróleo, o bien permitan concebir la esperanza de un desarrollo a largo plazo que equilibre el progresivo encarecimiento de combustibles no renovables. Tales son las perspectivas que ofrece la energía geotérmica, eólica, de las mareas, gradiente térmico en los océanos, energía solar, etc...

La energía solar es, de entre ellas, la que presenta una espectativas de desarrollo y comercialización más inmediatas, ya que su uso no se ve tan localizado en zonas restringidas de la superficie terrestre. Como energía radiante es una forma de energía gratuita y de alta calidad, y, como tal, puede ser transformada en otras formas de energía que van desde su conversión eléctrica por vía fotovoltaica o térmica hasta la síntesis de materia orgánica (bioconversión), o la transformación directa en calor.

Limitándonos a esta última, y muy particularmente a la conversión térmica de la energía solar a baja temperatura (captación y conversión de la radiación solar mediante colectores planos), la cual constituye el tipo de aplicación de desarrollo más inmediato, su implantación generalizada presenta en la actualidad dos únicos problemas : a) La naturaleza intermitente de la radiación solar y b) las altas inversiones necesarias para su instalación.

El primero de éstos problemas obliga al análisis y discusión del comportamiento de tales sistemas sometidos a condiciones meteorológicas previsibles, a fin de establecer una ingeniería de sistemas basada en la nueva tecnología de conversión. Estos estudios deben ser realizados particularmente en cada país, dadas las diferentes condiciones meteorológicas de un lugar a otro, y plantean, en la actualidad, interesantes temas de investigación a nivel internacional. Con ello se pretende llegar a la utilización más racional de los

diversos componentes de las instalaciones solares con óptimos diseños de ejecución.

El segundo problema está íntimamente relacionado con el primero, y viene condicionado por la escasa demanda actual de tales instalaciones. Un profundo conocimiento de la ingeniería de diseño de componentes y sistemas podrá conducir a la fabricación, en grandes series, a menor coste que en la actualidad, circunstancia de iniciación en la que, por ser bajas las cifras de pedidos, se fabrica con medios precarios y mano de obra artesanal. Esta reducción de coste producirá el lógico aumento de la demanda, lo que, a su vez, llevará a la industria a grandes series de producción con abaratamiento de precios. Tal ciclo, igual que ocurre con todos los artículos de nueva tecnología, tenderá a estabilizarse en un punto de plena competitividad con las fuentes de energía convencionales, como se deduce de éste trabajo.

Se plantea por tanto la necesidad de establecer métodos que permitan predecir la actuación de un sistema solar en una aplicación específica y durante un largo período de tiempo, a fin de evaluar su economía y llegar a un diseño óptimo. Los métodos de modelización y simulación en ordenador, además de darnos a conocer las prestaciones térmicas de la instalación, es decir, la fracción anual de la carga térmica satisfecha por la energía solar, nos ofrecen información esencial, a fines de diseño, de las distintas variables como temperaturas de trabajo del sistema, efectos de una determinada estrategia de control, influencia de los distintos parámetros de diseño sobre el comportamiento dinámico del sistema, etc... Su utilización exige, lógicamente, una experiencia y un costoso tiempo de cálculo en orde-

nador - de otra forma el problema sería totalmente inabordable - que no siempre están al alcance del ingeniero, arquitecto o proyectista interesado.

Ante la problemática de contribuir a la implantación y expansión comercial de los sistemas térmicos con colectores planos de aprovechamiento de la energía solar, se ha realizado el trabajo que constituye la presente Tesis Doctoral, cuya exposición comprende tres partes fundamentales:

La primera consiste en el estudio de la radiación solar y consta a su vez de tres apartados :

- 1.- Cálculo de la irradiancia solar global, directa y difusa en superficies colectoras con una determinada inclinación y orientación, datos necesarios en todo proyecto de utilización de energía solar a fin de conocer las disponibilidades energéticas reales de los paneles instalados.
- 2.- Cálculo de la irradiancia solar global recibida por superficies acristaladas y retranqueadas. Dichos datos son necesarios para el conocimiento del aporte natural solar a la carga térmica de edificios.
- 3.- Estudio del año "típico" o "promedio" representativo de la climatología del lugar en el cual se va a enclavar la instalación, lo cual es necesario en todo proceso de simulación de instalaciones solares. Se hace especial énfasis en el estudio de la influencia de las secuencias meteorológicas sobre las prestaciones de la instalación solar.

Los resultados se presentan en forma de tablas de irradiancia solar global, directa y difusa, en superficies con diferentes inclinaciones y orientaciones, así como en superficies verticales acristaladas y retranqueadas.

Las partes segunda y tercera consisten en la modelización, simulación y optimización de instalaciones solares, estudios que pueden ser utilizados con tres diferentes propósitos :

- 1.- Proporcionar información sobre la actuación dinámica de sistemas específicos, sometidos a las condiciones meteorológicas previsibles.

Este tipo de análisis puede valer para fines diversos, tales como determinar el aporte solar a la carga térmica requerida, preveer temperaturas extremas del sistema, obtener información sobre las interrelaciones dinámicas de los distintos componentes, estudiar la influencia de cada una de las variables de diseño sobre las prestaciones del sistema, etc...

- 2.- La simulación puede emplearse directamente como utensilio de diseño en determinadas aplicaciones.

Su uso se requiere a veces en proyectos de instalaciones grandes, como calefacción de grandes o complejos sistemas, instalaciones industriales, etc...

3.- Los métodos de simulación pueden ser también utilizados para estudios según proyectos tipificables.

Los resultados de muchas simulaciones permiten la obtención de curvas generalizadas de diseño, que relacionan el funcionamiento de un tipo particular de sistema con los parámetros de diseño y condiciones atmosféricas.

La aplicación de estas técnicas de simulación a los procesos solares permite, en consecuencia, el estudio del funcionamiento de un gran número de sistemas diferentes entre sí, pero basados en los mismos componentes dimensionados de formas diferentes, lo que conduce a un conocimiento cualitativo y cuantitativo del efecto producido por variaciones en cada una de las variables físicas de diseño sobre el comportamiento dinámico del sistema.

Las variables a estudiar pueden dividirse en dos grupos que serán tratadas separadamente:

- . VARIABLES DE DISEÑO DE COMPONENTES
- . VARIABLES DE DIMENSIONADO DE INSTALACIONES.

En la segunda parte de la Tesis se consideran las variables de diseño de componentes, es decir, todas aquellas variables que no dan una dimensión específica a la instalación, y se estudia la influencia de las mismas sobre la actuación dinámica del sistema reflejada en el rendimiento anual de la instalación y el aporte solar a la carga térmica del sistema.

La tercera parte de la Tesis trata del estudio de las variables de dimensionado. El criterio de optimización para su estudio debe ser un criterio técnico - económico que permita encontrar los sistemas de mínimo costo y por tanto de diseño óptimo.

Se presentan, por último, las conclusiones extraídas del trabajo, las cuales incluyen resultados científicos y técnicos de posible utilidad para los usuarios de esta nueva fuente de energía.

I

**RADIACION SOLAR**

## INTRODUCCION

I. RADIACION SOLAR .....	8
1.- Introducción. El uso de datos meteorológicos. ....	11
2.- Radiación solar global, directa y difusa incidente sobre una superficie en función de su inclinación y orientación. ....	13
NOMENCLATURA .....	15
2.1. Para una superficie horizontal. ....	18
2.1.1. Cálculo de la exposición solar directa ( $\bar{H}_{dm}^{-1}(0,0)$ ) y difusa ( $\bar{H}_{dm}^D(0,0)$ ) diarias a partir de la global ( $\bar{H}_{dm}^G(0,0)$ ) diaria. ....	18
2.1.2. Cálculo de las componentes total, directa y difusa horarias a partir de las totales en el día. ....	21
2.2. Para una superficie ( $s,g$ ) inclinada y orientada. ....	26
2.2.1. Cálculo del factor de conversión $F_I(s,g)$ de la exposición directa horaria sobre una superficie horizontal a una superficie con inclinación $s$ y orientación $g$ . ....	26
2.2.2. Cálculo del factor de conversión $F_{dc}(s)$ para la exposición difusa horaria sobre un plano horizontal a un plano ( $s,g$ ), procedente de la porción de cielo "vista" por dicha superficie. ....	27
3. Radiación solar sobre superficies verticales acristaladas. ....	33
NOMENCLATURA .....	35
3.1. Transmitancia resultante de la reflexión. ....	36
3.2. Transmitancia resultante de la absorción. ....	37
3.3. Transmitancia global. ....	37
3.4. Efecto del retranqueo en ventanas. ....	38
3.4.1. Cálculo de la sombra proyectada sobre el cristal, por efecto del retranqueo. ....	38

<b>4.- Año "típico" de radiación solar. ....</b>	<b>45</b>
<b>4.1. Introducción. ....</b>	<b>45</b>
<b>4.2. Método. ....</b>	<b>51</b>
<b>4.3. Determinación del año típico mediante el volumen de almacenamiento. ....</b>	<b>55</b>
<b>Conclusiones.- ....</b>	<b>66</b>
<b>Bibliografía.- ....</b>	<b>68</b>

1.- INTRODUCCION . EL USO DE DATOS METEOROLOGICOS .-

El estudio de la energía solar como fuente de energía, requiere un conjunto de parámetros de entrada, parte de los cuales son parámetros meteorológicos, que representen las condiciones ambientales a que estarán sometidos los distintos componentes de una instalación solar. Dichos parámetros son , entre otros, la radiación solar y la temperatura ambiente.

El tema de esta primera parte de la Tesis, consiste en la generación o transformación de los datos, disponibles en la actualidad, de radiación solar recibida por una superficie horizontal y temperatura ambiente, para formar el conjunto de datos de entrada necesarios en los programas de modelización y simulación objeto de las partes segunda y tercera de la misma.

La terminología, referente a radiación solar, utilizada en éste trabajo será la acordada por la Comisión Internacional de Iluminación (Publicación CIE Nº 17 (E-1.1.) 1970), de la cual extraemos las siguientes definiciones:

Irradiancia .- ( en un punto de una superficie )

Cociente del flujo energético recibido por un elemento de superficie que contiene al punto, por el área de dicho elemento.

Unidades :  $W \cdot m^{-2}$

Símbolo : E

Exposición energética .- ( en un punto de una superficie ).

Cantidad de energía radiante recibida, por unidad de superficie.

Unidades :  $J \cdot m^{-2}$

Símbolo : H

2.- RADIACION SOLAR GLOBAL, DIRECTA Y DIFUSA INCIDENTE SOBRE UNA SUPERFICIE EN FUNCION DE SU INCLINACION Y ORIENTACION .-

El dato de partida para evaluar la superficie colectora necesaria en un proyecto de utilización de energía solar, es la radiación solar global que se recibe en el lugar de instalación.

Los datos de radiación de que disponemos en la actualidad son las medidas, realizadas por el Servicio Meteorológico Nacional, de radiación solar global recibida por una superficie horizontal ( irradiancia solar ) en diferentes puntos de la geografía española.

En condiciones reales de proyecto, es necesario conocer la radiación solar interceptada por la unidad de superficie colectora con una determinada orientación e inclinación, que puede calcularse a partir de la radiación incidente sobre superficie horizontal por medio de relaciones trigonométricas que detallaremos más adelante. Dicha conversión no puede hacerse aplicando un factor único para todo el día, puesto que ciertas variables que intervienen en el cálculo (ángulo de incidencia, potencia solar, etc...) son función del momento del día considerado. Es necesario dividir la duración del día en intervalos de tiempo, efectuar el cálculo para cada uno de ellos e integrar los resultados a todo el día.

En la actualidad, en España, no disponemos de medidas experimentales de radiación horaria en un número suficiente de puntos y años que nos permita trabajar con datos estadísticos experimentales, por lo cual nos vemos obligados a recurrir a relaciones que puedan expresar, de forma aproximada, el valor de la radiación solar en cualquier momento ó intervalo de tiempo del día, en función de la radiación diaria.

.../...

La descomposición de la radiación global en sus componentes directa y difusa debe hacerse igualmente por medio de correlaciones establecidas en otros lugares.

Existen diversas relaciones que permiten dar los pasos anteriores (1 al 9). Para discernir entre ellas la que da un resultado más próximo a la realidad, se han reproducido varios métodos de cálculo y comparado los resultados con medidas experimentales de radiación horaria (Publicación D-37 del Servicio Meteorológico Nacional, medidas de radiación horaria realizadas en la Facultad de Farmacia de Barcelona, etc...), llegándose a la conclusión de que el método que presentaba menos desviaciones sistemáticas, era el publicado por Liu and Jordan (1-2) que fué finalmente seleccionado para el paso de radiación de superficie horizontal a inclinada.

Esta conversión constituye el fin de ésta primera parte de la Tesis proporcionando a los utilizadores de la energía solar, datos prácticos que constituyan una primera aproximación, a la espera de tener medias estadísticas de medidas experimentales.

NOMENCLATURA

- $\bar{H}_{dm}^G(s,g)$  : Exposición global diaria, media mensual sobre superficie (s,g)
- $\bar{H}_{dm}^I(s,g)$  : Exposición directa diaria, media mensual sobre superficie(s,g)
- $\bar{H}_{dm}^D(s,g)$  : Exposición difusa diaria, media mensual sobre superficie (s,g)
- $\bar{H}_{hm}^D(s,g)$  : Exposición global horaria, media mensual sobre superficie (s,g)
- $\bar{H}_{hm}^I(s,g)$  : Exposición directa horaria, media mensual sobre superficie(s,g)
- $\bar{H}_{hm}^D(s,g)$  : Exposición difusa horaria, media mensual sobre superficie (s,g)
- Plano (s,g): plano con inclinación s y orientación g.
- Plano (0,0): Plano horizontal.
- $\bar{H}_{um}^G(0,0)$  : Exposición global diaria, media mensual sobre superficie horizontal.
- $\bar{H}_{dm}^I(0,0)$  : Exposición directa diaria, media mensual sobre superficie horizontal.
- $\bar{H}_{dm}^D(0,0)$  : Exposición difusa diaria, media mensual sobre superficie horizontal.
- $\bar{H}_{hm}^G(0,0)$  : Exposición global horaria, media mensual sobre superficie horizontal.
- $\bar{H}_{hm}^I(0,0)$  : Exposición directa horaria, media mensual sobre superficie horizontal.
- $\bar{H}_{hm}^D(0,0)$  : Exposición difusa horaria, media mensual sobre superficie horizontal.
- $H_d(e)$  : Exposición diaria extraterrestre.

- $I_{sc}$  : Constante solar =  $1.94 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}^{-1} = 1.353 \text{ KJ.m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
- L : Latitud del lugar ( Norte positiva ).
- d : Declinación solar.
- W : Angulo horario.
- $W_s$  : Angulo horario de puesta de Sol.
- $\theta$  : Angulo de incidencia de la radiación directa con la normal al plano considerado.
- A : Altura solar.
- s : Inclinación. Angulo formado por el plano horizontal con el plano considerado.
- g : Orientación. Angulo formado por la normal al plano, con el meridiano del lugar.
- $t_1$  : Hora de salida del Sol.
- $t_2$  : Hora de puesta del Sol.
- (  $t_2 - t_1$  ) : Duración del día.
- r : Razón de intensidad de radiación solar con incidencia normal fuera de la atmósfera a la constante solar ( sin dimensiones ).
- $\bar{K}_T$  : Coeficiente de transparencia atmosférica para la radiación total.

N : Día del año

$r_d$  : Razón de radiación difusa horaria a diaria.

## M E T O D O   D E   C A L C U L O

El método de cálculo seguido en el presente trabajo es el propuesto por Liu and Jordan en las publicaciones :

" The Interrelationship and Characteristics Distribution  
Of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation"  
(Solar Energy, 4, nº 3, 1960) (1)

" The Long-term average performance of flat-plate solar  
Energy Collectors"  
(Solar Energy, 7, 53, 1963) (2)

El proceso se compone de los siguientes pasos :

### 2.1. PARA UNA SUPERFICIE HORIZONTAL.

2.1.1. Cálculo de la exposición solar directa ( $H_{dm}^I(0,0)$ ) y  
difusa ( $H_{dm}^D(0,0)$ ) diarias a partir de la global ( $H_{dm}^G(0,0)$ )  
diaria.

La exposición ( \* ) difusa diaria para cada mes del año como promedio, puede calcularse a partir de la global por medio de la relación de la figura 1, donde :

.  $H_d(e)$  viene dada por la relación :

$$H_d(e) = \frac{24}{\pi} r I_{sc} ( \cos L \cos d \sin W_s + W_s \sin L \sin d )$$

en unidades  $J \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ .

( \* ) Nota.- Desde este punto, al mencionar irradiancia o exposición nos referiremos a la solar ( procedente del Sol).

$\frac{\bar{D}}{\bar{H}} = \frac{\text{PROMEDIO MENSUAL DE RADIACION DIFUSA DIARIA}}{\text{PROMEDIO MENSUAL DE RADIACION TOTAL DIARIA}}$

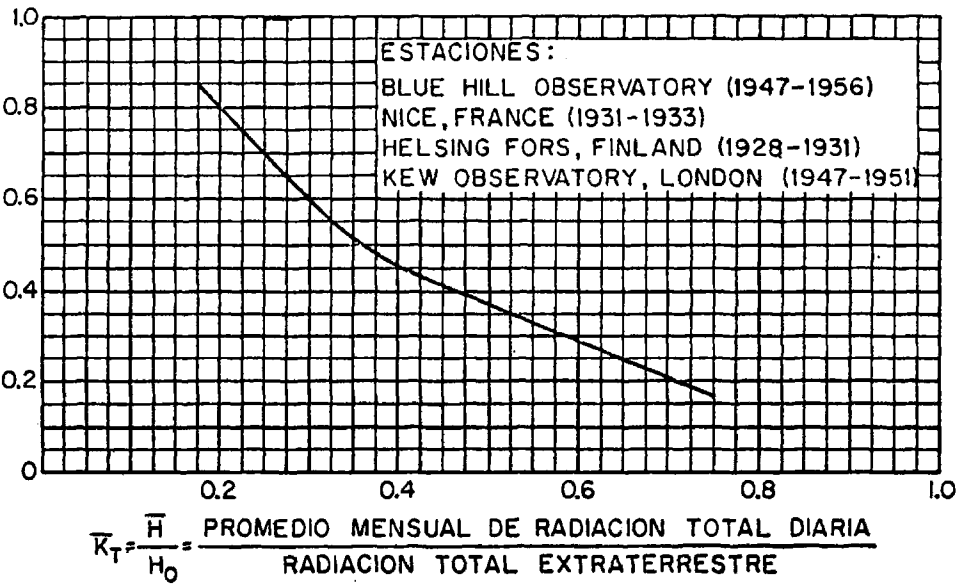


FIG. 1 .- Razón de los promedios mensuales de radiación difusa a total diarias, en función del índice de nubosidad.

- $r$  : factor correctivo de la constante solar para cada día del año y viene dado por :

$$(2) \quad r = 1 + 0.033 ( \cos ( 360 \cdot N / 365 ) )$$

$N$  : día del año.

- $W_s$  : puede calcularse por medio de :

$$(3) \quad W_s = \arccos ( -\tan L \tan d )$$

A efectos de cálculo, la gráfica de la fig. 1, ha sido expresada de forma analítica mediante un polinomio de 6º grado del tipo :

$$(4) \quad ( \bar{H}_{hm}^D(0,0) / \bar{H}_{dm}^G(0,0) ) = \sum_{i=0}^6 a_i ( \bar{K}_T )^i$$

con los siguientes valores para los coeficientes  $a_i$  :

$$\begin{aligned} a_0 &= -1.1678 & a_1 &= 35.3493 & a_2 &= -230.4067 \\ a_3 &= 709.0082 & a_4 &= -1152.0611 & a_5 &= 954.2365 \\ a_6 &= -318.0824 & & & & \text{coeficiente de correlación} = 0.9996 \end{aligned}$$

La expresión (4) nos permite, conocida  $\bar{H}_{dm}^G(0,0)$ , calcular  $\bar{H}_{hm}^D(0,0)$  y por diferencia  $\bar{H}_{hm}^I(0,0)$ .

2.1.2. Cálculo de las componentes total, directa y difusa horaria a partir de las totales en el día.

El promedio mensual horario ( $\bar{H}_{hm}^D(0,0)$ ) de exposición difusa sobre una superficie horizontal puede calcularse a partir de la expresión:

$$(5) \quad r_d = \frac{\bar{H}_{hm}^D(0,0)}{\bar{H}_{dm}^D(0,0)} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos W - \cos W_s}{\text{sen } W_s - W_s \cos W_s}$$

cuyos resultados para distintas duraciones del día ( $\delta W_s$ ) vienen reflejados en la fig. 2.

El promedio mensual horario ( $\bar{H}_{hm}^T(0,0)$ ) de exposición total sobre una superficie horizontal, viene expresado en función de la duración del día en la Fig. 3, gráficas que a efectos de cálculo se han expresado como polinomios de 6º grado del tipo :

$$(6) \quad (r_T)^j = \frac{\bar{H}_{hm}^T(0,0)}{\bar{H}_{dm}^T(0,0)} = \sum_{i=0}^6 a_1^j (t_2 - t_1)$$

$$(j = 1/2, 1 \ 1/2, 2 \ 1/2, 3 \ 1/2, 4 \ 1/2, 5 \ 1/2, 6 \ 1/2)$$

cuyos coeficientes  $a_1^j$  vienen dados en la tabla 1.

Las horas de salida ( $t_1$ ) y puesta de Sol ( $t_2$ ), así como la duración del día, pueden deducirse del conocimiento de  $W_s$  mediante las relaciones :

$$(7) \quad t_1 = 12 - ( W_s / 15 )$$

$$(8) \quad t_2 = 12 + ( W_s / 15 )$$

$$(9) \quad t_2 - t_1 = ( 2 W_s / 15 )$$

Conocidos  $\bar{H}_{hm}^D(0,0)$  y  $\bar{H}_{hm}^G(0,0)$ , el promedio mensual de radiación directa  $\bar{H}_{hm}^I(0,0)$ , puede deducirse directamente por diferencia.

$$(10) \quad \bar{H}_{hm}^I(0,0) = \bar{H}_{hm}^G(0,0) - \bar{H}_{hm}^D(0,0)$$

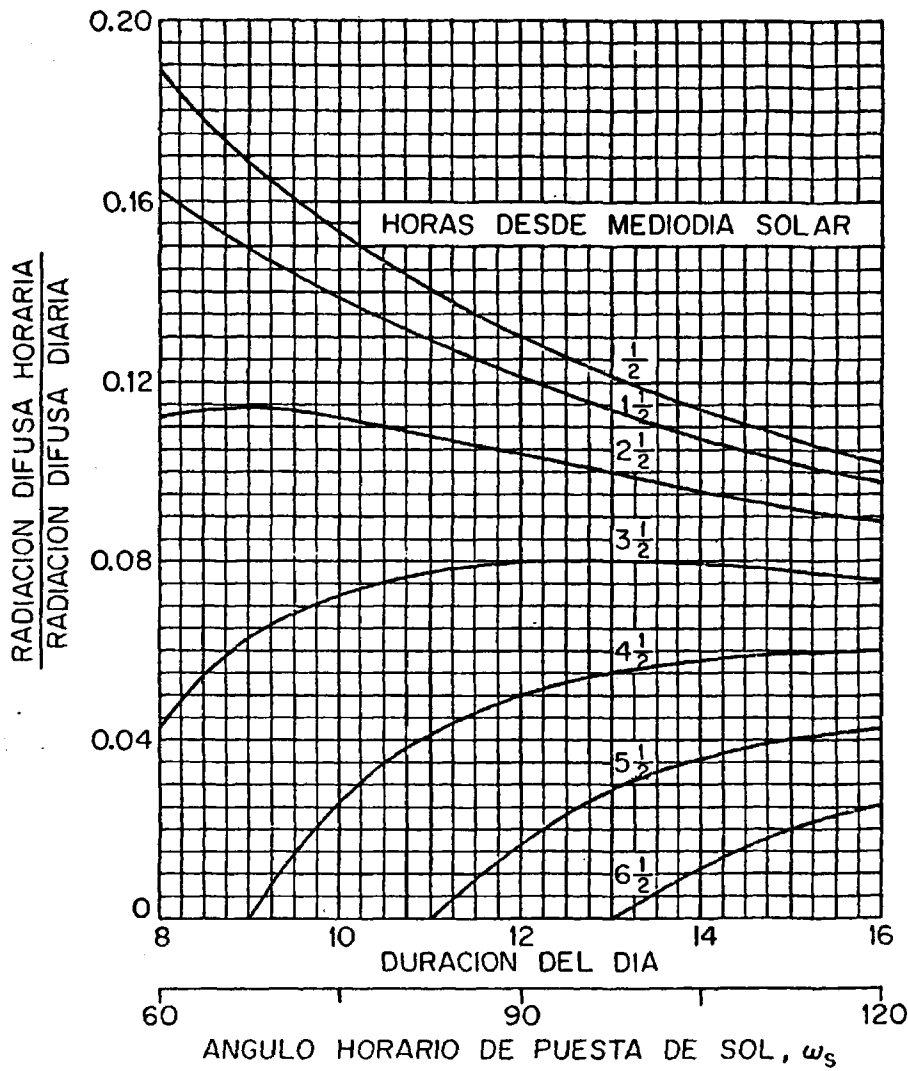


FIG. 2.- Relación entre radiación difusa diaria y horaria sobre una superficie horizontal.

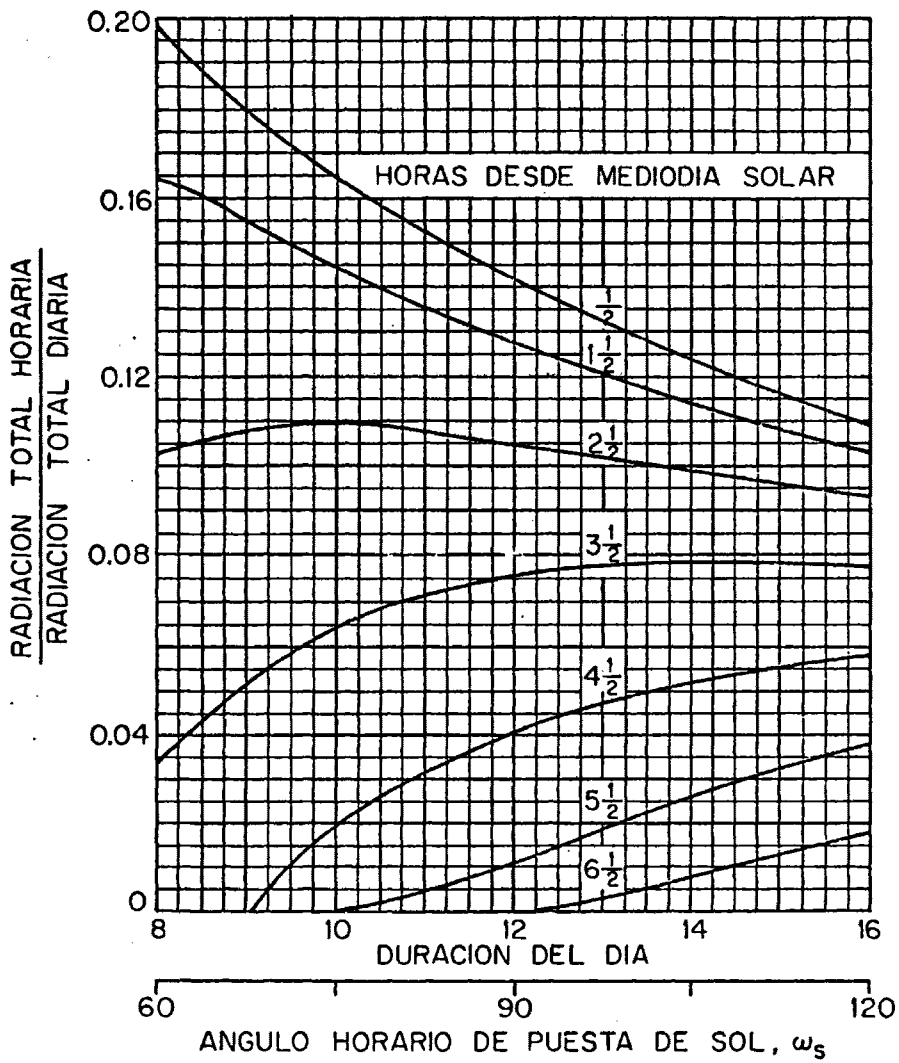


FIG. 3.- Relación entre Radiación total diaria y horaria sobre una superficie horizontal.

	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7
*****							
j=1/2	2.13500E+00	-8.32429E-01	1.49089E-01	-1.39466E-02	6.85147E-04	-1.56358E-05	1.03895E-07
j=1 1/2	-1.67151E+00	8.24088E-01	-1.44100E-01	1.24416E-02	-5.49186E-04	1.09193E-05	-5.60722E-08
j=2 1/2	3.20261E-01	-2.04275E-01	5.60025E-02	-6.94605E-03	4.37685E-04	-1.36570E-05	1.66400E-07
j=3 1/2	-5.84107E-01	1.60977E-01	-1.51422E-02	7.45561E-04	-2.56787E-05	7.66713E-07	-1.27080E-08
j=4 1/2	-2.20844E+00	7.73197E-01	-1.10453E-01	8.11729E-03	-3.04237E-04	4.71115E-06	-4.67872E-09
j=5 1/2	-6.65682E-02	6.59091E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
j=6 1/2	-5.84231E-02	4.76923E-03	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
*****							

Tabla 1.- Coeficientes  $a_i^j$  para el cálculo de la radiación total horaria sobre superficie horizontal a partir de la radiación diaria.

2.2 PARA UNA SUPERFICIE (s,g) INCLINADA Y ORIENTADA .

2.2.1 Cálculo del factor de conversión  $F_I(s,g)$  de la exposición directa horaria sobre una superficie horizontal a una superficie con inclinación s y orientación g.

El factor de conversión  $F_I(s,g)$  , es decir, la sombra proyectada por  $m^2$  de superficie inclinada sobre el plano horizontal, viene dado por la expresión :

$$(11) \quad F_I(s,g) = ( \cos \theta / \text{sen } A )$$

donde el ángulo de incidencia  $\theta$  viene dado por la relación :

$$(12) \quad \begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen } d \text{ sen } L \text{ cos } s \\ & - \text{sen } d \text{ cos } L \text{ sen } s \text{ cos } g \\ & + \text{cos } d \text{ cos } L \text{ cos } s \text{ cos } w \\ & + \text{cos } d \text{ sen } L \text{ sen } s \text{ cos } w \text{ cos } g \\ & + \text{cos } d \text{ sen } s \text{ sen } g \text{ sen } w \end{aligned}$$

y la altura solar A viene dada por :

$$(13) \quad A = \text{arc sen } ( \text{sen } d \text{ sen } L + \text{cos } d \text{ cos } L \text{ cos } w )$$

La exposición directa horaria sobre una superficie (s,g) es pues:

$$(14) \quad \bar{H}_{hm}^I(s,g) = F_I(s,g) \cdot \bar{H}_{hm}^I(s,g)$$

2.2.2. Cálculo del factor de conversión  $F_{dc}(s)$  para la exposición difusa horaria sobre un plano horizontal a un plano (s,g), procedente de la porción de cielo "vista" por dicha superficie.

$$(15) \quad F_{dc}(s) = (1 + \cos s) / 2$$

y para la porción de exposición directa y difusa horarias  $F_{da}(s)$  reflejadas por el suelo (albedo).

$$(16) \quad F_{da}(s) = ((1 - \cos s) / 2) \cdot \rho$$

siendo  $\rho$  el coeficiente de reflexión del suelo, que en el presente trabajo se ha tomado como  $\rho = 0.2$

La exposición difusa horaria sobre una superficie (s,g) queda :

$$(17) \quad \bar{H}_{hm}^D(s,g) = F_{dc}(s) \cdot \bar{H}_{hm}^D(0,0) + F_{da}(s) \cdot (\bar{H}_{hm}^I(0,0) + \bar{H}_{hm}^D(0,0))$$

la suma de las dos componentes (14) y (17) nos dá la exposición global horaria sobre la superficie (s,g), cuya integración en el tiempo entra las horas de salida y puesta del Sol, nos dá la exposición global en el día :

$$(18) \quad \bar{H}_{dm}^G(s,g) = \sum_{t_1}^{t_2} ( F_I(s,g) \cdot \bar{H}_{hm}^I(0,0) + \\ + F_{dc}(s) \cdot \bar{H}_{hm}^D(0,0) + F_{da}(s) \cdot ( \bar{H}_{hm}^I(0,0) + \bar{H}_{hm}^D(0,0) ) )$$

Expresión que nos permite conocer la exposición total en el día,  
en una superficie con cualquier orientación e inclinación.

Las tablas 2, 3, 4, y 5 son ejemplos de los resultados obtenidos  
con dicho procedimiento de cálculo.

.....  
**RADIACION GLOBAL INTERCEPIADA POR UNA SUPERFICIE INCLINADA**  
 .....

\* PROYINIA : NAURIO

\* LATITUD : 40 24 30

\* ORIENTACION : SUR

\* UNIDADES : (CAL:CM2.DIA)

INCLINACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL ANUAL
5	152	234	338	467	506	562	618	549	385	257	175	149	133861
5	169	252	355	479	512	564	621	562	399	273	192	167	138443
10	184	269	370	489	514	563	622	567	411	287	207	185	142231
15	190	284	383	497	513	558	618	571	420	300	222	201	145166
20	211	298	393	501	510	550	611	573	428	312	235	216	147370
25	223	312	402	502	505	540	601	571	432	321	247	230	148753
30	234	320	408	501	496	528	599	565	435	329	257	243	149374
35	243	320	412	496	485	512	573	557	435	334	266	253	149021
40	251	324	413	489	472	494	554	545	432	338	273	263	147908
45	257	324	412	479	456	474	531	533	427	343	279	270	145910
50	261	320	409	466	437	451	506	512	419	337	283	276	143030
55	264	320	403	451	416	425	478	490	409	337	285	281	139359
60	265	320	394	433	393	399	448	467	397	333	285	283	134957
65	265	324	384	413	369	372	418	442	383	327	284	283	129978
70	263	324	371	390	344	343	385	412	366	313	280	282	124179
75	259	320	356	366	318	312	351	383	347	301	275	279	117834
80	254	312	339	340	290	281	315	352	327	297	267	274	110941
85	247	294	321	313	260	250	279	317	305	283	261	268	103501
90	238	234	300	284	231	220	245	284	291	268	251	259	95607

INSTITUTO DE OPTICA-C.S.I.C.

TABLA 2

RADIACION SOLAR GLOBAL : POTENCIA INCIDENTE

PROVINCIA : MACRIO

LATITUD : 40 24 30

INCLINACION : 45																ORIENTACION 0 SUR	
HORA SOLAR	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	TOTAL DIA	
MESES	(WPM2)															(KCAL/CM2.DIA)	
ENERO	0	0	67	204	336	441	496	496	441	336	204	67	0	0		256.64	
FEBRERO	0	0	134	287	430	541	607	607	541	430	287	134	0	0		330.19	
MARZO	0	07	186	360	507	623	695	695	623	507	360	186	67	0		412.10	
ABRIL	3	31	240	422	573	695	773	773	695	573	422	240	81	3		479.10	
MAYO	26	78	245	400	537	637	715	715	637	537	400	245	98	26		455.65	
JUNIO	36	140	260	416	555	650	730	730	650	555	416	260	110	36		473.87	
JULIO	30	140	284	467	628	741	834	834	741	628	467	284	110	30		531.46	
AGOSTO	13	74	272	466	632	761	849	848	761	632	466	272	94	13		529.67	
SEPTIEMBRE	0	45	205	376	518	633	703	703	633	518	376	205	65	0		426.85	
OCTUBRE	0	26	140	291	424	527	590	590	527	424	291	140	56	0		339.58	
NOVIEMBRE	0	0	100	228	362	467	524	524	467	362	228	100	0	0		278.89	
DICIEMBRE	0	0	30	114	196	271	329	329	271	196	114	30	0	0		270.42	

INSTITUTO DE OPTICA-C.S.I.C.

TABLA 3

RADIACION SOLAR DIRECTA : POTENCIA INCIDENTE

PROVINCIA : MADERIO

LATITUD : 40 24 30

HORA	INCLINACION : 45																			TOTAL DIA
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19					
UNIDADES :	(WH/M2)																			(KCAL/CM2.DIA)
ENERO	0	0	50	157	257	339	382	382	339	257	157	50	0	0					197.54	
FEBRERO	0	0	100	212	322	409	462	462	409	322	212	100	0	0					254.70	
MARZO	0	49	123	255	368	460	518	518	460	368	255	123	49	0					299.77	
ABRIL	0	74	149	290	409	507	572	572	507	409	290	149	74	0					337.71	
MAYO	0	99	133	250	355	433	496	496	433	355	250	133	99	0					292.23	
JUNIO	0	122	141	260	370	443	511	511	443	370	260	141	122	0					302.41	
JULIO	0	140	176	323	456	549	639	639	549	456	323	176	140	0					374.23	
AGOSTO	0	161	177	334	469	576	652	652	576	469	334	177	161	0					387.06	
SEPTIEMBRE	0	122	127	257	365	456	513	513	456	365	257	127	122	0					299.67	
OCTUBRE	0	74	95	204	304	383	436	436	383	304	204	95	74	0					244.65	
NOVIEMBRE	0	0	83	172	273	355	407	407	355	273	172	83	0	0					212.44	
DICIEMBRE	0	0	27	173	287	375	421	421	375	287	173	27	0	0					215.82	

INSTITUTO DE OPTICA-C.S.I.C.

TABLA 4

RADIACION SOLAR DIFUSA : POTENCIA INCIDENTE

PROVINCIA : MACRID

LATITUD : 40 24 30

HORA SOLAR	INCLINACION : 45																		TOTAL DIA
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19				
ORIENTACION	0 SUR																		
ENTRADAS	(WHM2)																		(CAL:CM2.DIA)
ENERO	0	0	9	47	79	102	114	114	102	79	47	9	0	0				59.10	
FEBRERO	0	0	33	74	108	132	145	145	132	108	74	33	0	0				83.48	
MARZO	0	17	63	105	139	164	177	177	164	139	105	63	17	0				112.40	
ABRIL	3	47	91	131	164	188	200	200	188	164	131	91	47	3				141.40	
MAYO	26	69	112	150	182	204	217	217	204	182	150	112	69	26				163.42	
JUNIO	36	78	118	155	186	207	219	219	207	186	155	118	78	36				171.46	
JULIO	30	69	108	143	172	193	204	204	193	172	143	108	69	30				157.23	
AGOSTO	13	34	95	132	163	184	196	196	184	163	132	95	34	13				142.62	
SEPTIEMBRE	0	13	78	119	153	177	190	190	177	153	119	78	13	0				127.18	
OCTUBRE	0	1	45	86	120	144	156	156	144	120	86	45	1	0				94.93	
NOVIEMBRE	0	0	17	56	88	112	124	124	112	88	56	17	0	0				66.46	
DICIEMBRE	0	0	3	41	73	96	108	108	96	73	41	3	0	0				54.60	

INSTITUTO DE OPTICA-C.S.I.C.

TABLA 5

### 3 RADIACION SOLAR SOBRE SUPERFICIES VERTICALES ACRISTALADAS .

Por el interés que presenta en Arquitectura y para el cálculo de cargas térmicas de edificios el aporte energético debido a la radiación solar que penetra por las superficies acristaladas, vamos a considerar con detalle el caso de superficies verticales con diferentes orientaciones.

Partiendo de la energía solar recibida por  $m^2$  de superficie vertical con una determinada orientación, calcularemos la porción transmitida por un vidrio simple o doble.

La proporción de la radiación solar incidente que atraviesa un vidrio depende del ángulo de incidencia de la radiación directa sobre la superficie considerada, que a su vez depende de la posición geográfica del lugar (latitud), de la hora del día, del día del año, y de la orientación de la superficie.

La radiación solar directa aporta calor al interior del edificio a través del vidrio, sólo en el caso de que este sea alcanzado directamente por los rayos solares, mientras la radiación difusa aporta calor incluso en el caso de que el vidrio no esté expuesto directamente a los rayos solares.

El vidrio absorbe, según su composición, una pequeña parte de la radiación que sobre él incide ( del 5 al 6 %), reflejando y refractando el resto en proporciones diferentes según sea el ángulo de incidencia.

Para una superficie transparente, la suma de las porciones reflejada, absorbida y transmitida de la radiación que incide sobre ella debe ser la unidad.

La transmitancia, así como la absortancia y la reflectancia son función del ángulo de incidencia, la longitud de onda, índice de refracción  $n$ , y del coeficiente de extinción  $K$  del material en cuestión. Estrictamente hablando,  $n$  y  $K$  son función de la longitud de onda de la radiación considerada, pero para la mayor parte de las aplicaciones de energía solar, pueden considerarse independientes de la longitud de onda.

Para calcular la transmitancia global de una superficie parcialmente transparente y absorbente calcularemos en primer lugar la transmitancia de una superficie no absorbente, es decir, la transmitancia debida únicamente a la reflexión; por otro lado, calcularemos la transmitancia para una superficie no reflectante. El producto de ambas nos dará la transmisión global debida a transmisión y absorción para una superficie parcialmente reflectante y absorbente.

NOMENCLATURA

- $\theta_1$  : Angulo de incidencia.
- $\theta_2$  : Angulo de refracción.
- $\rho$  : Coeficiente de reflexión del suelo (albedo)
- $n_1$  : Indice de refracción del aire.
- $n_2$  : Indice de refracción del medio transparente.
- $\tau_{a,n}$  : Transmitancia resultante de la absorción de n medios transparentes.
- $\tau_{r,n}$  : Transmitancia resultante de la reflexión para n medios transparentes
- $\tau_{g,n}$  : Transmitancia global para n medios transparentes.
- $K$  : Coeficiente de extinción del vidrio.
- $L$  : Espesor del vidrio.
- $A$  : Altura solar.
- $W$  : Azimut solar
- $G$  : Orientación de la superficie respecto del Sur.
- $R$  : Retranqueo
- $h$  : Altura de la ventana.
- $L$  : Anchura de la ventana.

### 3.1 Transmitancia resultante de la reflexión .

La relación de Fresnel para la reflexión de radiación no polarizada que pasa de un medio de índice de refracción  $n_1$ , a otro medio de índice de refracción  $n_2$  es :

$$(19) \quad p = (1/2) \left\{ \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\text{tan}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{tan}^2(\theta_2 + \theta_1)} \right\}$$

donde  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos de incidencia y refracción.

En la expresión (19), los dos términos encerrados entre corchetes representan la reflexión para cada una de las dos componentes de polarización.

Los ángulos  $\theta_1$  y  $\theta_2$  están relacionados con los índices de refracción por la ley de Snell :

$$(20) \quad (n_1/n_2) = (\text{sen } \theta_2 / \text{sen } \theta_1)$$

Una cubierta semitransparente presenta siempre dos caras en las cuales se produce reflexión pues el rayo atraviesa dos veces medios de distinto índice de refracción.

La transmitancia global (despreciando absorción) para un conjunto de  $n$  superficies es :

$$(21) \quad \tau_{r,n} = ( (1-p) / ( 1 + (2n - 1) p ) )$$

Expresión que debe aplicarse a cada una de las componentes de polarización.

La transmitancia para la luz inicialmente no polarizada debe tomarse como promedio de la transmitancia de las dos componentes.

### 3.2 Transmitancia resultante de la absorción .

La absorción de radiación en medios parcialmente transparentes sigue la ley de Bouger que está basada en el supuesto de que la radiación absorbida es proporcional a la intensidad local en el medio y a la distancia que la radiación debe recorrer en él al atravesarlo :

$$(22) \quad \tau_{a,n} = \exp ( - K n L / \cos \theta_2 )$$

### 3.3 Transmitancia global.

La transmitancia global viene dada por el producto de las transmitancias debidas a reflexión y absorción :

$$(23) \quad \tau_{g,n} = \tau_{r,n} \cdot \tau_{a,n}$$

### 3.4. Efecto del retranqueo en ventanas .

Uno de los procedimientos utilizados en Arquitectura para simultanear el aporte energético solar con la época en que dicho aporte es necesario, es el retranqueo de las superficies acristaladas exteriores.

Su efecto es producir una sombra por los muros laterales y el horizontal superior de la ventana sobre el cristal, de modo que se impida que la radiación solar directa penetre en el interior de la habitación. Esta sombra es función de la altura solar, que a su vez depende de la época del año.

En invierno, la altura solar es pequeña, de forma que la radiación solar penetra a través del cristal y disminuye la carga térmica necesaria en un proyecto de calefacción.

En verano, el Sol está muy alto en el horizonte y proyecta una sombra sobre el vidrio que ocupa casi toda su superficie impidiendo así que la radiación directa lo alcance.

#### 3.4.1. Cálculo de la sombra proyectada sobre el cristal, por efecto del retranqueo.

Definida la posición del Sol por su azimut y altura, las relaciones que permiten calcular la sombra proyectada por las paredes de la ventana sobre el vidrio según se ve en la figura 4, son :

$$(24) \quad \tan A = ( y / z ) \quad ; \quad z = ( y / \tan A )$$

$$(25) \quad R = z \cos (W-G) \quad ; \quad z = ( R / \cos (W-g) )$$

Las coordenadas X e Y de la proyección del punto A vienen dadas por:

$$(26) \quad Y = R \tan A / \cos (W-G)$$

$$(27) \quad X = z \sin (W-G) = R \tan (W-G)$$

y la sombra proyectada por el vidrio es :

$$(28) \quad S = X \cdot h + Y \cdot L - X \cdot Y =$$
$$= R \tan (W-G) \cdot h + R \cdot L \cdot \tan A / \cos (W-G) -$$
$$- R^2 \tan A \cdot \tan (W-G) / \cos (W-G)$$

de donde la sombra por unidad de superficie es :

$$(29) \quad S_u = (R/L) \cdot \tan (W-G) + (R/L) \cdot \tan A / \cos (W-G) -$$
$$- ( R^2 / L / h ) \cdot ( \tan A \cdot \tan (W-G) / \cos (W-G) )$$

Las tablas 6, 7, 8 y 9 muestran unos ejemplos de los resultados obtenidos con dicho procedimiento de cálculo.

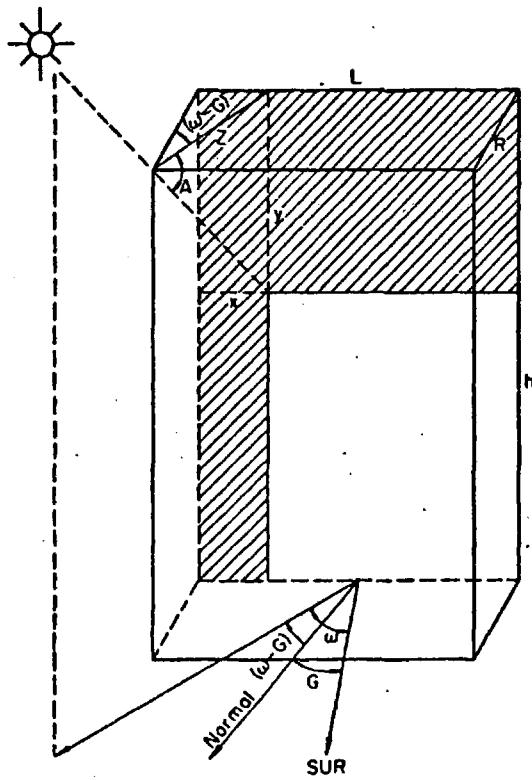


Fig. 4.- Efecto del retranqueo en ventanas.

6.1.1.10

RADIACION GLOBAL DIARIA A TRAVES DE UN VIDRIO SIMPLE

VEHICULO: ANCHO= 2.00 M. ALTO= 2.00 M. RETRANQUEO= 40. CM.

\* PROVINCIA : MADRID

\* LATITUD : 40 24 30

\* SUPERFICIE : VERTICAL

\* UNIDADES : (CAL/CM2.DIA)

ORIENTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	UCT	NOV	DIC	TOTAL ANUAL
0 SUR	86	129	174	201	184	171	176	200	186	141	98	82	55625
10 SE-SW	95	139	182	205	186	172	177	203	192	149	108	93	57837
20 SE-SW	105	149	189	208	186	172	177	206	197	157	117	103	59807
30 SE-SW	113	157	195	212	187	171	177	203	201	166	126	114	61594
40 SE-SW	121	154	200	213	186	170	177	209	204	169	133	123	62927
50 SE-SW	128	171	204	214	185	168	176	209	209	174	140	132	64046
60 SE-SW	135	176	206	213	183	167	174	204	206	173	146	139	64801
70 SE-SW	140	190	208	212	181	164	172	206	206	189	152	146	65283
80 SE-SW	145	193	208	209	178	162	169	203	204	182	156	152	65401
90 E-W	148	195	207	206	174	159	166	199	202	182	159	156	65152
100 NE-NE	151	188	205	201	170	155	162	194	198	182	161	160	64602
110 NE-NE	152	186	201	196	165	151	158	189	193	180	162	162	63685
120 NE-NE	153	183	197	189	159	147	154	182	188	177	162	164	62498
130 NE-NE	152	182	191	182	153	143	149	175	181	173	160	164	60943
140 NE-NE	151	174	184	174	147	138	143	167	174	169	158	163	59148
150 NE-NE	148	173	176	165	140	133	138	159	165	163	159	161	57019
160 NE-NE	145	167	168	155	133	128	132	153	156	156	151	157	54647
170 NE-NE	140	159	158	149	126	123	126	143	146	148	145	153	51943
180 NORTE	135	151	148	134	118	117	119	133	136	140	139	148	49086

INSTITUTO DE OPTICA-C.S.I.C.

TABLA 6

RADIACION GLOBAL HORARIA A TRAVES DE UN VIDRIO SIMPLE

VEHICULO ANCHO= 2.00 M. ALTO= 2.00 M. RETRANQUEO= 40. CM.

PROVINCIA : MADRID LATITUD : 40 24 30

MESES	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	TOTAL DIA
INCLINACION : 90																ORIENTACION SUR-ESTE
JULIANS																(GALICIA-DIA)
ENERO	0	0	96	190	234	235	201	146	85	47	27	5	0	0	0	102
FEBRERO	0	0	160	240	279	267	224	159	95	67	45	19	0	0	0	130
MARZO	0	104	186	263	295	277	228	159	106	88	65	37	11	0	0	152
ABRIL	93	116	199	262	283	270	214	150	124	107	85	57	28	3	0	163
MAYO	46	102	168	213	231	221	180	142	132	117	95	69	41	15	0	151
JUNIO	44	105	163	203	219	209	169	146	136	122	100	75	48	21	0	151
JULIO	53	122	190	235	250	230	181	145	135	120	99	72	44	18	0	162
AGOSTO	88	150	213	271	289	272	209	145	129	112	90	62	34	9	0	171
SEPTIEMBRE	0	142	184	252	278	265	215	151	114	97	74	47	19	0	0	152
OCTUBRE	0	119	152	227	263	250	210	153	95	73	52	26	2	0	0	129
NOVIEMBRE	0	0	135	204	246	242	206	149	88	53	31	10	0	0	0	110
DICIEMBRE	0	0	44	207	255	256	217	156	89	44	24	2	0	0	0	108

INSTITUTO DE OPTICA-C.S.I.C.

TABLE 7

RADIACION GLOBAL HORARIA A TRAVES DE UN VIDRIO SIMPLE

VENTANA: ANCHO= 2.00 M. ALTO= 2.00 M. RETRANQUEO= 40. CM.

PROVINCIA : MADRID

LATITUD : 40 24' 30

MES	INCLINACION : 90															TOTAL DIA
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
UNIDADES :	(WH/M2)															(CAL/CM2.DIA)
ENERO	0	0	33	103	172	232	269	269	232	172	103	33	0	0	135	
FEBRERO	0	0	49	118	188	248	290	290	248	188	118	49	0	0	151	
MARZO	0	11	48	112	179	237	279	279	237	179	112	48	11	0	148	
ABRIL	3	28	57	97	152	204	243	243	204	152	97	57	28	3	134	
MAYO	15	41	69	95	125	160	188	188	160	125	95	69	41	15	118	
JUNIO	21	48	75	100	122	147	169	169	147	122	100	75	48	21	117	
JULIO	18	44	72	98	124	156	185	185	156	124	98	72	44	18	119	
AGOSTO	9	34	62	93	141	191	230	230	191	141	93	62	34	9	130	
SEPTIEMBRE	0	19	48	101	160	214	253	253	214	160	101	48	19	0	136	
OCTUBRE	0	2	45	108	171	225	264	264	225	171	108	45	2	0	140	
NOVIEMBRE	0	0	45	107	176	234	273	273	234	176	107	45	0	0	139	
DICIEMBRE	0	0	16	113	190	256	297	297	256	190	113	16	0	0	148	

INSTITUTO DE OPTICA-C.S.I.C.

TABLA 8

RADIACION GLOBAL HORARIA A TRAVES DE UN VIDRIO DOBLE

VEJFANA: ANCHO= 2.00 M. ALTO= 2.00 M. RETRANQUEO= 40. CM.

PROVINCIA : MADRID

LATITUD : 40 24 30

..... INCLINACION : 90 ..... ORIENTACION SUR-ESTE .....																
HORA SOLAR	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	TOTAL DIA
UNIDADES :	(KWH/M2)														(KCAL/M2-DIA)	
ENERO	0	0	65	132	165	167	144	107	66	41	24	4	0	0		74
FEBRERO	0	0	110	168	198	191	163	120	78	58	39	17	0	0		95
MARZO	0	109	129	186	211	201	169	126	91	76	56	32	9	0		113
ABRIL	92	100	141	187	209	198	163	124	107	93	73	49	24	2		124
MAYO	31	73	122	156	172	168	144	123	114	101	82	60	35	13		118
JUNIO	31	76	119	151	165	158	138	126	117	105	87	65	41	18		120
JULIO	36	76	136	170	184	173	145	125	116	103	85	62	38	16		126
AGOSTO	56	79	150	193	209	200	161	123	111	97	77	54	29	7		130
SEPTIEMBRE	0	76	130	180	201	194	162	121	98	83	64	40	16	0		115
OCTUBRE	0	118	106	161	188	181	155	115	80	63	45	23	2	0		96
NOVIEMBRE	0	0	72	142	174	173	149	119	69	46	24	8	0	0		80
DICIEMBRE	0	0	30	143	178	180	154	113	68	38	21	1	0	0		77

INSTITUTO DE OPTICA-C.S.I.C.

TABLA 9

#### 4 AÑO TÍPICO DE RADIACION SOLAR.

##### 4.1. Introducción.

Uno de los fines primordiales de las técnicas de simulación es la estimación más exacta posible de la actuación futura del sistema estudiado sometido a condiciones reales de funcionamiento.

Una vez establecidas las ecuaciones de balance energético del colector solar, carga térmica y sistema de almacenamiento el procedimiento requiere como entradas datos horarios de radiación solar, temperatura ambiente y velocidad de viento durante un periodo de tiempo determinado.

La simulación no puede hacerse con valores medios ni con datos correspondientes a un año determinado cualquiera, puesto que los datos pueden verse enmascarados por la particularización del año escogido. Para tener garantía de que los resultados son generales, sería necesario simular durante un periodo de tiempo lo suficientemente grande para que sea representativo del tiempo de vida previsto del sistema (20 años).

La elección de un periodo de tiempo amplio no es factible, desde un punto de vista práctico, por dos motivos :

- 1.- En la actualidad son muy escasos los datos horarios de radiación solar.

Actualmente, el Centro Radiométrico Nacional, está montando una red de estaciones donde se realizan medidas con registro continuo de radiación solar global, directa y difusa, además de otras determinaciones de radiación IR solar y atmosférica

radiación UV, periodos de insolación y turbiedad atmosférica. Transcurrido cierto tiempo, estas medidas podrán ser empleadas en programas de simulación de sistemas.

- 2.- Para obtener resultados de los valores óptimos de las distintas variables, es necesario repetir el procedimiento de cálculo para todo el periodo elegido y para distintos valores de cada una de las variables. El tiempo de cálculo requerido para la simulación del comportamiento de un sistema en un periodo de 10 años, se vería multiplicado por un factor 10.

Se plantea por tanto la necesidad de reducir el esfuerzo de cálculo que implica la simulación en un largo tiempo, estableciendo un periodo menor, que sea representativo de todo el periodo. Dicho periodo de tiempo no debe ser inferior a un año, ya que en ciertas instalaciones solares, la carga térmica es mayoritaria en determinadas épocas del año ( calefacción en invierno, climatización de piscinas en primavera y otoño, etc...).

A este año de datos meteorológicos representativo de todo el periodo, le llamaremos "año típico o promedio".

El concepto y necesidad de año típico puede ser comprendido fácilmente en el siguiente simil :

Supongamos que queremos utilizar el agua de lluvia recogida en el tejado de una casa para el suministro de la misma, en la que se ha previsto como almacenamiento un depósito de 2.000 litros de capacidad que dispone de un rebosadero de forma que cuando está lleno, el agua en exceso se pierde. Se considera un consumo diario de 500 litros y se

supone que durante un año se presentan 180 días sin lluvia y los restantes 180 días llueve y se recogen 1.000 litros / día en toda la superficie del tejado.

Vamos a considerar dos secuencias extremas :

Secuencia 1.- 180 días seguidos de lluvia y 180 días sin lluvia.

El depósito, que inicialmente está vacío, queda lleno en 4 días y se mantiene lleno durante todo el primer periodo, perdiéndose 500 litros diarios. Al comenzar la serie de 180 días sin lluvia, el depósito se agotará transcurridos 4 días y será necesario suministrar de una fuente auxiliar :

$$Q_{\text{aux}} = 176 \text{ días} \times 500 \text{ litros} = 88.000 \text{ litros / año.}$$

lo que supone un 49 % del consumo necesario.

Secuencia 2 .- Se suceden alternativamente, un día con lluvia y un día sin lluvia.

El depósito en este caso, se mantendría lleno durante todo el año ya que los 1.000 litros recogidos suplen el consumo de dos días consecutivos.

Para los casos extremos anteriores, la secuencia con que se suceden los días es un factor determinante en el comportamiento global del sistema, ya que con la misma cantidad de agua anual recogida, es necesario un aporte adicional de un 49 % en el primer caso y nulo en el segundo.

Análogamente, en una instalación solar en la que la eficacia de captación es función de la temperatura de entrada del fluido en el colector, al presentarse varios días de alto nivel de radiación, el sistema trabaja a alta temperatura con la consiguiente disminución de la eficacia de captación. La influencia de las secuencias meteorológicas sobre la actuación del sistema será mayor cuanto más extremas sean las series más probables.

El poder utilizar adecuadamente un año "típico" ó "promedio" de datos meteorológicos con un modelo de simulación para estimar el funcionamiento a largo término de un sistema, depende de la sensibilidad del funcionamiento del mismo a secuencias climatológicas horarias y diarias.

Independientemente de como ha sido seleccionado, no puede esperarse que un año promedio tenga la misma secuencia de condiciones atmosféricas que las que ocurren en un largo periodo. Sin embargo, si las secuencias del año típico son representativas de las que ocurren en un periodo largo, o si el sistema no es sensible a las secuencias atmosféricas, el funcionamiento simulado de un sistema para un año típico ó promedio proporcionará una estimación correcta del funcionamiento a largo término.

La determinación de la cantidad de datos meteorológicos necesarios para estimar la actuación de un sistema a largo término, ha sido tratada por diferentes grupos de trabajo :

Hottel and Willier (10) utilizan tres años de datos meteorológicos para extraer conclusiones, aunque consideran que un periodo de 10 años proporcionarían una mejor imagen estadística del proceso.

Liu y Jordan (2), utilizan datos de 5 años para predecir la actuación de sistemas por ellos estudiados. En los más recientes trabajos de simulación (11 al 15) no se han utilizado más de un año de datos meteorológicos, a causa principalmente del tiempo de calculo necesario en un proceso de simulación.

Klein, Beckman y Duffie (16), en el año 1.975 han propuesto la formación del año típico, partiendo de la historia disponible de 8 años, seleccionando aquellos meses cuyo promedio mensual de radiación y temperatura sea más parecido al promedio mensual de los 8 años.

	R	R	R	R	R	R	R	M	M	M	M	N	N	N	N
	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972
1	82	40	97	233	130	41	199	23	58	208	236	-	154	173	154
2	85	205	79	101	46	74	167	194	205	168	205	-	20	127	180
3	53	187	127	137	161	121	185	251	203	209	234	-	88	100	167
4	127	208	212	175	91	43	190	228	47	117	160	-	101	145	220
5	79	41	206	180	109	146	194	251	151	170	184	-	72	47	180
6	61	52	172	169	198	86	189	263	63	243	204	-	68	29	167
7	80	96	112	152	227	201	157	-	32	227	211	-	51	79	129
8	251	160	49	56	202	27	116	202	42	192	172	-	78	129	206
9	158	46	178	78	124	140	122	250	243	191	223	57	54	99	167
10	122	140	31	82	71	112	221	258	87	105	241	57	30	97	140
11	211	62	185	235	154	200	188	49	67	246	218	122	74	81	193
12	251	249	202	238	181	167	131	-	99	233	211	162	105	152	182
13	281	163	196	240	61	53	85	-	39	219	169	78	101	27	39
14	219	34	167	214	62	101	239	-	61	181	207	74	81	86	103
15	248	211	229	224	230	106	138	253	244	235	206	68	154	163	222
16	245	140	146	127	127	91	190	258	110	173	187	211	135	74	52
17	255	155	191	155	51	26	152	143	126	177	209	81	68	-	65
18	209	230	128	131	69	67	162	151	40	70	235	115	54	95	221
19	222	233	76	50	250	121	193	212	117	14	201	61	47	66	51
20	208	127	39	206	208	119	194	199	212	185	237	65	43	95	234
21	270	229	54	113	254	130	212	270	90	43	231	122	88	145	78
22	179	44	79	166	168	134	203	212	124	264	245	101	54	33	194
23	274	55	157	109	152	105	141	259	153	75	228	135	74	87	233
24	287	152	51	134	218	149	217	258	198	260	257	-	65	150	209
25	47	187	92	277	232	164	218	266	173	142	266	142	41	173	221
26	71	180	14	199	246	269	237	227	151	102	271	142	99	129	156
27	98	223	76	212	256	238	217	62	210	232	198	51	135	132	182
28	36	134	147	54	241	295	215	123	214	194	164	57	99	166	157
29	45	95	284	189	248	266	269	62	67	244	173	54	84	71	170
30	158	89	267	99	238	217	183	121	146	234	211	138	194	174	103
31	122	183	262	52	278	233	217	119	198	249	225	211	146	158	235

Unidades : Cal . cm<sup>-2</sup> . dia<sup>-1</sup> . Multiplicando por 41.84 se obtiene KJ . m<sup>-2</sup> . dia<sup>-1</sup>

Tabla 10 .- Datos de Radiación total diaria sobre superficie horizontal, provincia de Madrid, correspondientes al mes de Enero de los años 1958 - 1972 .

#### 4.2. M E T O D O .

En un primer intento, el año típico puede ser determinado partiendo de la historia disponible. Para ello y dada la radiación media mensual calculada a partir de todos los años de historia, sería necesario establecer :

- a) Cuantos días de los distintos niveles de radiación suelen presentarse.
- b) Como suelen sucederse dichos días.

Para la provincia de Madrid, en la actualidad se dispone de valores de radiación global diaria de los años 1.958 al 1.973, medidos por el S.M.N. en tres puntos diferentes de la Capital : Retiro, Moncloa y Junta de Energía Nuclear. La tabla (10) presenta dichos valores para el mes de Enero.

Analizando dichos datos, encontramos que el valor máximo presentado es de  $295 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$  y el mínimo es de  $14 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$ . Dividamos dicho intervalo en 10 partes y clasifiquemos cada día según su nivel de radiación. La tabla (11) presenta dicha clasificación.

La tabla (12) presenta el número de veces que se han presentado cada uno de los tipos de días establecidos. En ésta tabla podemos observar que los resultados presentan una distribución en la que días de ciertos niveles de radiación separados de la media presentan valores más probables que aquellos días de niveles próximos a la media. Para distintos meses y provincias, la distribución vuelve a presentar asimetrías pero en diferentes direcciones, lo cual interpretamos como que la historia disponible no es suficiente.

NIVELES DE RADIACION

XX

3	1	3	8	5	1	7	1	2	7	8	-	5	6	5
3	7	3	4	2	3	6	7	7	6	7	-	1	5	6
2	7	5	5	6	4	7	9	7	7	8	-	3	4	6
5	7	8	6	3	2	7	8	2	4	6	-	4	5	8
3	1	7	6	4	5	7	9	5	6	7	-	3	2	6
2	2	6	6	7	3	7	9	2	9	7	-	2	1	6
3	3	4	5	8	7	6	-	1	8	8	-	2	3	5
9	6	2	2	7	1	4	7	1	7	6	-	3	5	7
6	2	6	3	4	5	4	9	9	7	8	2	2	4	6
4	5	1	3	3	4	8	9	3	4	9	2	1	3	5
8	2	7	8	5	7	7	2	2	9	8	4	3	3	7
9	9	7	8	6	6	5	-	4	8	8	6	4	5	6
10	6	7	9	2	2	3	-	1	8	6	3	4	1	1
8	1	6	8	2	4	9	-	2	6	7	3	3	3	4
9	8	8	8	8	4	5	9	9	8	7	2	5	6	8
9	5	5	5	5	3	7	9	4	6	7	8	5	3	2
9	6	7	6	2	1	5	5	4	6	7	3	2	-	2
7	8	5	5	2	2	6	5	1	2	8	4	2	3	8
8	8	3	2	9	4	7	8	4	1	7	2	2	2	2
7	5	1	7	7	4	7	7	8	7	8	2	2	3	8
10	8	2	4	9	5	8	10	3	2	8	4	3	5	3
6	2	3	6	6	5	7	8	4	9	9	4	2	1	7
10	2	6	4	5	4	5	9	5	3	8	5	3	3	8
10	5	2	5	8	5	8	9	7	9	9	-	2	5	7
2	7	3	10	8	6	8	9	6	5	9	5	1	6	8
3	6	1	7	9	10	8	8	5	4	10	5	4	5	6
3	8	3	8	9	8	8	2	7	8	7	2	5	5	6
1	5	5	2	9	10	8	4	8	7	6	2	4	6	6
2	3	10	7	9	9	10	2	2	9	6	2	3	3	6
6	3	10	4	8	8	7	4	5	8	8	5	7	6	4
4	7	9	2	10	8	8	4	7	9	8	8	5	6	8

XX

Tabla 11.- Clasificación de los valores diarios de radiación solar sobre superficie horizontal, correspondientes al mes de Enero en Madrid, durante los años 1958 - 1972, según su nivel de radiación.

Valores : Máximo = 295      Mínimo = 14      Paso = 28.1

<u>Días de tipo</u>	<u>Intervalo</u>	<u>Número</u>
1	14.0 - 42.1	23
2	42.1 - 70.2	57
3	70.2 - 98.3	47
4	98.3 - 126.4	42
5	126.4 - 154.5	55
6	154.5 - 182.6	54
7	182.6 - 210.7	62
8	210.7 - 238.8	68
9	238.8 - 266.9	38
10	266.9 - 295.0	12

Unidades :  $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$ . Multiplicando por 41.84 se obtiene  $\text{KJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$

Tabla 12 .- Número de días dentro de los distintos grupos establecidos en la tabla 11.

Al intentar determinar la secuencia más probable analizando la historia disponible, nos encontraríamos con mayor problema ya que la historia necesaria sería mayor.

#### 4.3. DETERMINACION DEL AÑO TIPICO MEDIANTE EL VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO.

Contando con la dificultad de que la determinación del año típico a partir de la historia disponible, requeriría una serie de datos mucho mayor de la que se cuenta en la actualidad, podríamos intentar determinarlo mediante un camino diferente.

Para nuestros fines de cálculo, el año de datos meteorológicos buscados debe conducir en el propio programa de simulación a los mismos resultados que el periodo completo de historia disponible. Por lo tanto, podríamos intentar determinar cual de los años disponibles conduce en la propia simulación, a un resultado más próximo al obtenido con todo el periodo, a la vez que obtendríamos información de la dispersión de valores obtenidos con los distintos años, es decir, de la influencia de las secuencias más probables en nuestro país, sobre el comportamiento del sistema.

Para estudiar el problema desde esta óptica notemos que una de las variables de dimensionado que presenta mayor dependencia de la secuencia de series meteorológicas, es el volumen de almacenamiento.

El volumen de almacenamiento óptimo de una instalación depende de 5 factores :

- a) Dimensión de la superficie colectora.
- b) Nivel de temperatura a que se necesita la energía almacenada.
- c) Precio de  $m^2$  de depósito (criterio económico).
- d) Niveles de radiación con los cuales se ha procedido a la simulación.
- e) Secuencias meteorológicas más probables.

Mediante un programa de optimización económica, podríamos determinar el

volumen óptimo con cada uno de los años disponibles para instalaciones de igual dimensionado, nivel de temperatura y precio de depósito.

Supongamos, para mayor sencillez, que los distintos días de los años estudiados pueden ser clasificados en dos grupos según su nivel de radiación:

Para una secuencia del tipo :

1 1 1 1 1 1 ..... 2 2 2 2 2 2.....

se obtendría un volumen de almacenamiento grande, ya que la optimización económica valoraría la energía que puede ser captada y almacenada para varios días.

Si por el contrario, simulamos para una secuencia del tipo :

1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 .....

el volumen de almacenamiento aconsejado sería pequeño, ya que al no ser necesario almacenar más que de un día al siguiente, la valoración del precio del depósito aconsejaría un volumen pequeño.

Si seguimos con el procedimiento de calcular los volúmenes óptimos para diferentes secuencias intermedias entre éstas dos extremas, se obtendrían volúmenes intermedios.

El hecho de que el cálculo del volumen debe hacerse con un intervalo mínimo determinado ( 200 litros) nos dará que un mismo volumen se presentará varias veces.

La figura (5) presenta la distribución de volúmenes obtenidos frente al nº de veces que se han presentado.

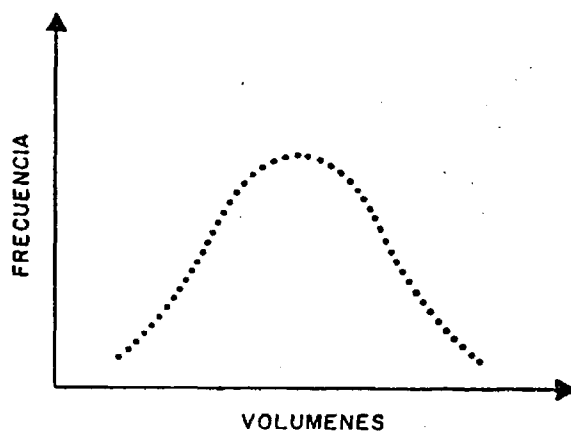


Fig. 5.- Distribución de frecuencias de volúmenes optimos

Todos los volúmenes próximos a la frecuencia máxima, serán los correspondientes a secuencias diferentes pero que a nuestros propósitos conducen a resultados próximos entre ellos, y próximos al obtenido simulando con todo el periodo.

Siguiendo el procedimiento anterior para los diferentes años de historia disponible podríamos elegir como año típico aquel que nos dé un volumen próximo a la media.

Un examen de la fracción de la carga anual suministrada por la energía solar para cada uno de los distintos años, muestra que el funcionamiento de un año al siguiente varia.

En la tabla (13) se reflejan los resultados obtenidos en la simulación de una instalación solar de agua caliente sanitaria, de una carga térmica de  $941 \text{ MJ} \cdot \text{h}^{-1}$  y para una superficie de  $220 \text{ m}^2$  y volumen de 10.000 litros constantes.

La variación del aporte solar, que de un año a otro es muy importante (máximo de 91 % y mínimo de 65 %), es debida a dos factores :

- a) Distintos niveles de radiación presentados por los distintos años.
- b) Distintas secuencias en los mismos.

Para estudiar la influencia de ambos factores por separado y teniendo en cuenta que la radiación media mensual del año típico, debe coincidir con la media de todo el periodo disponible, repetamos el cálculo haciendo que los valores medios mensuales coincidan en todos los años y que únicamente se diferencien entre si en la distribución diaria.

En este caso se obtiene la tabla (14) en la que es de notar que la fracción anual de la carga térmica suministrada por la energía solar, presenta valores más parecidos entre si de un año a otro. Esto nos indica que los niveles de radiación de los distintos años es un factor mucho más importante que la secuencia o sucesión de los distintos días de diferentes niveles de radiación.

Desviaciones del % ES. para V = 10,000 litros

<u>Año</u>	<u>Volumen</u>	<u>% ES.</u>
1970 .....	10,000 .....	73.44
1973 .....	10,000 .....	91.01
1966 .....	10,000 .....	82.74
1965 .....	10,000 .....	89.03
1964 .....	10,000 .....	82.22
1967 .....	10,000 .....	86.01
1958 .....	10,000 .....	86.55
1969 .....	10,000 .....	73.04
1963 .....	10,000 .....	78.38
1961 .....	10,000 .....	83.74
1968 .....	10,000 .....	79.47
1962 .....	10,000 .....	84.30
1960 .....	10,000 .....	79.07
1972 .....	10,000 .....	77.48
1959 .....	10,000 .....	80.73
1971 .....	10,000 .....	65.21
Típico .....	10,000 .....	81.31
.....	.....	.....

Tabla 13 .- Aporte solar a la carga térmica de una instalación de agua caliente sanitaria, simulada con los datos de radiación de los años 1958 al 1973.

Desviaciones de % ES. para V = 10.000 litros

<u>Año</u>	<u>Volumen</u>	<u>% ES.</u>
1970 .....	10.000 .....	83.04
1973 .....	10.000 .....	82.55
1966 .....	10.000 .....	82.50
1965 .....	10.000 .....	82.66
1964 .....	10.000 .....	82.39
1967 .....	10.000 .....	82.36
1958 .....	10.000 .....	82.36
1969 .....	10.000 .....	82.28
1963 .....	10.000 .....	81.82
1961 .....	10.000 .....	82.72
1968 .....	10.000 .....	82.61
1962 .....	10.000 .....	82.44
1960 .....	10.000 .....	81.90
1972 .....	10.000 .....	82.35
1959 .....	10.000 .....	82.29
1971 .....	10.000 .....	81.74
Típico.....	10.000 .....	82.05
.....	.....	.....

Tabla 14.- Aporte solar a la carga térmica de una instalación de agua caliente sanitaria, simulada con los datos de radiación de los años 1.958 al 1.973, con valores medios mensuales iguales a los de todo el periodo.

Los casos estudiados anteriormente, han sido calculados para dimensiones constantes de las variables de dimensionado.

Si procedemos a la determinación de los valores óptimos del volumen de almacenamiento para diversas instalaciones, podemos deducir de las tablas 15, 16 y 17 que los volúmenes obtenidos se distribuyen en un espectro de valores próximos entre sí y que en todas ellas existen 4 años que dan valores iguales a los de todo el periodo. Este hecho se mantiene en todas las instalaciones simuladas.

1ª Instalación ( ( 100 m<sup>2</sup> ) , v = 1.15 , c= 1.17 )

<u>Año</u>	<u>Volumen</u>	<u>% ES</u>
1960 .....	9200 .....	75.19
1958 .....	8700 .....	75.37
1959 .....	9300 .....	75.22
1961 .....	<u>8800</u> .....	75.51
1962 .....	9200 .....	75.68
1963 .....	<u>8800</u> .....	75.01
1964 .....	8500 .....	75.15
1965 .....	<u>8800</u> .....	75.44
1966 .....	8500 .....	75.48
1967 .....	8700 .....	75.39
1968 .....	9000 .....	75.28
1969 .....	<u>8800</u> .....	75.07
1970 .....	8300 .....	75.69
1971 .....	9700 .....	75.04
1972 .....	9200 .....	75.22
1973 .....	8500 .....	75.25
Periodo Completo .....	<u>8800</u>	
.....		

Tabla 15 .- Volumen óptimo y aporte solar a la carga térmica de una instalación de agua caliente sanitaria simulada con los datos de radiación de los años 1958 1973, con los valores medios mensuales iguales a los de todo el periodo.

2ª Instalación ( (100 m<sup>2</sup>) , v = 1.10 , c = 1.17 )

<u>Año</u>	<u>Volumen</u>	<u>% ES</u>
1960 .....	10.000 .....	75.30
1958 .....	9.300 .....	75.45
1959 .....	10.100 .....	75.33
1961 .....	<u>9.600</u> .....	75.13
1962 .....	10.000 .....	75.79
1963 .....	<u>9.400</u> .....	75.10
1964 .....	9.300 .....	75.27
1965 .....	<u>9.400</u> .....	75.13
1966 .....	9.100 .....	75.57
1967 .....	9.300 .....	75.48
1968 .....	9.800 .....	75.39
1969 .....	<u>9.600</u> .....	75.18
1970 .....	9.100 .....	75.80
1971 .....	10.700 .....	75.18
1972 .....	10.000 .....	75.33
1973 .....	9.100 .....	75.34
Periodo completo .....	<u>9.600</u> .....	

Tabla 16 .- Volumen óptimo y aporte solar a la carga térmica de una instalación de agua caliente sanitaria simulada con los datos de radiación de los años 1958 al 1973 , con los valores medios mensuales iguales a los de todo el periodo.

3ª Instalación ( (150 m<sup>2</sup>), v = 1.10 , c = 1.13 )

<u>Año</u>	<u>Volumen</u>	<u>% ES</u>
1970 .....	10.600 .....	87.40
1973 .....	11.600 .....	87.30
1966 .....	11.600 .....	88.88
1965 .....	<u>10.700</u> .....	86.95
1964 .....	10.700 .....	86.72
1967 .....	11.900 .....	86.58
1958 .....	12.000 .....	86.79
1969 .....	<u>12.200</u> .....	86.92
1963 .....	<u>12.400</u> .....	86.08
1961 .....	<u>12.400</u> .....	87.19
1968 .....	12.200 .....	87.17
1962 .....	12.000 .....	86.95
1960 .....	14.400 .....	86.42
1972 .....	14.000 .....	87.03
1959 .....	13.700 .....	86.92
1971 .....	14.100 .....	86.69
Periodo completo .....	<u>12.300</u>	

.....

Tabla 17 .- Volumen óptimo y aporte solar a la carga térmica de una instalación de agua caliente sanitaria simulada con los datos de radiación de los años 1958 al 1973, con los valores medios mensuales iguales a los de todo el periodo.

Según el criterio anteriormente expuesto, uno cualquiera de estos cuatro años podría representar a todo el periodo. El año 1961 es, de entre ellos el que presenta la serie de datos más completa, de forma que lo adoptaremos como año típico para representar las características de Madrid, en lo que a datos de radiación se refiere.

El año típico de temperaturas, que es necesario junto al de radiación solar para representar las condiciones ambientales a que los colectores solares estarán sometidos, debe estar correlacionado con el mismo. El método utilizado en este trabajo ha sido el expuesto en la referencia bibliográfica (17).

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

### PARTE I

#### 1.- Radiación Solar .-

- a) Se ha comprobado que el método de Liu y Jordan puede ser utilizado en España para el cálculo de la exposición global horaria sobre superficies inclinadas, a partir de los datos experimentales de exposición diaria sobre superficie horizontal medidos por el Instituto Nacional de Meteorología.

Se considera de interés, como futura línea de trabajo, la obtención de datos de exposición horaria, en sus componentes directa y difusa, para la obtención de gráficas ( similares a las 1, 2 y 3 ) particularizadas para las condiciones climatológicas españolas.

#### 2.- Año "típico" de radiación solar .-

- b) Se propone como año "típico" ó "promedio" , representativo de la historia disponible de datos de radiación solar, el que queda definido por las siguientes características :

- . Promedios mensuales de radiación.
- . Secuencia de los días con distintos niveles de radiación.

- b) Los promedios mensuales de radiación del año típico deben ser iguales a los calculados como media de todos los años del período.
  
- c) La influencia de las secuencias meteorológicas que suelen presentarse en España ha sido considerada especialmente en este trabajo, concluyéndose que no afectan de forma significativa al comportamiento de una instalación correctamente dimensionada.
  
- d) Se ha demostrado que el año 1961 puede ser elegido como año típico ó promedio de radiación solar, representativo de la historia de datos disponibles en Madrid, puesto que, dicho año, como conjunto de datos de entrada en los programas de simulación conduce a los mismos resultados que la totalidad de datos disponibles relativos a todos los años.

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

P A R T E I

- (1) Liu, B.Y.H., and Jordan R.C. "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation". Solar Energy 4, nº 3, 1 (1960).
- (2) Liu, B.Y.H., and Jordan, R.C. "The long term average performance of flat plate solar energy collectors". Solar Energy 7, nº 2, 53 (1963).
- (3) Sharma, M.R., and Pal, R.S. "Interrelationship between total, direct and diffuse solar radiation in the tropics". Solar Energy 9, nº 4, 183 (1965).
- (4) Heywood, H. "The computation of solar radiation intensities". Solar Energy 10, nº 1, 46 (1965).
- (5) Parmelle, G.V., "Irradiation of vertical and horizontal surfaces by diffuse solar radiation from cloudless skies". Heating, Piping & Air Conditioning , August 1964.
- (6) Valko, P. "Probabilities of sunshine hours accumulated over periods of 2 N 31 consecutive days". Int. Congress. "The Sun in the Service of Mankind". Paris. June 1973 .
- (7) Duffie, J.A., and Beckman, W.A. "Solar Energy Thermal Processes". Wiley, New York. (1974).

- (8) Tricaud, J.F. "Contribution à l'estimation des ressources énergétiques solaires. Ebauche d'un atlas du rayonnement pour la France"  
These Univ. Paris VII. Avril (1976).
- (9) William, R.P., and Clintock, M. "Determining Typical Weather for use in solar energy simulations".  
Solar Energy, 21, 55 (1977).
- (10) Hottel, H.C., and Willier, A. "Evaluation of flat - plate solar collector performance ". Trans. Use Solar Energy, Univ. of Arizona Vol II . Thermal Processes 74 (1955).
- (11) Löf, G.O.G., and Tybout, R.A. "Cost of House heating with Solar Energy " Solar Energy, 14, 253 (1973).
- (12) Buchberg, H., and Roulet, J.R. "Simulation and Optimization of solar collection and storage for house heatings"  
Solar Energy, 12 (1), 1, (1968).
- (13) Butz, L.W., and Beckman, W.A., and Duffie, J.A. <sup>1</sup>  
"Simulation of a solar heating and cooling system "  
Solar Energy, 16, 129 (1974).
- (14) Benseman, R.F., and Cook, F.W. " Solar radiation in New Zealand - the standard year". N.Z.Journal of Science, 12, 689 (1969)

- (15) Conk, R.L., Beckman, W.A., and Duffie, J.A. "Modeling of the CSU heating/cooling system ". Solar Energy 17, 21 (1975).
- (16) Klein, S.A., et al. "A method of simulation of solar processes and its applications". Solar Energy 17, 29 (1975).
- (17) Grupo de trabajo de Energia Solar. División Especial.  
Construcciones Aeronáuticas S.A. " Modelos matemáticos.  
Datos de entrada. Paquete de trabajo nº 606".  
Comunicación personal.

II

**MODELIZACION DE  
COMPONENTES DE  
INSTALACIONES SOLARES**

## II. MODELIZACION DE COMPONENTES DE INSTALACIONES SOLARES

1.— Introducción. Modelización y simulación de instalaciones solares. ....	74
<b>NOMENCLATURA</b> .....	78
2.— Balance energético del colector solar. ....	82
2.1. Base .....	83
2.2. Vidrio .....	84
2.2.1. Absorción de la radiación solar. ....	84
2.2.2. Intercambio energético entre vidrio y placa. ....	86
2.2.3. Intercambio energético entre vidrio y atmósfera. ....	88
2.3. Placa. ....	90
3.— Método de resolución del sistema de funciones no lineales obtenido. ....	94
4.— Estudio de la influencia de las variables de diseño de componentes. ....	95
4.1. Distancia placa-vidrio. ....	96
4.2. Distancia entre tubos. ....	97
4.3. Cociente conductividad/espesor aislamiento base. ....	102
4.4. Producto conductividad-espesor de la superficie absorbente. ....	104
4.5. Coeficiente de transferencia de calor en el interior de los tubos. ....	105
4.6. Coeficiente de extinción de la superficie transparente. ....	106
4.7. Selectividad de la superficie absorbente. ....	107
4.8. Coeficiente de conductividad en soldadura. ....	109
4.9. Coeficiente de albedo. ....	110

<b>5.— Descripción de las instalaciones de la Planta Experimental de Energía Solar de Arganda del Rey.</b> .....	<b>112</b>
<b>5.1. Instalaciones y equipos.</b> .....	<b>114</b>
<b>5.2. Laboratorio y taller.</b> .....	<b>114</b>
<b>5.3. Explanada exterior de experimentación</b> .....	<b>114</b>
<b>5.4. Instalación de agua caliente sanitaria.</b> .....	<b>119</b>
<b>5.5. Instalación de calefacción.</b> .....	<b>123</b>
<b>5.6. Climatización de piscinas.</b> .....	<b>127</b>
<b>Conclusiones.—</b> .....	<b>129</b>
<b>Biografía.—</b> .....	<b>134</b>

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

### 1.- MODELIZACION Y SIMULACION DE INSTALACIONES SOLARES .

La técnica de modelización de un proceso complejo consiste en representar la actuación de cada uno de los elementos componentes del sistema mediante un cierto número de ecuaciones algebraicas o diferenciales, en nuestro caso ecuaciones de balance energético, que en general están ligadas entre si por un determinado número de incógnitas y por la variable tiempo. La resolución simultánea del sistema, nos proporcionará información sobre el comportamiento dinámico del mismo como respuesta a las condiciones meteorológicas a que está sometido.

La simulación dinámica mediante cálculo en ordenador, tiene una importante aplicación en el diseño de instalaciones solares, ya que su uso puede contribuir a una utilización racional de los componentes y a reducir considerablemente el tiempo y costo de una larga investigación a plena escala. (18, 19 y 20).

Las técnicas de simulación pueden ser utilizadas para tres diferentes propósitos :

- 1.- Proporcionar información sobre la actuación dinámica de sistemas específicos, sometidos a las condiciones meteorológicas pre-  
visibles.

Este tipo de análisis puede ser utilizado para variedad de propósitos, tales como determinar el aporte solar a la carga térmica requerida, prever temperaturas extremas del sistema, obtener información sobre las interrelaciones dinámicas de los diferentes componentes, etc...

- 2.- La simulación puede ser utilizada directamente como utensilio de diseño en determinadas aplicaciones.

Su uso para éste propósito se requiere a veces para el diseño de grandes o complejos sistemas, como calefacción de grandes edificios, instalaciones industriales, etc...

- 3.- Los métodos de simulación pueden ser utilizados para estudios generalizados de diseño.

Los resultados de muchas simulaciones permiten obtener curvas generalizadas de diseño, que relacionan el funcionamiento de un tipo particular de sistema con los parámetros de diseño y condiciones atmosféricas.

La aplicación de estas técnicas de simulación a los procesos solares permite, en consecuencia, el estudio del comportamiento dinámico de un gran número de sistemas diferentes entre sí, pero basados en los mismos componentes dimensionados de formas diferentes, lo que nos conducirá a un conocimiento cualitativo y cuantitativo del efecto producido por variaciones en cada una de las variables físicas de diseño sobre el comportamiento dinámico del sistema. Estas variables de diseño pueden incluir la selectividad de la superficie absorbente, el espesor del aislamiento, la dimensión de la superficie colectora, etc...

Las variables a estudiar pueden dividirse en dos grupos que serán tratados separadamente :

- . VARIABLES DE DISEÑO DE COMPONENTES.
- . VARIABLES DE DIMENSIONADO DE INSTALACIONES.

Se consideran en ésta segunda parte de la Tesis las variables de diseño de componentes, es decir, todas aquellas variables que no dan una dimensión específica a la instalación, y estudiaremos su influencia sobre la actuación dinámica del sistema reflejada en el rendimiento anual de la instalación y en el aporte solar a la carga térmica del sistema.

Estas variables son :

- Placa absorbente :

- . Coeficiente de conductividad en soldadura.
- . Selectividad de la superficie absorbente.
- . Espesor
- . Resistividad térmica del contacto placa-tubo
- . Distancia entre tubos.
- . Coeficiente de transferencia de calor en el interior de los tubos.

Cubierta transparente :

- . Coeficiente de extinción.
- . Distancia Placa cubierta.

Aislamiento :

- . Cociente conductividad espesor aislamiento base.

Medio ambiente :

- . Coeficiente de reflectividad del suelo.

Como variables de dimensionado consideraremos :

- . Dimensión de la superficie colectora.
- . Inclinación.
- . Volumen de almacenamiento.

El criterio de optimización para su estudio debe ser un criterio técnico - económico que nos permita encontrar los sistemas de mínimo costo y por tanto de óptimo diseño. Las variables de dimensionado serán tratadas en la tercera parte de esta Tesis.

NOMENCLATURA

- $A_c$  : Superficie colectora.
- $H_I$  : Componente directa de la exposicion horaria sobre superficie horizontal.
- $R_I$  : Factor de conversión de la exposición directa al plano del colector.
- $(\tau\alpha)_I$  : Producto transmitancia absortancia para la radiación directa.
- $H_d$  : Componente difusa de la exposicion horaria sobre superficie horizontal.
- $R_d$  : Factor de conversión de la exposicion difusa a plano del colector.
- $(\tau\alpha)_d$  : Producto transmitancia absortancia para la radiación difusa.
- $Q_u$  : Calor útil extraido de los colectores por el fluido caloriportor
- $Q_{los}$  : Pérdidas de calor en la instalación.
- $Q_s$  : Cantidad de energia almacenada en los colectores.
- $Q_{cond}^b$  : Pérdidas de calor por conducción en la base.
- $Q_{conv}^b$  : Pérdidas de calor por convección en la base.
- $Q_{rad}^b$  : Pérdidas de calor por radiación en la base.
- $Q_{rad}^{p-c}$  : Intercambio energético por radiación entre placa y cubierta transparente.
- $Q_{conv}^{p-c}$  : Intercambio energético por convección entre placa y cubierta transparente.
- $Q_{rad}^{c-sk}$  : Intercambio energético por radiación entre la cubierta transparente y medio ambiente.

- $Q_w^{c-amb}$  : Intercambio energético por convección (viento) entre cubierta transparente y medio ambiente.
- $Q_{carga}$  : Carga térmica necesaria.
- $T_c$  : Temperatura de la cubierta transparente.
- $T_p$  : Temperatura media de la superficie absorbente.
- $T_b$  : Temperatura base colector.
- $T_a$  : Temperatura ambiente.
- $T_{sk}$  : Temperatura equivalente del cielo a efectos de radiación.
- $T_{in}$  : Temperatura de entrada del fluido caloriportor.
- $\bar{T}$  : Temperatura media entre la de la superficie absorbente y cubierta transparente.
- $T_f$  : Temperatura final del intervalo horario.
- $T_i$  : Temperatura inicial del intervalo horario.
- $K$  : Coeficiente de conducción aislamiento base.
- $X$  : Espesor de aislamiento base.
- $h_1$  : Coeficiente de convección natural.
- $\epsilon_b$  : Emisividad de la superficie base.
- $\epsilon_c$  : Emisividad de la cubierta transparente.
- $\epsilon_p$  : Emisividad de la superficie absorbente.
- $\sigma$  : Constante de Stefan Boltzmann =  $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$
- $\theta$  : Ángulo de incidencia de la radiación directa con la normal al plano colector.

- A : Altura Solar.
- $H_h^I(s,g)$  : Exposición solar directa horaria sobre superficie con inclinación  $s$  y orientación  $g$ .
- $H_h^I(0,0)$  : Exposición solar directa horaria sobre superficie horizontal.
- $R_I(\text{abs})$  : Porción de la radiación solar directa absorbida por la cubierta.
- $\tau_I(\text{abs})$  : Transmitancia debida a absorción para la radiación directa.
- $H_h^D(s,g)$  : Exposición difusa horaria sobre superficie  $(s,g)$ .
- $H_h^D(s,g)$  : Exposición difusa horaria sobre superficie horizontal.
- $\tau_d(s,g)$  : Transmitancia debida a absorción para la radiación difusa.
- $s$  : Inclinación del plano colector.
- $g$  : Orientación del plano colector respecto del SUR.
- $\rho$  : Coeficiente de reflexión del suelo (albedo).
- $R_D(\text{abs})$  : Porción de la radiación solar difusa absorbida por la cubierta.
- $R_T(\text{abs})$  : Porción de la radiación solar global absorbida por la cubierta.
- $F_{12}$  : Factor de forma entre placas paralelas.
- $h_2$  : Coeficiente de convección entre la superficie absorbente y la cubierta transparente.
- $h_{10}$  : Coeficiente de convección entre placas cuya diferencia de temperaturas es de  $10^\circ\text{C}$ .
- $h_T$  : Coeficiente de convección entre dos placas cuya diferencia de temperaturas es de  $T^\circ\text{C}$ .

$N_u$	:	Número de Nusselt
$Gr$	:	Número de Grashof
$v$	:	Velocidad del viento.
$R_{p-f}$	:	Resistividad térmica placa fluido.
$F_R$	:	"Heat Removal Factor" , "factor de transporte de calor".
$U_L$	:	Coefficiente global de pérdidas del colector solar.
$F'$	:	Factor de eficiencia del colector.
$S$	:	Cantidad de energía absorbida por unidad de área.
$G$	:	Caudal de paso por $m^2$ de colector solar.
$C_p$	:	Calor específico del fluido caloriportor.
$D$	:	Diámetro exterior de tubo
$D_i$	:	Diámetro interior de tubo.
$W$	:	Distancia entre tubos.
$C_b$	:	Coefficiente de conducción en soldadura.
$h_{f,i}$	:	Coefficiente de transferencia de calor entre tubo y fluido.
$d$	:	espesor de placa.
$k$	:	Coefficiente de conducción de placa.
$M$	:	Masa de fluido en la unidad de acumulación.
$C_{pdp}$	:	Calor específico del fluido contenido en la unidad de almacenamiento.

## 2.- Balace energético del colector solar .

Los componentes esenciales de un colector solar plano son : una superficie negra absorbente, cuya misión es captar la radiación solar y transmitirla al fluido caloriportor, una o mas cubiertas transparentes a la radiación solar que evita pérdidas de calor por convección y radiación (efecto invernadero) y aislamiento térmico en su cara no activa, que evita pérdidas por conducción.

El funcionamiento de un colector solar plano queda descrito por su balance energético que expresa que la radiación que sobre él incide, amortiguada por la transmisión del vidrio y por la absorción de la placa, y una vez convertida en calor, se invierte en diversas pérdidas de calor por conducción, convección y radiación y en un calor útil que es transferido al fluido caloriportor.

Dicho balance puede expresarse como :

$$(30) \quad A_c \left( (H R (\tau \alpha))_I + (H R (\tau \alpha))_O \right) = Q_u + Q_{Los} + Q_s$$

Esta ecuación, que representa el comportamiento global del panel, puede ser sustituida por un sistema de tres funciones no lineales que una vez resuelto y conocidos los valores de las incógnitas : temperatura placa, base y cubierta, nos permitirá conocer las pérdidas de calor por las distintas partes del panel así como el calor útil extraído por el fluido en circulación.

Este sistema de funciones no lineales se obtiene al plantear el balance

energético de cada una de las tres capas antes mencionadas.

2.1. Base.-

La cantidad de calor que pierde la placa colectora a través del aislamiento posterior debe ser igual a las pérdidas en la base por mecanismos combinados de convección y radiación (21).

$$(31) \quad Q_{\text{cond}}^b = (K/X) (T_p - T_b)$$

$$(32) \quad Q_{\text{conv}}^b = h_1 (T_b - T_a)$$

$$(33) \quad Q_{\text{rad}}^b = \epsilon_b \sigma (T_b^4 - T_a^4)$$

Puesto que en régimen estacionario, el calor que atraviesa el aislante debe ser igual al perdido por radiación y convección en la cara posterior, se obtiene la 1ª ecuación de balance energético.

$$(34) \quad Q_{\text{cond}}^b = Q_{\text{conv}}^b + Q_{\text{rad}}^b$$

es decir :

$$(35) \quad (K/X) (T_p - T_b) = h_1 (T_b - T_a) + \epsilon_b \sigma (T_b^4 - T_a^4)$$

## 2.2. Vidrio .-

El balance energético en el vidrio se plantea de forma que la energía que recibe por absorción de la radiación solar directa y difusa, mas la energía que recibe de la placa colectora por convección y radiación, en regimen estacionario, debe ser igual a la que pierde hacia el medio ambiente y atmósfera por radiación y convección.

### 2.2.1. Absorción de la radiación solar.-

La absorción de la radiación solar depende del ángulo de incidencia. La radiación directa presenta un ángulo de incidencia perfectamente definido por la posición relativa del colector y del Sol. La radiación difusa, supuesta isótropa, presenta todos los ángulos de incidencia comprendidos entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , por lo cual debe ser tratada separadamente de la radiación directa.

La exposición directa horaria en plano inclinado viene dada por :

$$(36) \quad H_h^I(s,g) = H_h^I(0,0) \cdot (\cos \theta / \sin A)$$

y la porción de la misma que es absorbida por el vidrio :

$$(37) \quad R_I(\text{abs}) = H_h^I(0,0) \cdot (\cos \theta / \sin A) (1 - I(\text{abs}))$$

donde  $I(\text{abs})$  es la transmitancia debida a absorción en el vidrio.

La exposición difusa horaria en plano inclinado viene dada (22) por :

$$(38) \quad H_h^D(s,g) = H_h^D(0,0) \left( \frac{1 + \cos s}{2} \right) + \\ + \left( H_h^I(0,0) + H_h^D(0,0) \right) \left( \frac{1 - \cos s}{2} \right) \cdot \rho$$

de donde la porción de radiación difusa absorbida por el vidrio :

$$(39) \quad R_D(\text{abs}) = H_h^D(s,g) (1 - \bar{\tau}_d(\text{abs}))$$

siendo  $\bar{\tau}_d(\text{abs})$  la transmitancia media debida a absorción, para la radiación difusa.

La energía absorbida por el vidrio, será la suma de ambos factores :

$$(40) \quad R_T(\text{abs}) = R_I(\text{abs}) + R_D(\text{abs})$$

2.2.2. Intercambio energético entre vidrio y placa.-

• Radiación.- (23)

El intercambio de radiación entre dos placas paralelas viene dado por la expresión :

$$(41) \quad q_{\text{rad}}^{p-c} = \frac{\sigma (T_p^4 - T_c^4)}{((1-E_p)/E_p) + (A_p/A_c) [(1-E_c) + (1/F_{12})]}$$

Para representar el intercambio radiativo entre la superficie absorbente y la cubierta transparente, se supone que ambas superficies son grises y reflectores difusos, y que los defectos bordes pueden ser — despreciados.

• Convección.- (25)

El intercambio energético por convección viene dado por la expresión:

$$(42) \quad q_{\text{conv}}^{p-c} = h_2 (T_p - T_c)$$

donde el coeficiente de película  $h_2$  viene dado por :

$$(43) \quad h_2 = 1.14 ((\Delta T)^{0.31}) / (L^{0.07}) \quad \text{W / m}^2$$

para placas cuya diferencia de temperaturas es de 10°C. Para otras temperaturas, es necesario usar el factor de corrección definido por:

$$(44) \quad (h_T / h_{10}) = 1 - 0.0018 (T - 10)$$

Este coeficiente puede ser obtenido de las relaciones:

- Planos inclinados  $45^\circ$ , flujos por arriba y  $10^4 < Gr < 10^7$

$$(45) \quad N_u = 0.093 (Gr)^{0.31}$$

- Planos horizontales, flujo ascendente y  $10^4 < Gr < 10^7$

$$(46) \quad N_u = 0.152 (Gr)^{0.281}$$

- Planos verticales y  $1.5 \cdot 10^4 < Gr < 1.5 \cdot 10^5$

$$(47) \quad N_u = 0.033 (Gr)^{0.381}$$

- Planos verticales y  $1.5 \cdot 10^5 < Gr < 1.5 \cdot 10^7$

$$(48) \quad N_u = 0.062 (Gr)^{0.327}$$

2.2.3. Intercambio energético vidrio - atmósfera .-

. Radiación. (24)

El intercambio de radiación del vidrio con el conjunto ambiente - atmósfera viene dado por :

$$(49) \quad q_{\text{rad}}^{\text{c-sk}} = \epsilon_c \sigma (T_c^4 - T_{\text{sk}}^4)$$

donde la temperatura equivalente de la atmósfera viene dada por :

$$(50) \quad T_{\text{sk}} = 0,0552 T_a^{1,5}$$

. Convección.

Las pérdidas del vidrio por convección a causa del viento a que está sometido el colector solar (24), vienen dadas por la expresión:

$$(51) \quad q_w^{\text{c-amb}} = (5,7 + 3,8 v) (T_c - T_a) \quad \text{W / m}^2$$

donde  $v$  es la velocidad del viento dada en  $\text{m / sg}$ .

El balance energético en el vidrio debido a las expresiones anteriores es :

$$(52) \quad R_T(\text{abs}) + h_2 (T_p - T_c) + \left( \frac{\sigma (T_p^4 - T_c^4)}{\left( \frac{(1-E_p)}{E_p} \right) + (A_p/A_c) \left( \frac{(1-E_c)}{E_c} \right) + (1/F_{12})} \right) =$$
$$= (5.7 + 3.8 v) (T_c - T_a) + \epsilon \sigma (T_c^4 - T_{sk}^4)$$

que constituye la segunda ecuación implícita del sistema.

2.3. Placa .-

La temperatura media de la placa  $T_p$  viene dada, en función de la temperatura media de fluido (26), por la expresión :

$$(53) \quad T_p = T_f + Q_u R_{p-f}$$

donde la temperatura media de fluido, puede expresarse en función de la temperatura de entrada por :

$$(54) \quad T_f = T_{in} + ((Q_u / A_c) / (F_R U_L)) \cdot (1 - (F_R / F'))$$

donde :

$$(55) \quad Q_u = A_c F_R (S - U_L (T_{in} - T_a))$$

El factor  $F_R$  (Heat Removal Factor), viene dado por la expresión :

$$(56) \quad F_R = (G C_p / U_L) \cdot (1 - \exp(-(U_L F' / G C_p)))$$

y  $F'$ (factor de eficiencia del colector) por :

$$(57) \quad F' = \frac{1 / U_L}{W \left( \frac{1}{U_L (D + (W-D) F)} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{(D_i h_{f,i})} \right)}$$

donde :

$$(58) \quad F = \frac{\tanh m (W-D) / 2}{m (W-D) / 2}$$

siendo :

$$(59) \quad m^2 = U_L / K \delta$$

La expresión (53) representa el balance energético en la placa y constituye la tercera ecuación del sistema.

El balance energético de cada una de las tres partes constituyentes del panel, que están en contacto térmico mutuo y con el medio ambiente nos proporciona un sistema de tres ecuaciones implícitas en :  $T_c$ ,  $T_b$  y  $T_p$ , que son :

$$(60) \quad (K/X) (T_p - T_c) = h_1 (T_b - T_a) + \epsilon_b \sigma (T_b^4 - T_a^4)$$

$$(61) \quad R_T(\text{abs}) + h_2 (T_p - T_c) + \left( \frac{\sigma (T_p^4 - T_c^4)}{((1-E_p)/E_p) + (A_p/A_c) ((1-E_c)/E_c) + (1/F_{12})} \right) =$$

$$= (5.7 + 3.8 v) (T_c - T_a) + \epsilon \sigma (T_c^4 - T_a^4)$$

$$(62) \quad T_{mp} = T_{in} + \left( \frac{Q_u}{A} \right) / (U_L F_R) (1 - (F_R/F_c)) + Q_u R_{p-f}$$

cuya dependencia temporal viene dada por la dependencia temporal de la temperatura de entrada del fluido en el colector.

⋮

Simultáneamente, el balance energético del sistema de acumulación nos da la dependencia temporal de la temperatura de entrada del fluido caloriportor en los colectores solares. Dicho balance energético puede ser expresado como que la cantidad de energía que él mismo admite (calor útil procedente de todos los paneles), menos la porción de la carga térmica que el sistema es capaz de suministrar, y menos las pérdidas térmicas debidas al propio depósito y tuberías, se invierte en aumentar o disminuir la temperatura del mismo.

Dicho balance energético de la unidad de acumulación se expresa como:

$$(63) \quad Q_{u,c} - Q_{carga} - Q_{los} = M C_{pdp} (T_f - T_i)$$

a partir de la cual podemos calcular la temperatura final de cada intervalo horario, que será la inicial para el intervalo siguiente.

3.- METODO DE RESOLUCION DEL SISTEMA DE FUNCIONES NO LINEALES OBTENIDO.

Para la resolución del sistema de funciones no lineales obtenido, se ha aplicado el método de la secante ya que existen acotaciones sobre los márgenes en que pueden ser encontradas las soluciones (26).

El método de la secante consiste en que dada una función  $y = f(x)$  de la que se conocen dos soluciones aproximadas  $X_1$  y  $X_2$ , siendo  $Y_1$  e  $Y_2$  los valores de la función para estas soluciones, una mejor solución  $X_3$  puede ser encontrada mediante la expresión:

$$(64) \quad X_3 = \left( \frac{Y_2}{(Y_2 - Y_1)} \right) X_1 + \left( \frac{Y_1}{(Y_1 - Y_2)} \right) X_2$$

que puede ser aplicada reiteradamente mediante la expresión:

$$(65) \quad X_{i+1} = \left( \frac{Y_i}{(Y_i - Y_{i-1})} \right) X_{i-1} + \left( \frac{Y_{i-1}}{(Y_{i-1} - Y_i)} \right) X_i$$

Expresión, que puede ser aplicada reiteradamente hasta encontrar una solución  $X_i$  que anule la función  $Y = f(x)$  con un cierto error  $\epsilon$ .

#### 4.- ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE DISEÑO DE COMPONENTES .

Una vez representada la actuación dinámica del colector solar, la carga térmica y la unidad de almacenamiento mediante el sistema de funciones no lineales anteriormente determinado , es posible simular el funcionamiento de la instalación sometida a las condiciones atmosféricas dadas por el año típico de radiación y temperatura. Este proceso de simulación se aplica a un conjunto de valores de las variables de entrada, que nos indiquen la tendencia de las prestaciones de la instalación con valores crecientes de las mismas.

En este trabajo, se ha estimado que el parámetro que mejor refleja las prestaciones de la instalación es el aporte solar a la carga térmica, es decir, la fracción anual de la carga térmica suministrada por la instalación solar. Dicho parámetro ha sido seleccionado como representativo del comportamiento dinámico de la instalación.

Las conclusiones que se deducen de las gráficas que se muestran a continuación, han sido obtenidas mediante el método de cálculo expuesto en los apartados 2 y 3 de esta segunda parte de la Tesis.

Los diferentes tipos de componentes de la instalación solar planteada, han sido caracterizados por los valores de las variables de entrada y su actuación ha sido simulada durante un año típico de radiación y temperaturas.

4.1. Distancia placa-vidrio.-

La gráfica 17 muestra la variación del aporte solar a la carga térmica necesaria, con la distancia entre placa y vidrio del panel.

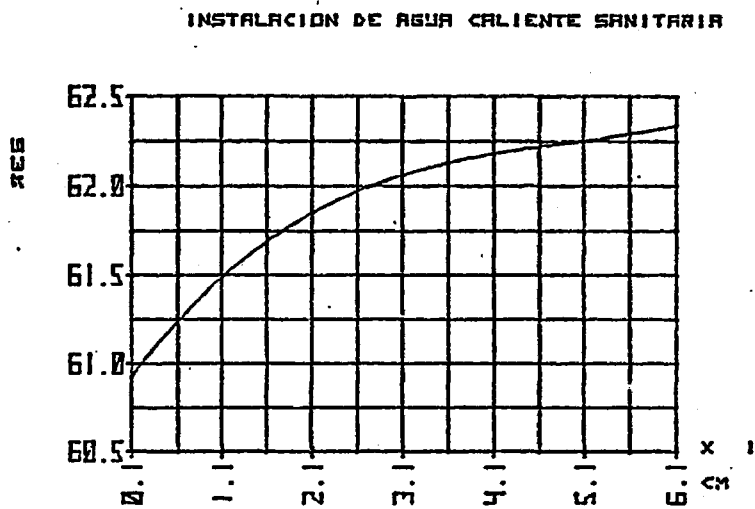
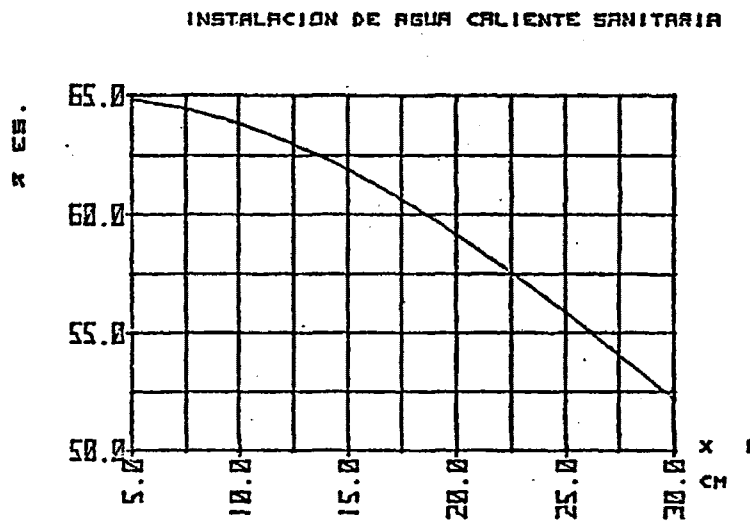


Fig. 17 VARIACION DEL APORTE SOLAR CON LA DISTANCIA PLACA-VIDRIO

De ella se deduce que dicha variable no produce importantes efectos sobre el funcionamiento de la instalación, ya que para distancias comprendidas entre 1 y 5 cm. el aporte solar sólo varía de 61.5 % a un 62.5 %. Según la literatura sobre el tema, otros factores (constructivos, efectos de sombra, etc. ...), recomiendan distancias comprendidas entre 3 y 4 cm., para dicha variable.

4.2. Distancia entre tubos.-

La figura 18 muestra la variación del aporte solar a la carga térmica con la distancia entre tubos, para un colector de estructura tubular, soldada a la placa absorbente.



**Fig. 18 VARIACION DEL APOSTE SOLAR  
CON LA DISTANCIA ENTRE TUBOS**

En este tipo de colectores, el calor captado por la superficie absorbente debe transmitirse por conducción hasta la zona de soldadura a través de varios cm. Este hecho motiva un gradiente de temperaturas desde la distancia media entre tubos a la base de los mismos, cuya intensidad depende del coeficiente de conducción del material empleado y el espesor del mismo. Fig. 19 y 20

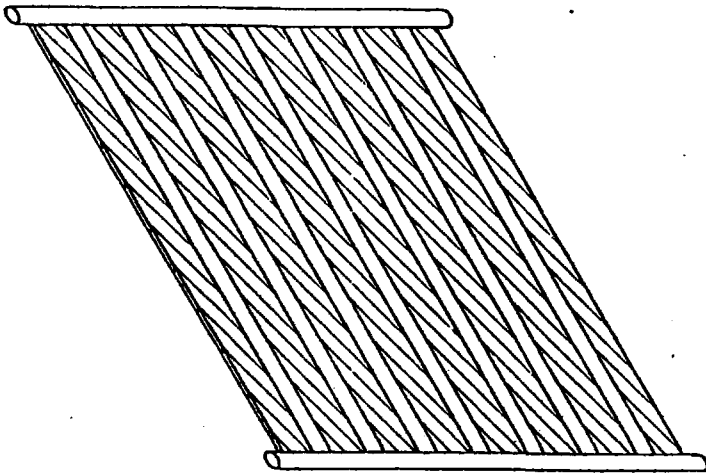


Fig 19. Placa colectora estructura tubular.

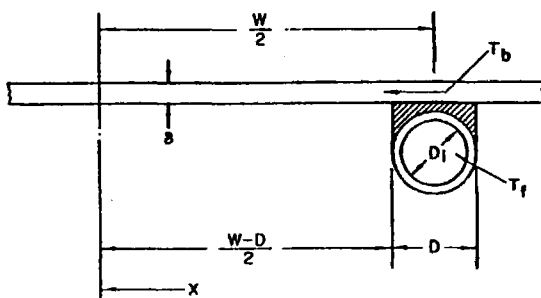
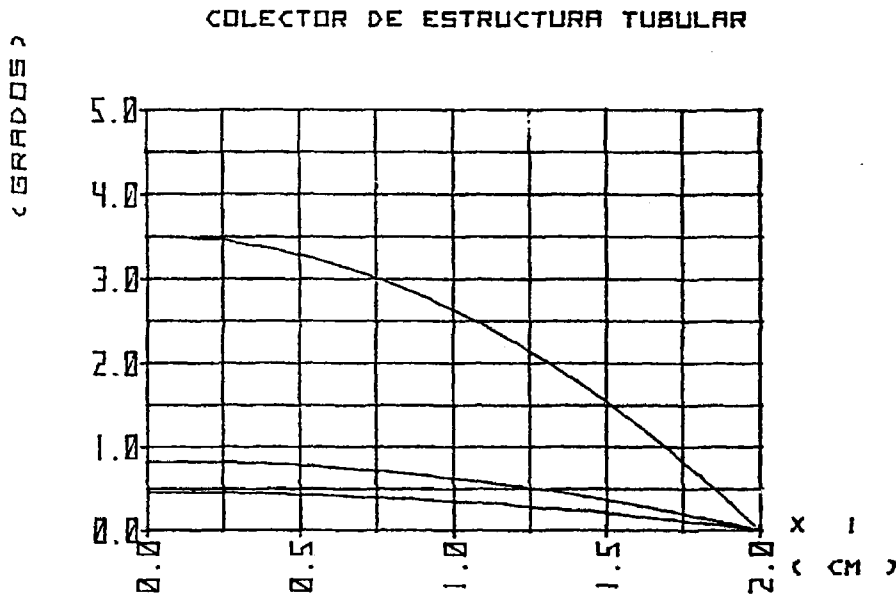


Fig.20 . Sección placa colectora estructura tubular

La distribución de temperaturas entre tubos (25), viene dada por la expresión:

$$(66) \quad T(x) = T_a + S/U_L + (T_b - T_a - S/U_L) \cdot \frac{\cosh mx}{\cosh m(W-D)/2}$$

Las gráficas 21, 22 y 23 muestran su variación para tres metales: cobre, aluminio y acero, y para distancias entre tubos de 6, 12, y 18 cm. El diámetro exterior D, y el espesor de la placa, han sido supuestos constantes e iguales a 2 cm. y 0.5 mm. respectivamente.



**FIG. 21** DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS ENTRE TUBOS PARA COBRE, ALUMINIO, Y ACERO ((W-D)=4 CM)

COLECTOR DE ESTRUCTURA TUBULAR

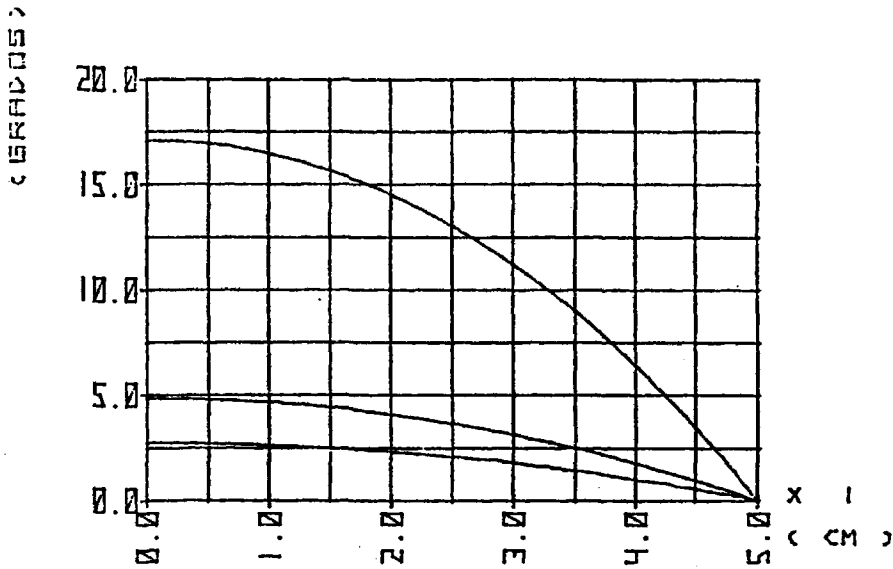


FIG 22. DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS ENTRE TUBOS PARA COBRE, ALUMINIO, Y ACERO ((W-D)=10 CM)

COLECTOR DE ESTRUCTURA TUBULAR

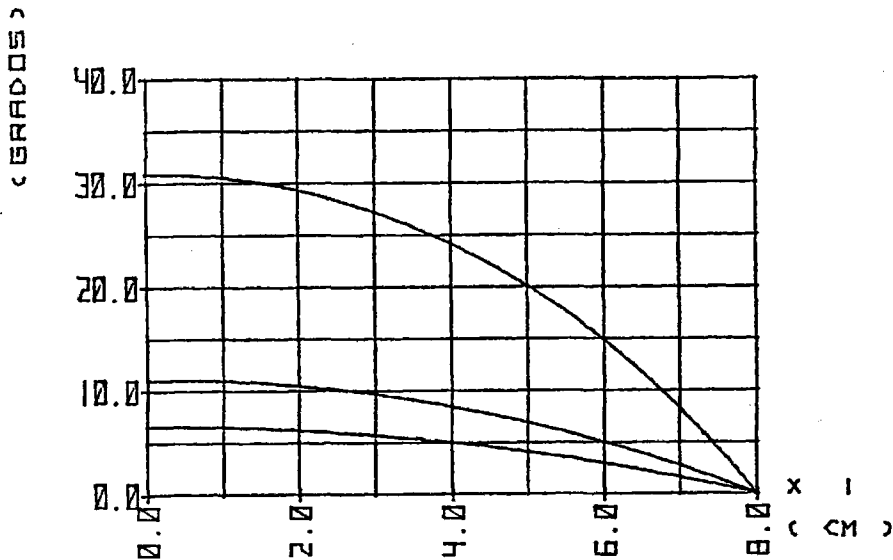


FIG 23. DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS ENTRE TUBOS PARA COBRE, ALUMINIO, Y ACERO ((W-D)=16 CM)

De ellas se deducen los siguientes valores para la diferencia de temperaturas entre la posición intermedia, y la zona de soldadura:

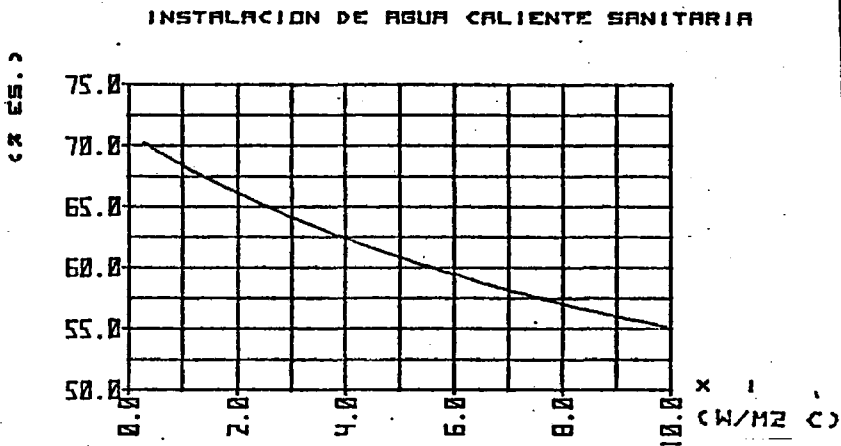
<u>distancia entre tubos</u>	<u>Cobre</u>	<u>Aluminio</u>	<u>Acero</u>
6 cm.	0.45 °C	0.8 °C	3.5 °C
12 cm.	2.7 °C	4.9 °C	17.0 °C
18 cm.	6.5 °C	12.0 °C	31.0 °C

Para materiales de bajo coeficiente de conducción, el gradiente de temperaturas formado ocasiona que gran parte de la superficie absorbente alcance el equilibrio termodinámico a una temperatura muy superior a la del fluido que circula por los tubos, con el consiguiente aumento de las pérdidas por convección y radiación.

Este tipo de configuración debe ser utilizado con metales de alto coeficiente de conducción (cobre o aluminio) o con una pequeña distancia entre tubos para metales de bajo coeficiente de conducción (acero).

4.3. Influencia del cociente K/esp. aislamiento base.-

La figura 24 muestra la variación del aporte solar a la carga térmica con el cociente entre la conductividad y espesor de aislamiento de la base.

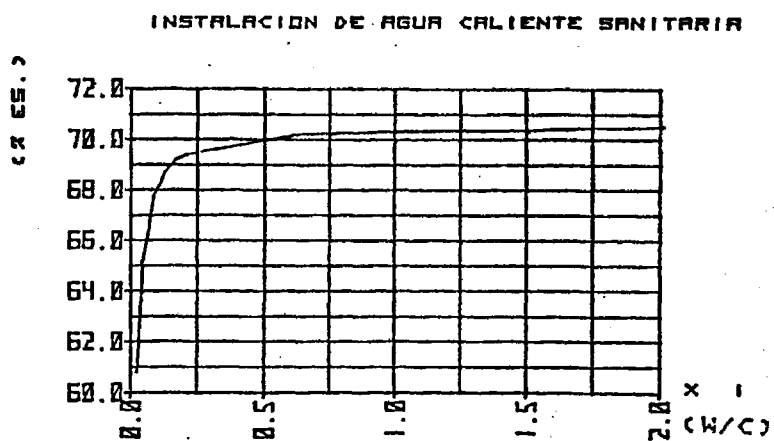


**FIG 24 VARIACION DEL APORTE SOLAR CON EL COCIENTE K/ESP. DE AISLANTE BASE**

Para valores usuales de aislamiento :  $K = 0,034 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$  para el poliexti  
reno expandido, o de  $K = 0,024 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$  para el poliuretano rígido, el espe  
sor de aislamiento óptimo oscila entre 3 y 5 cm.

4.4. Influencia del producto conductividad . espesor de la placa.-

La figura 25 muestra la variación del aporte solar a la carga térmica con la variación del producto conductividad espesor de la superficie absorbente.



**FIG 25** VARIACION DEL APORTE SOLAR CON EL PRODUCTO K\*ESP. DE LA CHAPA COLECTORA

De ella se deduce que valores inferiores a  $0.1 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$  producen un importante descenso del aporte solar, lo que hace que dichos valores no sean aconsejables. El intervalo óptimo está comprendido entre los valores de  $0.1$  y  $0.2 \text{ W/}^{\circ}\text{C}$ . Para el cobre cuya conductividad es de  $385 \text{ W/m/}^{\circ}\text{C}$ , este intervalo corresponde a espesores de  $0.26$  y  $0.52 \text{ mm}$ . Para el aluminio cuya conductividad es de  $211 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}$ , los valores son de  $0.5$  y  $0.95 \text{ mm}$ . y para el acero, cuya conductividad es de  $47.6 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}$ , el intervalo es de  $2 \text{ mm}$ . a  $4 \text{ mm}$ .

Estos altos espesores de superficie absorbente, no son aconsejables para esta estructura de colectores debido al peso. Existen otras configuraciones, en las cuales la conductividad del material utilizado no es un factor crítico (colector en lámina), ya que el calor sólo debe a través de espesores de un mm. para alcanzar el fluido caloriportor. Dichas configuraciones parecen más apropiadas para los materiales de baja conductividad térmica.

4.5 Coeficiente de transferencia de calor en el interior de los tubos .-

El factor  $H_{f,i}$  representa el coeficiente de transferencia de calor en el interior de los tubos soldados a la superficie absorbente. Dicho coeficiente varia entre valores de  $300 \text{ W/m}^2$  para circulación natural y  $1500 \text{ W/m}^2$  para circulación forzada.

La gráfica 26 muestra la variación del aporte solar a la carga térmica con la variación de  $H_{f,i}$ . En ella se observa que el aporte solar varia débilmente para variaciones de  $H_{f,i}$  comprendidos entre los valores usuales anteriormente mencionados.

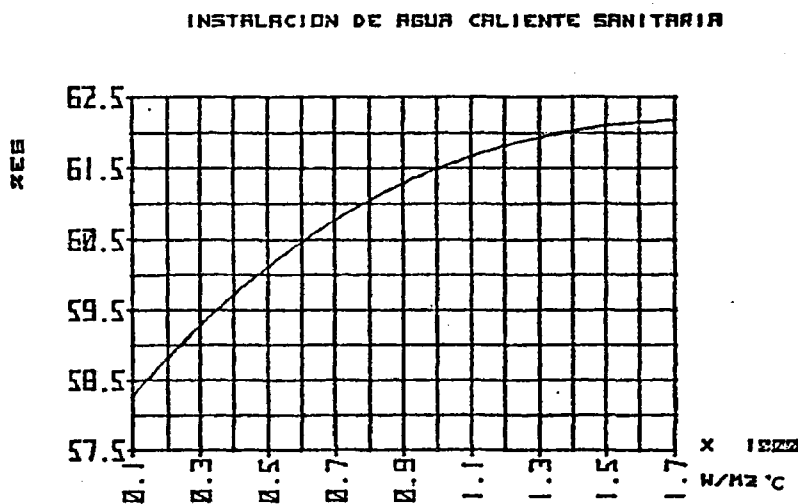
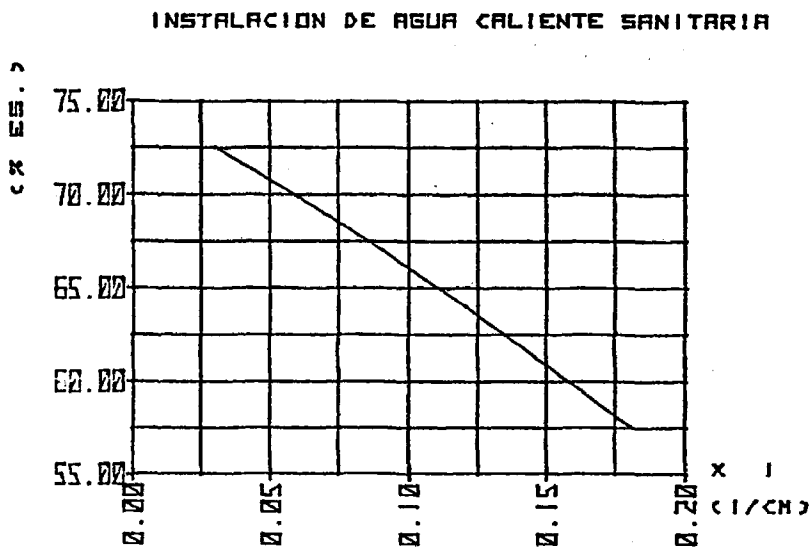


FIG 26 VARIACION DEL APORTE SOLAR CON EL FACTOR  $H_{f,i}$

4.6. Coefficiente de extinción de la superficie transparente.-

La gráfica 27 muestra la variación del aporte solar a la carga térmica con el producto espesor. coeficiente de extinción de la superficie transparente.



**FIG 27** VARIACION DEL APORTE SOLAR CON EL COEFICIENTE DE EXTINCION DEL VIDRIO

Para el vidrio, el coeficiente de extinción varia desde 0.04/cm. para vidrio "agua blanca" a 0.32/cm. para vidrio de baja calidad con fuerte contenido en compuestos ferrosos en su estructura. Su efecto es reducir la radiación incidente sobre la superficie absorbente, que es captada por el vidrio. Se deduce un efecto importante de dicha variable sobre el aporte solar.

4.7. Selectividad de la superficie absorbente.-

La gráfica 28 muestra la variación del aporte solar a la carga térmica con la selectividad de la superficie absorbente, para distintos valores de la absorptancia.

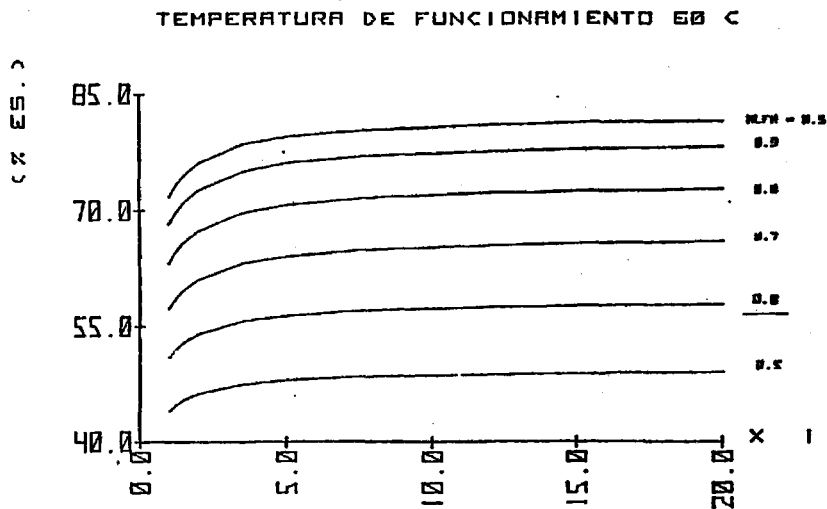


FIG 28. VARIACION DEL APORTE SOLAR CON LA SELECTIVIDAD (ALFA= 0.5 - 0.98)

Un corte de dicha gráfica según un eje vertical nos da puntos de la misma selectividad, pero distinto valor de alfa (0.98, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, y 0.5). De ella se deduce que la selectividad, expresada como el coeficiente entre el coeficiente de absorción y el de emisión, no indica las cualidades de la superficie absorbente, ya que con los mismos valores de la selectividad pueden obtenerse aportes solares, que varían desde un 50 % a 80 %.

Una segunda consecuencia se extrae cortando las gráficas según un eje paralelo al X: Un tratamiento superficial de cuerpo negro, conduce a mejores resultados que un tratamiento selectivo con valores de alfa = 0,85 y épsilon = 0,08, es decir, una alta selectividad no conduce a buenos resultados si para conseguirla hemos tenido que sacrificar el tener un alfa elevado. La fig. 29 presenta los mismos resultados para una temperatura de utilización de 80 °C.

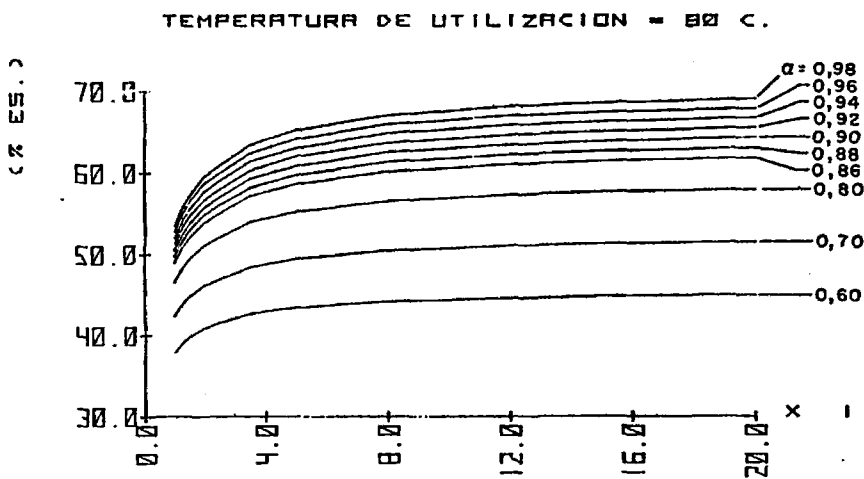
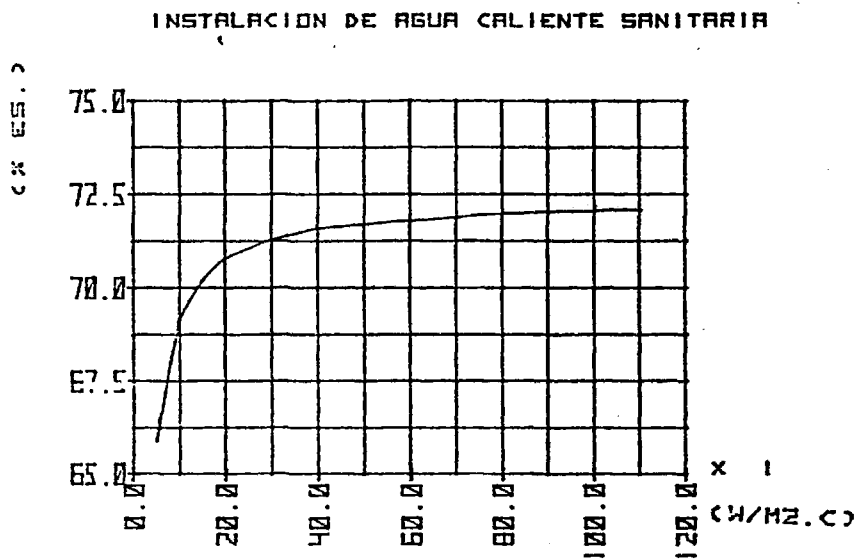


FIG 29 VARIACION DEL APORTE SOLAR CON LA SELECTIVIDAD DE LA SUP. ABSORBENTE

4.9. Coefficiente de conductividad en soldadura.-

La gráfica 30 muestra la variación del aporte solar a la carga térmica con el coeficiente de conductividad en soldadura.

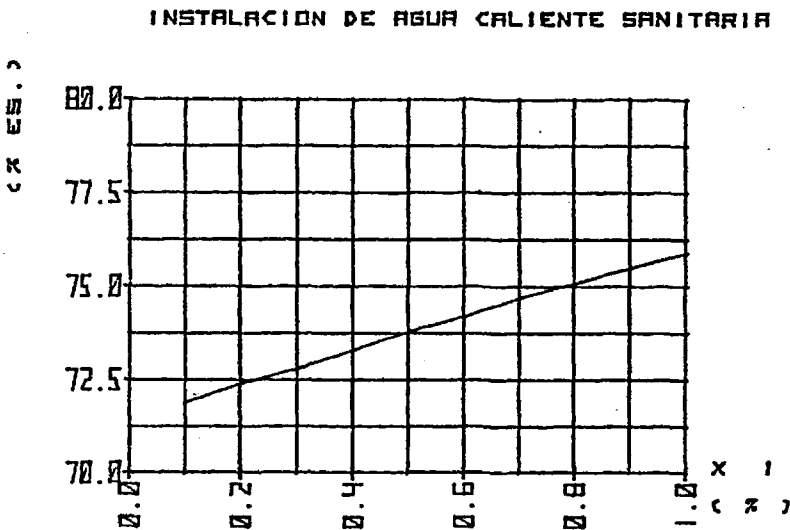


**FIG 30** VARIACION DEL APORTE SOLAR CON EL COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD EN SOLDADURA

Willier and Saluja (27) han demostrado experimentalmente que un mal contacto térmico entre tubo y placa, puede producir una importante pérdida de rendimiento. Concluyen que es necesario tener un buen contacto metal-metal de forma que la resistencia térmica sea inferior a  $0.03 \text{ m } ^\circ\text{C/W}$ , que corresponde a una conductividad de  $30 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$ , como se deduce de la figura. 30.

4.9. Coefficiente de albedo.-

La figura 31 muestra el aporte solar a la carga térmica con el coeficiente de reflexión del suelo a la radiación difusa y directa (albedo).



**FIG 31 VARIACION DEL APORTE SOLAR CON EL COEFICIENTE DE ALBEDO**

Esta variable ha de tenerse en cuenta en instalaciones situadas en lugares donde el medio ambiente cercano a la instalación es muy reflectante (nieve). Su efecto es aumentar la radiación difusa procedente de la porción de "suelo vista" por la superficie colectora. De la gráfica se deduce que el efecto de dicha variable no es muy importante.

Este estudio de optimización ha sido aplicado en el proyecto y construcción de la Planta Experimental de Aplicaciones Térmicas de Energía Solar construida por el Instituto de Optica C.S.I.C. en Arganda del Rey. Dicho proyecto consta de instalaciones de agua caliente sanitaria, calefacción solar y climatización de piscinas, cuya eficacia global, así como la de los distintos colectores solares construidos serán medidas sistemáticamente a fin de dar a conocer las prestaciones reales de los tres tipos de instalaciones mencionados.





5.- DESCRIPCION DE LAS INSTALACIONES DE LA PLANTA EXPERIMENTAL  
DE ENERGIA SOLAR DE ARGANDA DEL REY.

Las instalaciones de la Planta Experimental de Energia Solar de Arganda del Rey han sido proyectadas para el estudio y desarrollo de :

componentes:

- . Colectores.
- . Unidad de almacenamiento.
- . Elementos de control.

y de:

sistemas:

- . Agua caliente sanitaria.
- . Calefacción.
- . Climatización de piscinas.

La construcción de dicha Planta Experimental no persigue la realización de una instalación económica, sino la preparación de una infraestructura donde poder realizar el máximo de número de ensayos que permitan la obtención de datos útiles, para ofrecer al usuario de futuras instalaciones solares la mayor información de aspectos técnicos, científicos y económicos sobre la captación de la Energía Solar, su almacenamiento, y su posterior utilización controlada.

### 5.1. Instalaciones y Equipos.-

La figura 32 es una representación del plano de orientación de las instalaciones construidas. Se ha previsto una explanada para la colocación de los dispositivos de captación de la energía incidente, una unidad de almacenamiento que permita utilizar la energía captada durante la noche y los periodos de escasa radiación, unidades de distribución para transmitir el calor con pocas pérdidas, y dispositivos de transferencia de calor para su utilización en forma de calefacción, agua caliente sanitaria y climatización de una piscina descubierta.

### 5.2. Laboratorio y Taller.-

Es una sencilla construcción de 76 m<sup>2</sup>. de superficie en la que se separan tres espacios diferentes: una sala para instalar los equipos de control y medidas, un despacho de trabajo y una zona de taller con acceso al exterior para posibilitar la entrada de material, en la que se realiza el acoplamiento y montaje de los dispositivos experimentales.

### 5.3. Explanada exterior de experimentación.-

En los terrenos designados en la finca "El Estrechillo", con una superficie aproximada de 3.900 m<sup>2</sup>. se han construidos las siguientes instalaciones experimentales:

#### 5.3.1. Sistema de captación de energía.-

Instalación de 70 m<sup>2</sup>. de colectores solares planos que han sido proyectados y construidos con los siguientes materiales y configuraciones:

- . 20 m<sup>2</sup> de colector de cobre, de estructura tubular, soldada a una placa del mismo metal.
- . 10 m<sup>2</sup> de colector en lámina de chapa de acero.
- . 10 m<sup>2</sup> de colector en lámina de chapa de acero inoxidable.
- . 30 m<sup>2</sup> de colector "Roll-bond" de aluminio con tres diseños distintos y diversos tratamientos superficiales previamente estudiados en el Instituto de Optica. Estos colectores han sido construídos dentro del marco de un acuerdo establecido con la Empresa Nacional de Aluminio, ENDASA.

La instalación de los colectores ha sido concebida de modo que los paneles se ensayarán por grupos de tres unidades de 6 m<sup>2</sup> cada uno a fin de obtener una evaluación promediada de los mismos. Fig. 33 y 34.

#### 5.3.2. Unidad de almacenamiento térmico.-

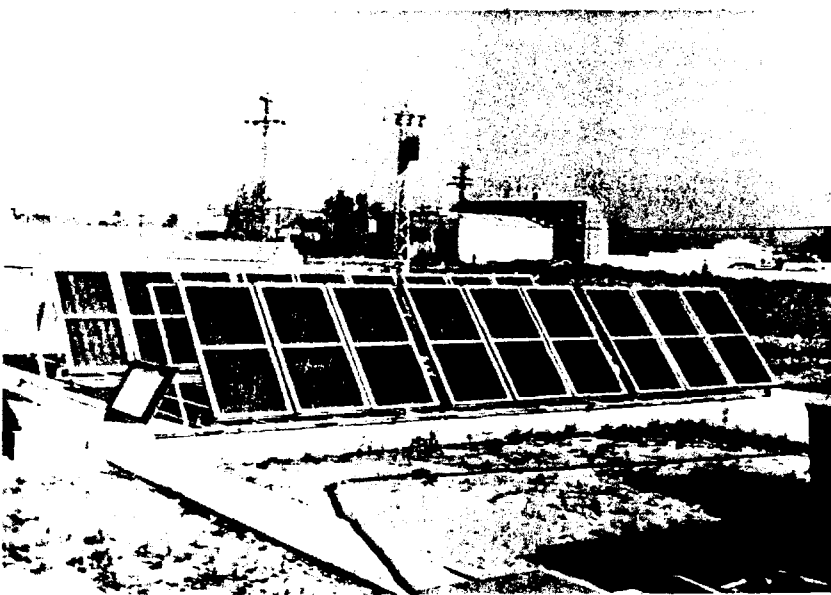
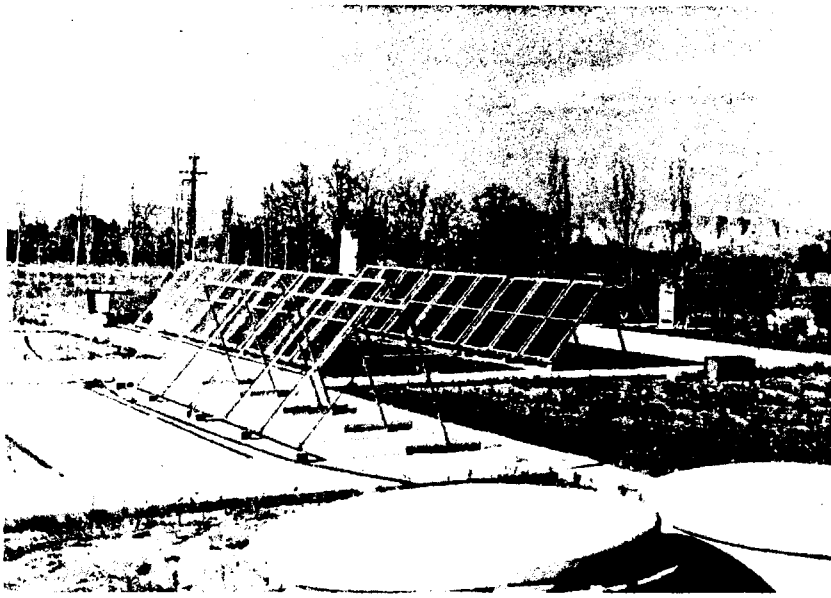
El almacenamiento térmico se realiza en forma de calor sensible mediante un depósito enterrado de 5 m<sup>3</sup> de capacidad que puede funcionar con o sin intercambiador de calor. Fig. 36 y 37.

#### 5.3.3. Sistema de transferencia de calor.-

La transferencia de calor al interior del edificio se realiza mediante un equipo "Fan-coil". Fig. 35.

#### 5.3.4. Red de conexiones y distribución.-

Se ha construído una red de canaletas que alojan las redes de



**FIG 33.** Vista general de la instalación de colectores de calefacción de la Planta Experimental de Energía Solar de Arganda del Rey.

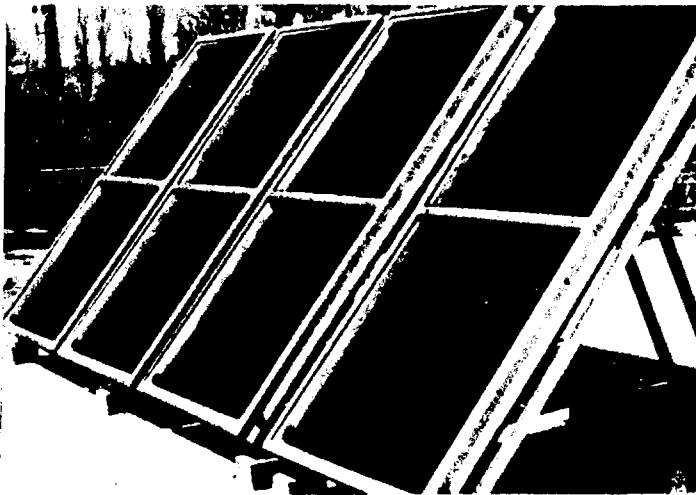


FIG 34. Colectores solares de cobre, estructura tubular instalados en la Planta Experimental de Energia Solar de Arganda del Rey.

# ESQUEMA FUNCIONAMIENTO GENERAL

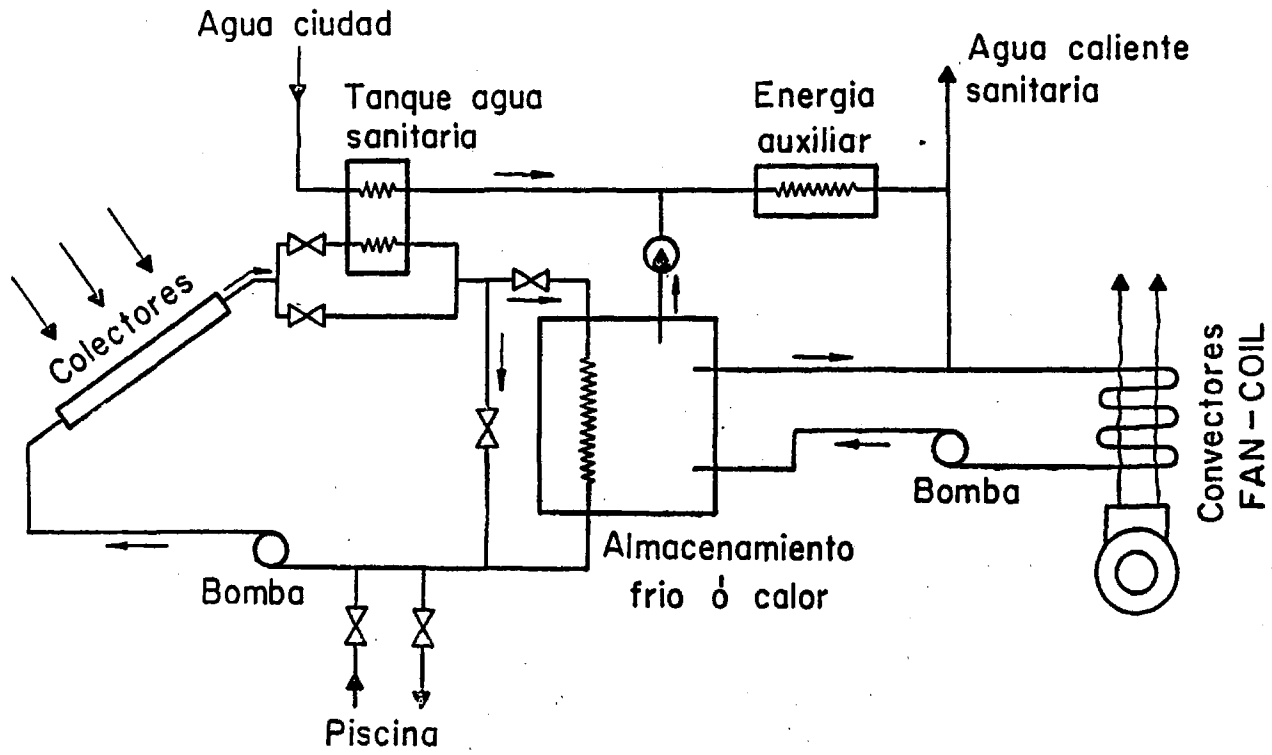


FIG 35.

distribución de agua y de circuitos eléctricos convenientemente separadas. Esta instalación permite gran flexibilidad y amplitud de interconexión de los diversos sistemas que se experimentan en la Planta.

#### 5.4. Instalación de agua caliente sanitaria.-

La actuación, desde el punto de vista energético, de una instalación solar de agua caliente sanitaria va a ser estudiada mediante dos instalaciones de pequeñas dimensiones que permitan comparar distintas formas de actuación de la fuente auxiliar:

##### a) Calentamiento al paso.-

La fuente auxiliar usada es combustible gaseoso, ya que sería necesaria una gran potencia eléctrica instalada para un calentamiento instantáneo.

Las ventajas de este sistema son el menor precio del combustible y la independencia entre el sistema solar y la fuente auxiliar, de forma que puedan aprovecharse las bajas temperaturas de la unidad de acumulación. Como inconvenientes presenta el mayor coste de la caldera y la dificultad de regulación de la potencia necesaria según la temperatura del agua almacenada.

##### b) Calentamiento complementario en la unidad de almacenamiento.-

En este caso, se suele utilizar como fuente auxiliar energía eléctrica.

Presenta las ventajas del menor costo del sistema auxiliar y mayor facilidad de regulación, frente al inconveniente de im-

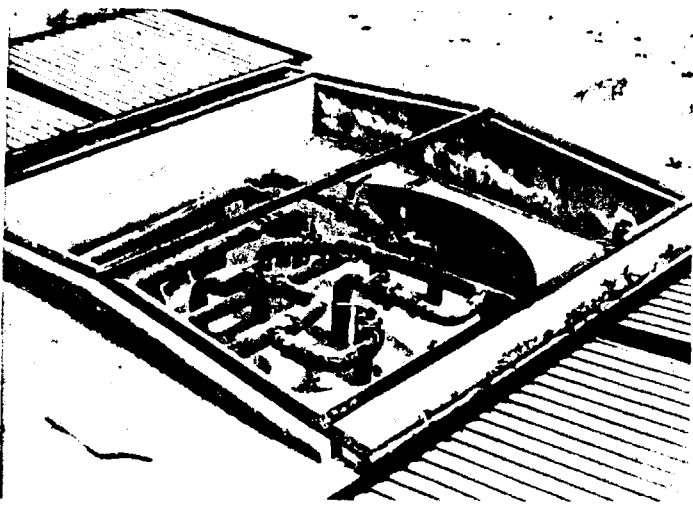
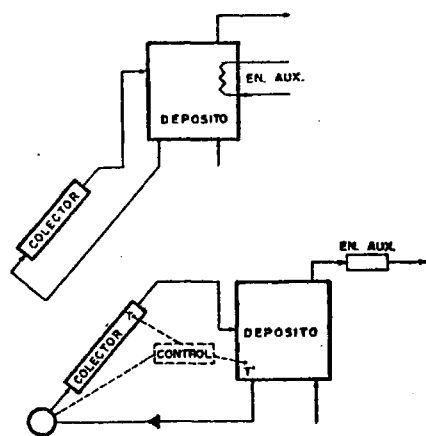


FIG 36 Unidad de acumulación de la instalación de calefacción de la Planta Experimental de Energía Solar de Arganda del Rey.



Fig. 37 Serpentes intercambiadores instalados en el interior del depósito de acumulación.

## AGUA CALIENTE SANITARIA



### LABORATORIO DE ENERGIA SOLAR DE ARGANDA

Consumo previsto .....	200 l/día
Radiación incidente (anual):	
- Superficie horizontal .....	3.700 Kcal/m <sup>2</sup> .día
- Superficie 42° inclinación .....	4.038 Kcal/m <sup>2</sup> .día
Superficie colectora .....	4 m <sup>2</sup>
Inclinación .....	42°
Orientación .....	SUR
Temperatura de utilización .....	45 - 55°C
Eficacia de captación .....	50 %
Volumen de almacenamiento .....	300 L
% previsto de utilización de Energía Solar ...	80 %
Circulación: Termosifón	
Fuente de energía auxiliar:	
- combustible gaseoso	
Posición colectores - depósito:	
- cubierta edificio.	

**FIG. 38** .- Datos técnicos de la instalación de agua caliente sanitaria.

poner como temperatura mínima de funcionamiento la que previamente ha sido termoregulada.

El consumo previsto, y que de no existir será simulado en cada instalación, es de 200 litros/día y la temperatura de utilización de 40-45°C. La superficie colectora necesaria para cada instalación es de 4 m<sup>2</sup> y el volumen de almacenamiento de 300 litros. En el esquema 38 se presentan las características y datos técnicos de dichas instalaciones.

### 5.5. Instalación de calefacción.-

El estudio de la actuación real de una instalación de calefacción solar se hará mediante una instalación independiente de 36 m<sup>2</sup> de superficie colectora, conectada con una unidad de almacenamiento de 5.000 litros de capacidad, que darán servicio de calefacción al propio edificio laboratorio de 76.8 m<sup>2</sup> de superficie y cuya carga térmica ha sido evaluada en 11.670 kcal./hora. Como elemento intercambiador en el interior del edificio, se utiliza un fan-coil centralizado que pone en contacto térmico el aire interior (20 - 22°C) con el agua del depósito de acumulación.

La fuente auxiliar está constituida por una batería de resistencias eléctricas de 12 Kw. de potencia, de modo que al hacerse pasar una corriente de intensidad variable a través de las mismas sobrecalientan el aire hasta la temperatura necesaria. Fig. 39 y 40.

La gran potencia del fan-coil utilizado como intercambiador de calor y la forma de conexión de la fuente auxiliar, hacen posible la utilización del agua almacenada a baja temperatura, lo que produce un alto valor de la eficacia de captación en los colectores solares.

La transferencia de energía colectores-depósito y depósito-fan-coil puede hacerse por circuito abierto o cerrado. La utilización del circuito cerrado produce una determinada estratificación en el agua almacenada, a la vez que evita problemas de corrosión y congelación, ya que el fluido en circulación puede ser complementado con líquidos inhibidores de corrosión y anticongelantes. Por otro lado, la utilización de circuito cerrado lleva consigo un menor rendimiento de la instalación y un mayor costo de instalación.

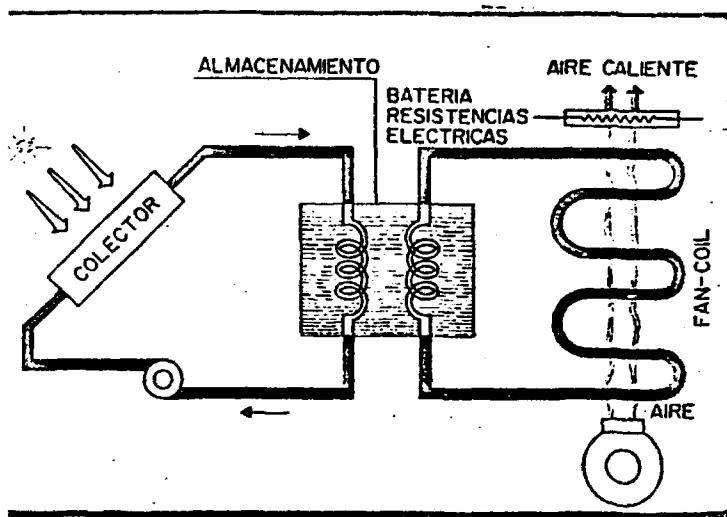


FIG. 39 Esquema de funcionamiento de la instalación de calefacción de la Planta Experimental de Energía Solar de Arganda del Rey.

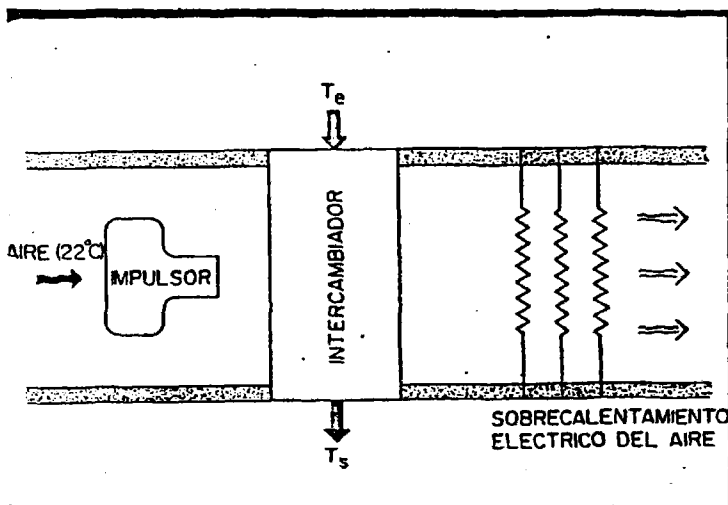


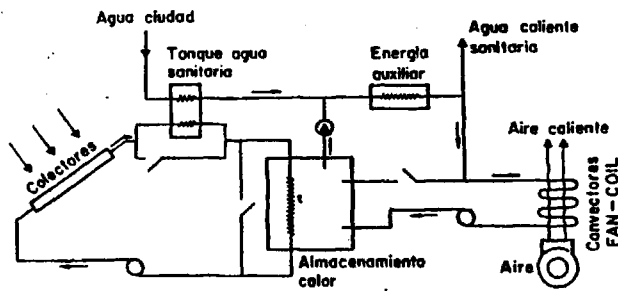
FIG. 40. Esquema de conexión de la fuente auxiliar eléctrica en la instalación de calefacción.

Esta instalación permitirá así mismo, estudiar la climatización del edificio en verano, utilizando el fenómeno de enfriamiento por emisión I.R. nocturna. Los colectores solares, colocados en posición horizontal en verano, intercambian radiación durante la noche con la atmósfera y el espacio vacío a través de la atmósfera (ventanas de transparencia atmosférica). El agua que circula a través de los colectores por la noche, se enfría y se almacena para ser utilizada durante el día para climatizar el edificio.

La figura 41 presenta los datos técnicos de esta instalación.

CALEFACCION

FUNCIONAMIENTO INVIERNO



LABORATORIO DE ENERGIA SOLAR (ARGANDA)

Edificio de una sola planta dividido en tres zonas

- Superficie del edificio ..... 78.8 m<sup>2</sup>
- Carga térmica ..... 11.674 Kcal/h
- Periodo de utilización ..... Rev. - Abril
- Horas de utilización ..... 8.30 - 18.30 h.
- Radiación incidente (invierno):
  - Superficie horizontal ..... 2.600 Kcal/m<sup>2</sup>.día
  - Superficie 47° inclinación ..... 3.450 Kcal/m<sup>2</sup>.día
- Superficie colectora ..... 39 m<sup>2</sup>
- Inclinación ..... 47°
- Orientación ..... SUR
- Eficacia de captación ..... 45 %
- Temperatura de utilización ..... < 60°C
- Caudal a través de los colectores ..... 100 - 140 l/m<sup>2</sup>.h
- % previsto de utilización de Energía Solar .... 70 %
- Sistema de transferencia de calor al interior:
  - 1 Fan-coil con sobrecalentamiento eléctrico de aire.
- Ensayo de refrigeración por emisión en I.R.

FIG. 41 .- Datos técnicos de la instalación de calefacción solar.

#### 5.6. Climatización de piscina.-

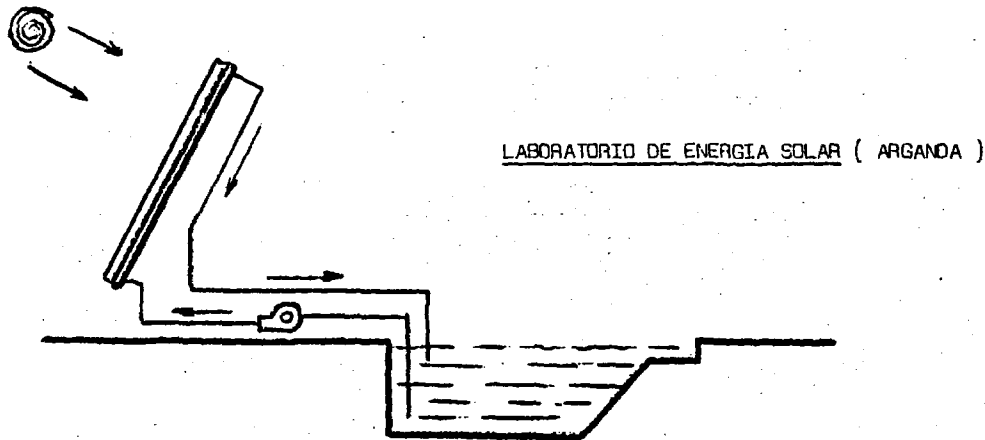
La tercera instalación que será estudiada en la Planta Experimental de Energía Solar de Arganda del Rey es la climatización de una piscina descubierta.

Se dispone de dos piscinas idénticas de 40 m<sup>2</sup> de superficie y 57 m<sup>3</sup> de volumen. Una de ellas será climatizada y la otra servirá de referencia y para ensayos posteriores de captación y almacenamiento directo (estanque solar). Para su climatización se utiliza la energía captada por 24 m<sup>2</sup> de colectores solares, a través de los cuales circulará el mismo agua de la piscina. La temperatura de trabajo de los mismos es muy próxima a la ambiente, con lo cual se reducen las pérdidas de calor y se obtiene una alta eficacia de captación.

El esquema y características de funcionamiento se presentan en la tabla 42.

Simultáneamente se harán ensayos para reducir pérdidas por radiación y evaporación utilizando cubiertas transparentes sobre las mismas en las etapas de no utilización, estudiándose los resultados comparativos.

La climatización de piscinas permite extender su periodo de utilización a la parte inicial y final del verano, y conjuntada con una instalación de calefacción, contribuye a una más rápida amortización de la inversión inicial, ya que de esta forma, los colectores dan servicio durante todo el año.



Superficie piscina _____	40 m <sup>2</sup>	Radiación incidente (verano):	
Profundidad _____	1 - 1.5 m	- Superficie piscina (A=0.3) _____	66.000 Kcal/día
Volumen _____	57 m <sup>3</sup>	- Superficie colectora _____	99.000 Kcal/día
Periodo de utilización _____	Marzo - Octubre	Energía total incidente _____	164.000 Kcal/día
Radiación promedio (verano):		Pérdidas:	
- Superficie horizontal _____	4.600 Kcal/m <sup>2</sup> .día	- Evaporación _____	43.000 Kcal/día
- Superficie 30° inclinación _____	4.900 Kcal/m <sup>2</sup> .día	- Emisión I.R. (50 w/m <sup>2</sup> ) _____	43.000 Kcal/día
Evaporación _____	21/m <sup>2</sup> .día	- Convección y viento _____	24.000 Kcal/día
Superficie colectora _____	27 m <sup>2</sup>	Carga térmica total _____	110.000 Kcal/día
Inclinación _____	30°	% previsto de utilización de Energ. Solar	100 %
Orientación _____	SUR	Temperatura de utilización _____	21 - 25 °C
Eficacia de captación _____	75 %	Energía necesaria para aumentar 1°C la temperatura del agua _____	66 Kwh
Caudal a través de los colectores _____	100 - 140 l/m <sup>2</sup> .h	Ensayos de reducción de pérdidas con cubiertas plásticas _____	
		Una seq	

FIG. 42

## CONCLUSIONES

### PARTE II

Se subraya la conveniencia de dividir las distintas variables que entran en juego en el diseño de una instalación solar en dos grupos:

1.- Variables de diseño de componentes .-

Variables que no dan una dimensión específica a la instalación solar y deben ser estudiadas mediante el balance energético de los distintos componentes.

2.- Variables de dimensionado de instalaciones .-

Variables que deben ser estudiadas mediante un criterio técnico - económico que permita encontrar los sistemas de mínimo costo y, por tanto, de diseño óptimo.

El estudio de las variables de diseño de componentes ha dado lugar a las siguientes conclusiones :

1.- Distancia"placa - vidrio"

Variable que no ejerce una importante influencia en el comportamiento de la instalación y cuyos valores óptimos oscilan entre :

$$3 \text{ cm.} < d < 4 \text{ cm.}$$

2.- Distancia entre tubos .-

Variable de fuerte influencia sobre el aporte solar a la carga térmica.

Este tipo de configuración (estructura tubular) puede, en principio, utilizarse con cualquier tipo de material, existiendo un compromiso entre el material utilizado, definido por su coeficiente de conducción de calor, y la distancia entre tubos existente.

La distancia óptima para los materiales más usuales son :

Cobre :	$K = 385 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$	$d = 12 \text{ cm.}$
Aluminio :	$K = 211 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$	$d = 10 \text{ cm.}$
Acero :	$K = 47,6 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$	$d = 6 \text{ cm.}$

3.- Producto "conductividad - espesor" de la placa absorbente .-

El espesor de la placa, conjugada con el coeficiente de conductividad de la misma, es una variable de fuerte influencia en las prestaciones de la instalación. Valores de su producto inferiores a  $0,1 \text{ W / } ^\circ\text{C}$  producen importantes descensos en el rendimiento del colector. Para valores superiores a  $0,1 \text{ W / } ^\circ\text{C}$  el aporte solar tiende asintóticamente a un valor máximo.

Para los materiales comúnmente utilizados el valor óptimo de esta variable, encontrado en el presente trabajo, se halla comprendido entre los siguientes intervalos :

Cobre :  $K = 385 \text{ W / m } ^\circ\text{C}$ .

$$0.26 \text{ mm} < d < 0.52 \text{ mm}.$$

Aluminio :  $K = 211 \text{ W / m } ^\circ\text{C}$ .

$$0.95 \text{ mm} < d < 0.50 \text{ mm}.$$

Acero :

$$2.00 \text{ mm} < d < 4.00 \text{ mm}.$$

#### 4.- Aislamiento base .-

Se ha verificado que dicha variable produce importantes descensos en las prestaciones del colector para valores inferiores a 3 cm. El valor óptimo oscila entre 3 y 5 cm. de aislamiento, dependiendo de la climatología a que el colector está sometido y el uso a que está destinado.

5.- Selectividad de la superficie absorbente .-

El estudio de la conveniencia de dotar a la superficie absorbente de propiedades selectivas, según sea el tipo de instalación en la cual los colectores solares están enclavados, el nivel de temperaturas deseado, etc... ha dado lugar a las siguientes conclusiones :

- a) La selectividad, definida como el cociente entre la absorptividad y emisividad, no indica las cualidades de la superficie absorbente , ya que para distintos valores de  $\alpha/\epsilon$  correspondientes a distintos  $\alpha$  , se obtienen aportes solares muy diferentes.

Se considera de interés la determinación de un coeficiente de selectividad  $\xi(\alpha, \epsilon)$  que, expresado en función de los coeficientes  $\alpha$  y  $\epsilon$  , represente las propiedades de la superficie absorbente.

- b) Se ha comprobado que altos valores de selectividad (superiores a  $\alpha/\epsilon = 5$  ) no son necesarios para la mayoría de las aplicaciones térmicas de la energía solar a temperaturas inferiores a 100 °C, ya que el aporte solar a la carga térmica tiende asintóticamente a un valor máximo a partir de dicho valor de selectividad para cualquier  $\alpha$  .

- c) Un tratamiento de superficie con propiedades de cuerpo negro ( $\alpha = \epsilon = 1$ ) conduce a mejores prestaciones que un tratamiento de selectividad 10 con valores de  $\alpha = 0.85$  y  $\epsilon = 0.08$ , es decir, una alta selectividad no conduce a buenos resultados si, para conseguirla se prescinde de tener un  $\epsilon$  elevado.
- d) En general, las conclusiones que anteceden se hacen más evidentes para bajos valores de la temperatura de funcionamiento del sistema.

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

P A R T E II

- (18) Hottel, H.C. and Whillier, A., Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy, 2, Part I, 74, University of Arizona Press, 1958. "Evaluation of Flat-Plate Collector Performance".
- (19) Klein, S.A., Duffie, J.A., and Beckman, W.A., ASME, J. Engr. Power, 96 A, 109 (1974). "Transient Considerations of Flat-Plate Solar Collectors".
- (20) Liu, B.Y.H. and Jordan, R.C., Solar Energy, 7, 53 (1963). "A Rational Procedure for Predicting the Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors".
- (21) Tabor, H., Bull. Res. Coun. Israel, 6C, 155 (1958). "Radiation, Convection, and Conduction Coefficients in Solar Collectors".
- (22) Liu, B.Y.H. and Jordan, R.C., Solar Energy, 7, 53 (1963). "The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors".
- (23) Chapman, A.J. "Transmisión de calor" Ed. Interciencia, Madrid (1968)

- (24) Swinbank, W.C., Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 89 (1963).  
"Long-Wave Radiation From Clear Skies".
- (25) McAdams, W.C., Heat Transmission, 3rd ed., New York, McGraw-Hill  
1954.
- (26) Duffie, J.A. and Beckman, W.A. "Solar Energy Thermal Processes".  
Wiley, New York. (1974).
- (27) Whillier, A. and Saluja, G., "Effects of materials and construction  
details on the thermal performance of solar water heaters".  
Solar Energy 9, 21 (1965).
- (28) Hottel, H.C. and Woertz, B. B., "Performance of flat-plate solar-heat  
collectors". Trans. ASME 64, 91 (1942).
- (29) Bliss, R.W., "The derivations of several 'plate efficiency factors'  
Useful in the design of flat-plate solar-heat collectors".  
Solar Energy 3, 55, n<sup>o</sup> 4 (1959).
- (30) Gupta, C.L., "On generalizing the dynamic performance of solar  
energy systems". Solar energy, 13, 301 (1971).

III

**ESTUDIO TECNICO-ECONOMICO  
DE INSTALACIONES SOLARES**

**Determinación de los puntos óptimos de diseño de las variables de dimensionado.**

### III. ESTUDIO TECNICO ECONOMICO DE INSTALACIONES SOLARES

Determinación de los puntos óptimos de diseño de las variables de dimensionado.

1.- Introducción. ....	139
<b>NOMENCLATURA</b> .....	142
2.- Estudio termodinámico	
Cálculo del rendimiento horario de un colector solar a partir de su curva de normalización. ....	144
3.- Estudio económico.	
Cálculo del ahorro total producido por la instalación solar a lo largo de la vida de la misma. ....	149
4.- Período de recuperación del capital invertido. ....	159
5.- Estudio de la influencia de las variables de dimensionado. ....	161
5.1. Superficie colectora. ....	161
5.2. Inclinación. ....	162
5.3. Volumen de almacenamiento. ....	169
6.- Estudio de instalaciones tipo. ....	173
6.1. Agua caliente sanitaria. ....	173
6.2. Calefacción solar. ....	184
7.- Influencia sobre la rentabilidad de los siguientes parámetros. ....	207
7.1. Precio del combustible convencional. ....	207
7.2. Incremento de precio de combustibles. ....	209
7.3. Precio del m <sup>2</sup> de colector solar. ....	211

<b>7.4. Inversión inicial de la instalación convencional .....</b>	<b>213</b>
<b>7.5. Aporte solar a la carga térmica. ....</b>	<b>215</b>
<b>7.6. Consideración global de los parámetros económicos. ....</b>	<b>216</b>
<b>8.- Determinación de los puntos óptimos de diseño de las variables de dimensionado.</b>	
<b>Método de cálculo de las variables de dimensionado en instalaciones solares .....</b>	<b>218</b>
<b>Conclusiones. ....</b>	<b>223</b>
<b>Bibliografía. ....</b>	<b>228</b>

## 1. INTRODUCCION.

Las variables primarias de diseño en un proyecto de aprovechamiento de energía solar son: Dimensionado de la superficie colectora, volumen de almacenamiento, e inclinación óptima de la superficie colectora. Sus valores optimos podrian ser encontrados utilizando el programa de cálculo anterior, pero las expresiones matemáticas que relacionan el rendimiento del colector solar con las distintas variables que entran en juego en su balance energético, requieren para su resolución, un significativo tiempo de cálculo en ordenador, lo que hace que dicho procedimiento sea inoperante para su utilización en el diseño de instalaciones solares.

Una posible simplificación consiste en sustituir el sistema de funciones no lineales obtenido, por la curva de normalización del panel solar utilizado, que se mide experimentalmente y que todo fabricante debe proporcionar a los usuarios e instaladores.

Independientemente de las consideraciones sobre el comportamiento térmico, en el estudio de los valores óptimos de las variables de dimensionado debe hacerse una comparación con otros sistemas que puedan satisfacer las mismas necesidades y un análisis con criterios económicos, ya que no existen criterios técnicos de diseño que permitan dimensionar una instalación para unas determinadas necesidades energéticas.

El tema de esta tercera parte de la Tesis, consiste en el estudio de diversas instalaciones tipo definidas por su curva de consumo anual. Se ha representado su actuación térmica por la curva del panel solar utilizado, simulando la instalación durante 14 horas diarias de los 365 del año típico de radiación y temperaturas antes mencionado. Se ha elegido como cri-

terio de optimización el obtener el máximo ahorro de la instalación solar a lo largo de la vida prevista del sistema.

En esencia el estudio consta de dos partes:

ESTUDIO TERMOINAMICO.-

Consiste en la determinación de las prestaciones energéticas de la instalación mediante la actuación de sus distintos componentes prediciendo - su funcionamiento térmico y evaluando los efectos de cambio de diseño:

• Colectores solares.-

Cálculo de rendimiento horario del colector solar a partir de su curva de normalización y sometido a las condiciones ambientales dadas por un año típico de radiación y temperatura.

• Almacenamiento.-

Balance energético del mismo, expresado como la diferencia entre la energía admitida en la unidad de acumulación (calor útil procedente de los colectores) y la suma del calor extraído del mismo para satisfacer la carga térmica necesaria y las pérdidas hacia el medio ambiente. Esta diferencia, energía neta que entra o sale de la unidad de acumulación, se invierte en aumentar o disminuir la temperatura del mismo. La temperatura final alcanzada al final de cada intervalo de una hora, es la inicial para el intervalo siguiente.

• Intercambiador al interior del edificio.-

Cálculo del aporte energético del medio utilizado para transferir el calor almacenado, desde el acumulador al punto de utilización del

mismo. Dicho aporte puede satisfacer parte o la totalidad de la carga térmica necesaria, y su cálculo depende del tipo de instalación - de que se trate: agua caliente sanitaria, calefacción, bomba de calor, etc. ...

#### ESTUDIO ECONOMICO.-

Consiste en la evaluación económica del ahorro producido por la instalación solar, es decir, en la comparación desde un punto de vista económico de las dos instalaciones convencional y solar, que se presentan como alternativas. Se calculan los gastos totales (inversión inicial y coste del combustible convencional anual) a lo largo de la vida prevista de ambas instalaciones. La diferencia entre ambas cantidades supone el ahorro producido por la instalación solar, que es tomado como criterio de optimización de las variables de dimensionado.

NOMENCLATURA

P A R T E 3ª

- $\dot{Q}_U$  : Calor útil extraído de los colectores por el fluido caloriportor
- $Q_C$  : Carga térmica anual.
- $Q_{es}$  : Cantidad anual de energía suministrada por la instalación solar.
- $Q_L$  : Pérdidas de calor en el sistema.
- $q_C$  : Carga térmica horaria.
- $q_{es}$  : Cantidad horaria de energía suministrada por la instalación solar
- $q_{los}(tb)$  : Pérdidas de calor por los conductos de la instalación.
- $q_{los}(dp)$  : Pérdidas de calor en la unidad de almacenamiento.
- $T_e$  : Temperatura de entrada del fluido al colector.
- $T_s$  : Temperatura de salida del fluido caloriportor del colector.
- $T_f$  : Temperatura final de cada intervalo horario.
- $T_a$  : Temperatura ambiente.
- $\eta$  : Rendimiento del colector.
- $E_i$  : Irradiancia solar global sobre la superficie del panel.
- $F_R$  : Coeficiente de transporte de calor.
- $U_L$  : Coeficiente global de pérdidas del colector.
- $(\tau\alpha)$  : Producto transmitancia-absortancia a la radiación global.
- $\dot{m}$  : Masa de fluido a través de los colectores por unidad de área y tiempo.

- $c_p$  : Calor específico del fluido caloriportor.
- M : Masa contenida en la unidad de almacenamiento.
- $C_p$  : Calor específico de la unidad de almacenamiento.
- $E_i$  (min) : Irradiancia solar global para la cual el rendimiento es nulo.
- $A_h$  : Ahorro producido por la instalación solar a lo largo de la vida prevista del sistema.
- $G_c$  : Gastos totales de la instalación convencional a lo largo de su vida prevista.
- $G_{es}$  : Gastos totales de la instalación solar a lo largo de su vida prevista.
- $I_c$  : Inversión inicial convencional.
- $I_{es}$  : Inversión inicial de la instalación solar.
- $P_0$  : Precio del combustible convencional.
- $P'_0$  : Precio del combustible utilizado como fuente auxiliar de apoyo.
- i : No considerado
- $K_{dp}$  : Coeficiente de pérdidas de calor de la unidad de almacenamiento.
- $V_{dp}$  : Volumen de depósito.
- F(S) : Aporte solar a la carga térmica, en función de la superficie colectora.
- S : Superficie colectora instalada.

2.- ESTUDIO TERMODINAMICO .-

Cálculo del rendimiento horario de un colector solar  
a partir de su curva de normalización .

La actuación de un colector solar en una instalación, queda definida por el calor útil que dicho panel extrae de la radiación solar que recibe en las condiciones particulares de radiación, temperatura de entrada del fluido y temperatura ambiente a que está sometido.

El calor útil puede ser deducido de su curva de normalización que expresa el rendimiento del mismo en función de la temperatura media de la placa, temperatura ambiente y radiación solar incidente :

$$(G7) \quad Q_u = \eta \times E_i \quad ; \quad \eta = \eta \left( \left( \frac{T_p + T_s}{2} \right) - T_a \right) / E_i$$

A causa de las imprecisiones inherentes a las medidas, los puntos obtenidos experimentalmente son representados por una recta ajustada por mínimos cuadrados (31), de forma que con su pendiente y ordenada en el origen ( o dos puntos representativos de la misma) dicha recta queda definida. Fig. 43 .

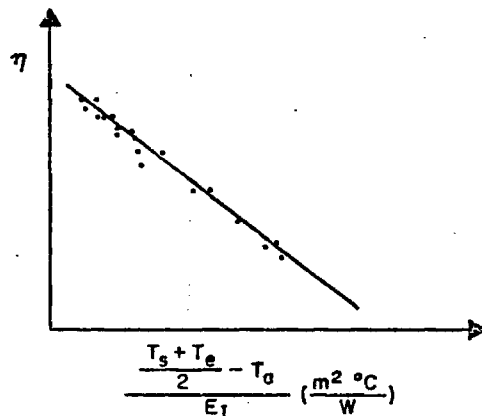


Fig. 43 Recta de normalización del colector solar

El corte de la recta con el eje X, nos dá la temperatura máxima de funcionamiento del panel, es decir, la temperatura que alcanzaría en el caso de que no hubiera circulación a su través (32). Esta temperatura máxima de funcionamiento define las cualidades del colector en cuanto a transmisión del vidrio, absorción de la placa y aislamiento se refiere. Un panel con alto coeficiente de transmisión del vidrio, alta absorción y bajo coeficiente global de pérdidas, nos daría un alto valor de la temperatura máxima alcanzada. Pero éste número no basta para indicar la calidad del panel, ya que no encierra ninguna información sobre la transmisión de calor entre chapa y fluido. Un panel de estructura tubular en el que el contacto entre chapa y tubo presente una alta resistividad térmica, aunque puede alcanzar una alta temperatura máxima de funcionamiento, presentará un bajo rendimiento ya que dicha resistividad térmica dá lugar a que la superficie activa del mismo se mantenga a alta temperatura pasando por los tubos un fluido relativamente frío.

El corte de la curva con el eje Y representa el caso ideal en que la temperatura media del panel coincidiera con la temperatura ambiente.

El rendimiento del panel puede expresarse de la forma :

$$(68) \quad \eta = - F_R U_L \left( \left( \frac{T_s + T_e}{2} \right) - T_a \right) / E_1 + F_R (\tau a)$$

donde  $F_R U_L$  es la pendiente y  $F_R (\tau a)$  es la ordenada en el origen.

El calor útil extraído por el fluido viene dado por :

$$(69) \quad (\dot{Q}_u / A) = -F_R U_L (((T_s + T_e) / 2) - T_a) + E_i F_R (\tau a)$$

expresión en la cual es necesario relacionar la temperatura de salida  $T_s$ , que figura explícitamente, con los parámetros conocidos de la instalación.

Teniendo en cuenta que el calor útil extraído por el panel, es transportado por un caudal  $\dot{m}$  de fluido, cuyo calor específico es  $c_p$ , que sufre un calentamiento desde su temperatura de entrada a la de salida, tenemos :

$$(70) \quad (\dot{Q}_u / A) = \dot{m} c_p (T_s - T_e)$$

Igualando ambas expresiones :

$$(71) \quad \dot{m} c_p (T_s - T_e) = -F_R U_L (((T_s + T_e) / 2) - T_a) + E_i F_R (\tau a)$$

de donde puede ser despejada la temperatura de salida :

$$(72) \quad T_s = ((T_e (2 \dot{m} c_p - F_R U_L) + 2 (F_R U_L T_a + E_i F_R (\tau a))) / (2 \dot{m} c_p + F_R U_L))$$

Conocida  $T_s = T_s (T_e)$  podemos calcular el rendimiento y el calor útil extraído por el panel.

La dependencia temporal de  $T_e$  puede ser deducida de la expresión de balance energético del depósito de acumulación.

Dicho balance se expresa como que la suma de las cantidades de energía que entran o salen del depósito se invierte en aumentar o disminuir la temperatura del mismo :

$$(73) \quad \sum_i Q_i = M C_p ( T_f - T_e )$$

es decir :

$$(74) \quad A Q_u - Q_c - Q_L = M C_p ( T_f - T_e )$$

de donde :

$$(75) \quad T_f = T_e + (( A Q_u - Q_c - Q_L ) / ( M C_p ) )$$

Esta temperatura final del presente intervalo de tiempo, será la temperatura de entrada del intervalo siguiente. (x).

Existe un valor mínimo de la radiación solar, para el cual la temperatura de salida del colector solar es inferior a la temperatura de entrada en el mismo. Niveles de radiación inferiores a él producen pérdidas de calor en el colector superiores a la energía captada, por lo cual, en dichas ocasiones la instalación solar no debe funcionar.

Dicho nivel de radiación puede ser deducido de la condición de que en dicho caso el rendimiento debe ser nulo :

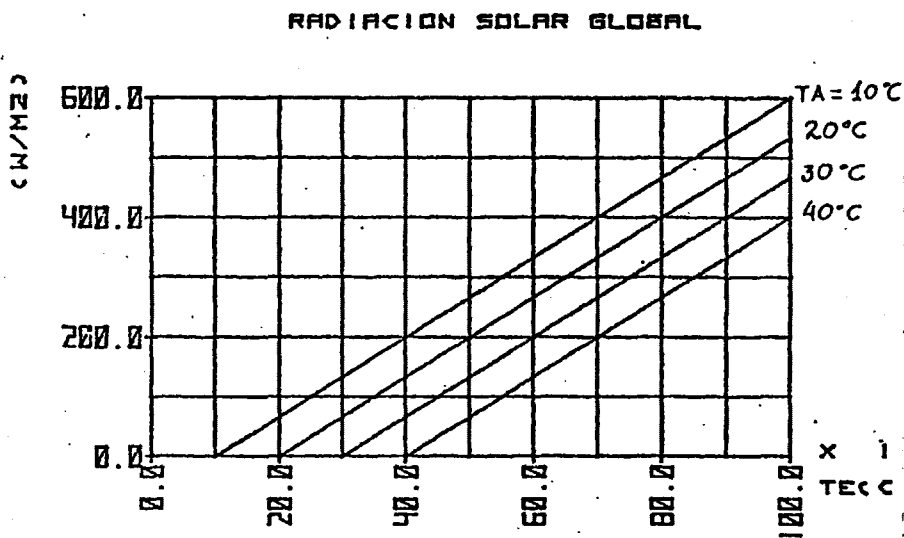
$$(76) \quad 0 = -F_R U_L ( ((( T_s + T_e ) / 2 ) - T_a ) / E_i ) + F_R ( \tau \alpha )$$

(x) NOTA .- El intervalo de tiempo mínimo, viene impuesto por la radiación solar, que es conocida con intervalo horario.

Sustituyendo la expresión de  $T_s$  (72) y despejando, se llega a :

$$(77) \quad E_i (\text{min}) = (F_R U_L / F_R (\tau \alpha)) (T_e - T_a)$$

La gráfica (44) representa dichos valores mínimos para distintos valores de la temperatura de entrada y temperatura ambiente.



**FIG 44. NIVELES DE RADIACION PARA LOS CUALES EL RENDIMIENTO ES NULO**

### 3.- ESTUDIO ECONOMICO .-

La energía solar se presenta como una alternativa a una instalación convencional para satisfacer una determinada carga térmica.

La instalación solar presenta como característica que la inversión inicial es superior a la necesaria en una instalación convencional, pero a su vez producirá unos determinados ahorros energéticos anuales que contribuirán a amortizar la diferencia de inversiones iniciales. El objetivo es calcular si dichos ahorros en combustible convencional a lo largo de la vida de la instalación, llegan a ser superiores a la diferencia de inversiones iniciales, en cuyo caso podremos decir que la instalación " se amortiza".

El método utilizado para dicho cálculo, y puesto que la inversión inicial se realiza el año 1 y el combustible va siendo pagado en años sucesivos, consiste en actualizar los diferentes gastos a un mismo año, a fin de que las diferentes cantidades sean comparativas (33). Dicho procedimiento es seguido con ambas instalaciones alternativas: la instalación solar y la convencional. Calculando las cantidades totales satisfechas en ambas instalaciones de forma acumulativa, puede obtenerse por diferencia el ahorro producido por la instalación solar a lo largo de la vida prevista de la misma. Esta cifra, en general, empieza a ser positiva a partir de un año determinado, lo cual significa que en ese año los ahorros en combustibles han pagado la inversión inicial y a partir de él la instalación solar empieza a producir ahorros.

El procedimiento se compone de los siguientes pasos :

El criterio de optimización para la selección de los valores óptimos de superficie colectora, inclinación y volumen de almacenamiento, es maximizar el ahorro producido por la instalación solar en comparación con la instalación convencional que satisfaga el mismo servicio.

Dicho ahorro se define como la diferencia entre los gastos totales a lo largo de la vida prevista de ambas instalaciones :

$$(78) \quad A_h = G_c - G_{es}$$

El gasto total de una instalación convencional  $G_c$  incluye la inversión inicial y el combustible anual necesario para satisfacer la carga térmica.

Dichas cantidades, satisfechas en años distintos, deben ser comparativas, para lo cual serán referidas al año 20, según el índice de coste de vida promedio en el periodo.  $G_c$  se expresa de la forma :

$$(79) \quad G_c = I_c (1+v)^{20} + \sum_{i=1}^{20} P(i) Q_c (1+v)^{(21-i)}$$

donde  $P(i)$  es el precio del combustible utilizado y que se prevee sufrirá un incremento de precio de un  $c$  % anual :

$$(80) \quad P(i) = P_0 (1+c)^{(i-1)}$$

El gasto total de la instalación solar vendrá dado, según el mismo criterio, por la expresión :

$$(81) \quad G_{es} = I_{es} (1+v)^{20} + \sum_{i=1}^{20} P_o^* (1+c)^{(i-1)} Q_{es} (1+v)^{(21-i)}$$

donde  $I_{es}$ , inversión inicial de la instalación solar, incluye : Instalación solar propiamente dicha ( colectores, unidad de almacenamiento, elementos de control, etc...) y la instalación de la fuente convencional de apoyo.

Ambas inversiones iniciales pueden incluir la instalación de intercambiadores al interior del edificio ( radiadores, fan-coils, bomba de calor, etc...) que sería necesario especificar si los dispositivos utilizados en ambas instalaciones son diferentes.

La carga térmica anual necesaria  $Q_c$ , es la suma de las cantidades de energía horaria necesaria en la instalación, y que será un dato de entrada. (\*).

$$(82) \quad Q_c = \sum_{\text{meses}} \sum_{\text{días}} \sum_{\text{horas}} q_c \text{ (mes, día, hora).}$$

(\*) NOTA.- El periodo diario ha sido considerado de 14 horas ya que en la mayor parte de las instalaciones la carga térmica es mayoritaria en el periodo diurno.

La energía anual suministrada por la instalación solar depende del tipo de instalación de que se trate, y en éste estudio se consideran — los siguientes casos:

1.- Agua caliente sanitaria.-

$$(83) \quad \begin{aligned} Q_{es} &= \sum_{\text{mes}} \sum_{\text{día}} \sum_{\text{hora}} q_{es} (\text{hora, día, mes}) = \\ &= C_{\min} \sum_{\text{mes}} \sum_{\text{día}} \sum_{\text{hora}} (T_{in} - T_{red}) \end{aligned}$$

Expresión deducida del efecto del consumo en la instalación, que es la sustitución de una determinada cantidad de agua  $C_{\min}$  del depósito de acumulación (a la temperatura  $T_{in}$ ) por la misma cantidad de agua a la temperatura de la red.

$C_{\min}$  es el menor de los dos caudales dados por :

$$(84) \quad C_1 = q_c (\text{hora, día, mes}) / (T_{nec} - T_{red})$$

$$(85) \quad C_2 = q_c (\text{hora, día, mes}) / (T_{in} - T_{red})$$

2.- Calefacción por Fan - coil .-

$$(86) \quad q_{es} = C_f (T_{in} - T_{air})$$

donde  $C_f$  es el factor C del fan-coil, que define su potencia.

3.- Calefacción por radiadores .-

$$(87) \quad q_{es} = q_c (\text{hora,dia,mes}) \left( \frac{T_{in} - T_2}{T_1 - T_2} \right)$$

donde  $T_1$  es la temperatura de entrada necesaria para que los radiadores proporcionen la totalidad de la carga :

$$(88) \quad T_1 = \left( q_c (\text{hora,dia,mes}) / K_{rad} \right)^{3/4} \cdot 60 + 20$$

y  $T_2$  es la temperatura de retorno :

$$(89) \quad T_2 = T_1 - \left( q_c (\text{hora,dia,mes}) / M C_p \right)$$

En esta expresión es necesario imponer la condición de que si la temperatura de retorno es superior a la de la unidad de almacenamiento, el sistema extrae toda la energía necesaria de la fuente auxiliar :

$$\text{Si } T_{in} > T_2 \quad q_{es} = 0$$

y que el calor suministrado por los radiadores no sea superior a la carga térmica :

$$\text{Si } q_{es} > q_c (\text{hora,dia,mes}) ; \quad q_{es} = q_c (\text{hora,dia,mes})$$

4.- Climatización de piscinas .-

La instalación de climatización de piscinas se interpreta como un sistema cuyo almacenamiento es el volumen total de la piscina, en el cual, la carga térmica es la debida a las pérdidas por conducción, convección y radiación en dicha unidad de almacenamiento :

$$(90) \quad q_{es} = q_c \text{ (hora,dia,mes)}$$

de forma que de él se extrae la totalidad de la carga, salvo en el caso de que el sistema lleve conectado una fuente auxiliar de apoyo :

$$(91) \quad q_{es} = q_{es} - V_{pisc} C_p (T_{nec} - T_{in})$$

5.- Bomba de calor .-

La energía extraída del depósito de acumulación por la bomba de calor viene dada por la expresión :

$$(92) \quad q_{es} = q_c \text{ (hora,dia,mes)} - ( q_c \text{ (hora,dia,mes)} / COP )$$

En todos los casos anteriores es necesario imponer que  $q_{es}$  no supere a la energía máxima que es posible extraer de la unidad de almacenamiento, que sería el caso de intercambiar todo el agua caliente del mismo por agua de red.

$$(93) \quad q_{es} < q_{max} = V_{dp} \cdot (T_{in} - T_{red})$$

La dependencia temporal de  $T_{in}$  según el aporte solar, la fracción de la carga suplida por el sistema solar, y las pérdidas sufridas por la unidad de almacenamiento y conductos, viene dada por :

$$(94) \quad T_{in}(t+1) = T_{in}(t) + (S_c \cdot q_u - q_{es} - q_{los}) / (V_{dp} \cdot C_{dp})$$

La temperatura final de un intervalo de tiempo (t) , será la inicial del intervalo siguiente (t+1).

El calor útil  $q_u$  viene dado por la actuación del panel solar :

$$(95) \quad q_u = \eta \cdot E_i \text{ (hora,dia,mes)}$$

donde el rendimiento se obtiene de la curva de normalización del panel utilizado :

$$(96) \quad \eta = -F_R U_L \left( \left( \left( \frac{T_s + T_e}{2} \right) - T_a \right) / E_i \right) + F_R(\tau_a)$$

y la  $T_s$  viene dada por :

$$(97) \quad T_s = (T_e (2\dot{m} c_p - F_R U_L) + 2 (F_R U_L T_a + E_1 F_R (T_e))) / (2\dot{m} c_p + F_R U_L)$$

Las pérdidas  $q_{\text{los}}$  incluyen las sufridas por el propio depósito :

$$(98) \quad q_{\text{los}}(\text{dp}) = (10 \pi (V_{\text{dp}} / 4 \pi)^{2/3}) \cdot K_{\text{dp}} \cdot (T_{\text{in}} - T_a)$$

y por el conjunto de conductos de la instalación :

$$(99) \quad q_{\text{los}}(\text{tb}) = K_{\text{tb}} \cdot (T_{\text{in}} - T_e)$$

siendo :

$$(100) \quad q_{\text{los}} = q_{\text{los}}(\text{dp}) + q_{\text{los}}(\text{tb})$$

Las expresiones (79) y (81) pueden ser reducidas de la forma :

$$(101) \quad A_h = G_c - G_{es}$$

donde :

$$(102) \quad G_c = I_c (1+v)^{20} + \sum_{i=1}^{20} P_0 (1+c)^{(i-1)} Q_c (1+v)^{(21-i)} =$$

$$= I_c (1+v)^{20} + P_0 Q_c \sum_{i=1}^{20} (1+c)^{(i-1)} (1+v)^{(21-i)}$$

Observemos que el término sumatorio es la suma de una progresión geométrica de razón  $((1+c)/(1+v))$  :

$$(103) \quad \sum_{i=1}^{20} (1+c)^{(i-1)} (1+v)^{(21-i)} = (1+v)^{20} + (1+c)(1+v)^{19} + \dots$$

cuya suma hasta el término  $i$ -ésimo es :

$$(104) \quad S = \frac{a_n r^n - a_1}{r - 1} = \frac{(1+c)^{(i-1)} (1+v)^{(21-i)} ((1+c)/(1+v)) - (1+v)^{20}}{((1+c)/(1+v)) - 1}$$

Para el caso particular de  $i = 20$  tenemos :

$$(105) \quad G_c = I_c (1+v)^{20} + P_0 Q_c \left( \frac{(1+v)^{21}}{(1+v) - (1+c)} \right) \left( 1 - \left( \frac{1+c}{1+v} \right)^{20} \right)$$

y agrupando términos :

$$(106) \quad G_c = (1+v)^{20} ( I_c + P_0 Q_c ( (1+v)/(v-c) ) (1-((1+c)/(1+v))^{20}) )$$

Dado que  $G_{es}$  es una expresión del mismo tipo, se obtendrá igualmente :

$$(107) \quad G_{es} = (1+v)^{20} ( I_{es} + P_0 Q_{es} ( (1+v)/(v-c) ) (1-((1+c)/(1+v))^{20}) )$$

de donde  $A_h$  queda reducido a la expresión :

$$(108) \quad A_h = (1+v)^{20} ( (I_c - I_{es}) + (P_0 Q_c - P_0 Q_{es}) ( (1+v)/(v-c) ) (1-((1+c)/(1+v))^{20}) )$$

.....

4.- Periodo de amortización .-

El periodo de amortización viene dado por el año  $i$  que iguale las expresiones :

$$(109) \quad I_c (1+v)^{20} + \sum_{i=1}^{20} P_0 (1+v)^{(21-i)} Q_c (1+c)^{(i-1)} =$$

$$= I_{es} (1+v)^{20} + \sum_{i=1}^{20} P_0^* (1+c)^{(i-1)} Q_{es} (1+v)^{(21-i)}$$

expresión que es reducible a :

$$(110) (I_c - I_{es}) (1+v)^{20} + (Q_c P_0 - Q_{es} P_0^*) \sum_{i=1}^{20} (1+c)^{(i-1)} (1+v)^{(21-i)} = 0$$

de donde :

$$(111) \quad \sum_{i=1}^{20} (1+c)^{(i-1)} (1+v)^{(21-i)} = \frac{(I_{es} - I_c) (1+v)^{20}}{(Q_c P_0 - Q_{es} P_0^*)}$$

Aplicando la suma de la progresión geométrica hasta el año  $i$ -ésimo, calculada anteriormente :

$$(112) \quad S = \left( (1+v)^{21}/(c-v) \right) \left( (1+c)^i (1+v)^{(-i)} - 1 \right)$$

De esta expresión y de la (111) se obtiene :

$$(113) \quad \frac{(I_{es} - I_c) (1+v)^{20}}{(Q_c P_0 - Q_{es} P_0^*)} = \left( (1+v)^{21}/(c-v) \right) \left( \left( (1+c)/(1+v) \right)^i - 1 \right)$$

de donde :

$$(114) \quad \left( \frac{1+c}{1+v} \right)^i = 1 + \left( \frac{(c-v)(I_{es} - I_c)}{(1+v)(q_c P_0 - q_{es} P_0^*)} \right)$$

y aplicando logaritmos neperianos :

$$(115) \quad i = \frac{\text{Ln} \left( 1 + \frac{(c-v)(I_{es} - I_c)}{(1+v)(q_c P_0 - q_{es} P_0^*)} \right)}{\text{Ln} (1+c) - \text{Ln} (1+v)}$$

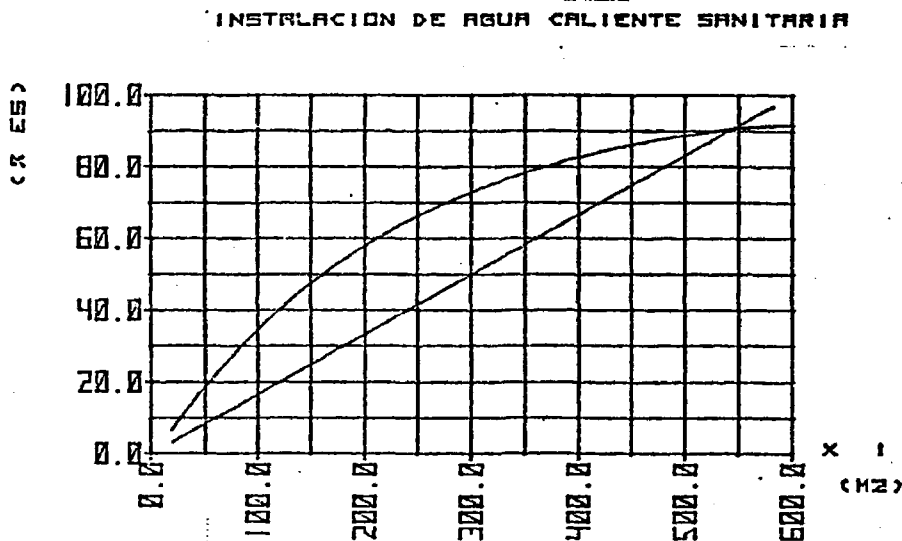
Expresión que nos da el periodo de amortización de la instalación solar, es decir, el año en el cual los ahorros en combustibles han sido capaces de pagar la inversión inicial.

5. ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE DIMENSIONADO.-

5.1. Superficie colectora.-

El estudio del dimensionado óptimo de la superficie colectora en una instalación de aprovechamiento de energía solar debe ser llevado a cabo mediante criterios económicos, ya que el aporte solar a la carga térmica de una instalación solar, presente una tendencia asintótica para grandes valores de la superficie instalada.

Fig. 45.



**FIG 45. VARIACION DEL APORTE SOLAR E INVERSION INICIAL CON LA SUPERFICIE INSTALADA**

La tendencia asintótica del aporte solar con la dimensión de la superficie colectora, está motivada por el aumento de la temperatura de funcionamiento de los colectores solares, de forma que la cantidad de energía captada por unidad de superficie colectora, decrece al ser ésta mayor.

En la misma gráfica se ha dibujado la variación del precio de la instalación con la superficie colectora, variación que es aproximadamente lineal.

De la comparación de ambas curvas se deduce que existe un punto óptimo para la superficie colectora, a partir del cual, el ahorro producido en combustibles no compensa el incremento en inversión inicial necesario.

## 5.2. Inclinación.-

La inclinación óptima de la superficie colectora en una instalación solar depende de las siguientes variables:

### 1.- Latitud del lugar.-

El efecto buscado al inclinar los colectores solares es que la dirección de incidencia de la radiación solar directa sea próxima a la perpendicular del plano del panel, el mayor tiempo posible del día. Puesto que la altura que presenta el Sol a un punto sobre la superficie de la Tierra depende de su latitud, dicho efecto de perpendicularidad depende igualmente de ella.

2.- Forma de la curva de consumo anual.

Al variar la inclinación de la superficie colectora, el efecto producido es una distinta repartición de la energía incidente a lo largo del año, como puede verse en la figura 46 .

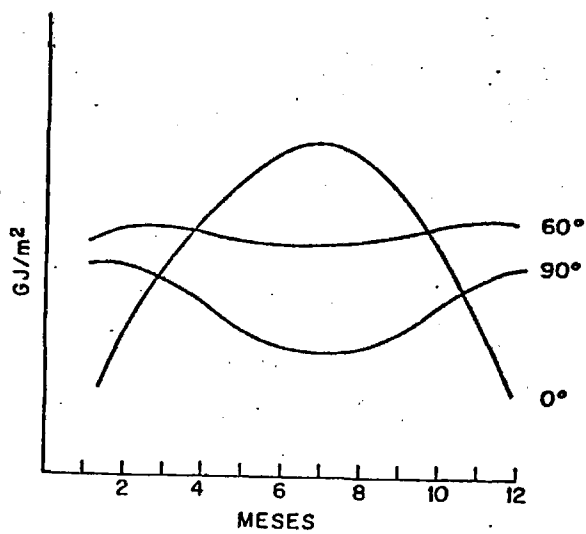


Fig46.- Radiación solar global sobre superficies con diversas inclinaciones.

El consumo energético también varía a lo largo del año, dependiendo de la aplicación concreta de que se trate. Fig.47.

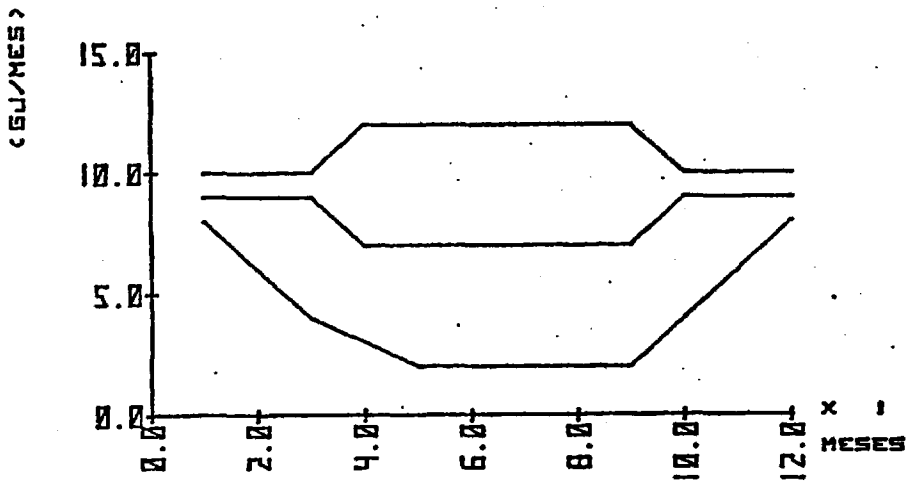


FIG. 47. CURVA DE CONSUMO ANUAL DE DIVERSAS INSTALACIONES

Para unas dimensiones fijas de la superficie colectora, la inclinación óptima es la que conduce a una máxima área de coincidencia entre ambas curvas y depende de la forma de ambas.

### 3.- Características meteorológicas del lugar.-

La curva real de radiación solar incidente sobre la superficie horizontal, no es una curva simétrica como se ha supuesto anteriormente. La historia de 17 años de datos de radiación solar disponible en Madrid muestra que meses simétricos respecto a la mitad del año, presentan valores muy distintos: por ejemplo, en Abril y Septiembre se han obtenido medias de 466 y 385 cal/cm<sup>2</sup>/día respectivamente. Estas asimetrías se presentan con mayor o menor importancia en distintos meses y es debida a las características meteorológicas de la zona, estando avalada, en Madrid, por una historia de 17 años de datos de radiación.

### 4.- Dimensiones de la superficie colectora.-

La figura 48 presenta la superposición de las curvas de consumo y energía captada por los colectores solares. Dicho consumo corresponde a una instalación de agua caliente sanitaria y calefacción, donde la carga de calefacción ha sido calculada por el método grados-días. En ella se pueden distinguir tres zonas:

La zona 1ª corresponde a la energía captada por los paneles solares y que está dentro de las necesidades energéticas, por lo tanto, es la energía útil que proporciona la instalación.

La zona 2ª corresponde a la energía que se necesita en la instalación y que el sistema solar no es capaz de suministrar, de forma que debe ser añadida a base de una fuente convencional.

La zona 3ª corresponde a la energía que la instalación solar puede potencialmente proporcionar, pero que está fuera de nuestras necesidades. Al no poder ser almacenada de forma duradera, se pierde hacia el medio ambiente.

La forma de la curva de consumo hace que para distintos valores de la superficie colectora la coincidencia debe ser buscada en los meses iniciales y finales del año, ya que aquellos meses en que la energía captada es superior a la demanda no afectan al estudio de coincidencia.

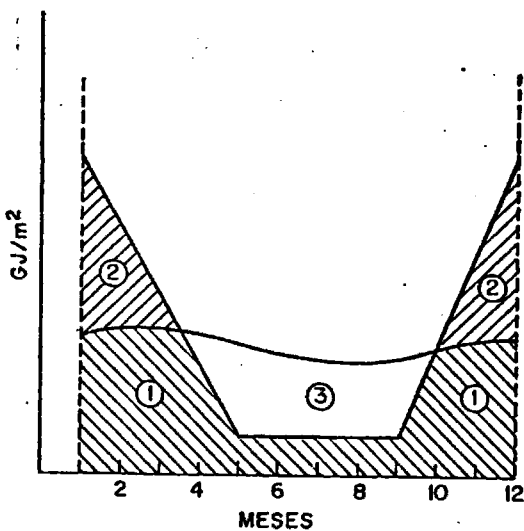


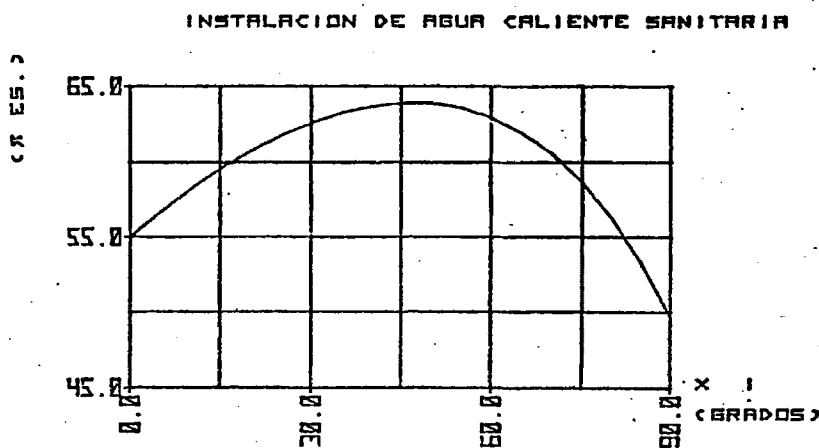
Fig48 - Curvas de consumo y radiación solar incidente para una instalación de calefacción solar.

5.- Orientación con la cual, los colectores solares han sido instalados.-

Es un caso frecuente que en instalaciones solares sea más conveniente, desde un punto de vista constructivo, instalar los colectores solares con orientación distinta a la Sur. La inclinación óptima, en dichos casos debe ser estudiada teniendo en cuenta que los efectos de perpendicularidad son diferentes que para el caso Sur.

De los cinco puntos anteriores se deduce que la inclinación óptima depende de diversos factores y que existe un criterio único, máxima coincidencia entre la curva de consumo anual y la energía captada por los colectores solares, que nos permite optimizar la inclinación.

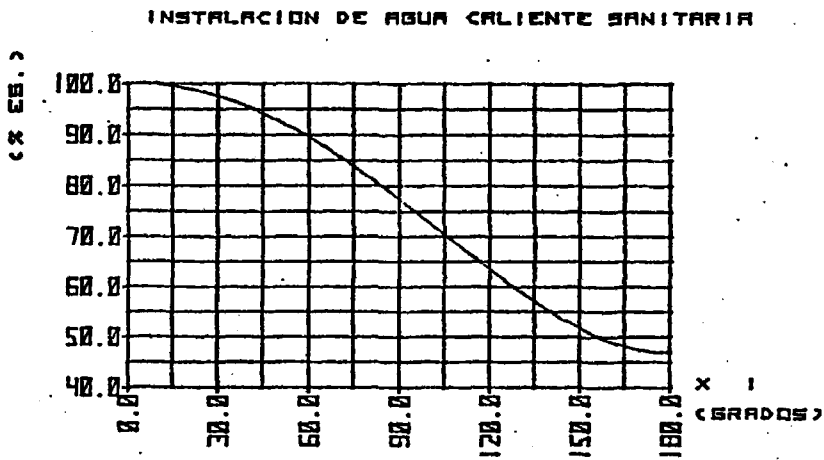
La gráfica 49 muestra la variación del aporte solar a la carga térmica de una instalación de agua caliente sanitaria con la inclinación.



**FIG 49. VARIACION DEL APORTE SOLAR CON LA INCLINACION DE LOS COLECTORES**

De ella se deduce que pequeñas variaciones en la inclinación en el entorno al valor óptimo, producen débiles efectos sobre el aporte solar.

La gráfica 50 muestra la variación del aporte solar con la orientación, en la cual se observa igualmente que pequeños desfases de la orientación SUR, producen pequeños efectos sobre el aporte solar.



**FIG 50. VARIACION DEL APORTE SOLAR CON LA ORIENTACION (REFERENCIA 100%)**

### 5.3. Volumen de almacenamiento.-

La misión de la unidad de almacenamiento en una instalación solar es soslayar la falta de coincidencia entre el consumo y el aporte solar, acumulando la energía en exceso que se produce cuando el aporte solar es superior a la carga térmica, para ser utilizada en los momentos en que la energía captada sea inferior a la carga o nula.

Si bien es técnicamente posible el almacenamiento estacional, es decir, de una época del año a otra, (casa de energía cero), el criterio económico de optimización sólo aconseja estos grandes volúmenes de almacenamiento en casos muy particulares.

El volumen óptimo de almacenamiento de una instalación depende de tres factores:

#### 1.- Dimensión de la superficie colectora.-

La figura 51 presenta la variación del aporte solar con el volumen de almacenamiento instalado por  $m^2$  de colector solar para una instalación de agua caliente sanitaria. De ella se deduce que el volumen óptimo, según este criterio está comprendido entre 50  $L/m^2$  y 75  $L/m^2$  de colector instalado. Valores superiores no producen significativos aumentos del aporte solar, pero sin embargo, valores inferiores conducen a altas temperaturas de almacenamiento y en consecuencia bajos rendimientos de captación.

INSTALACION DE AGUA CALIENTE SANITARIA

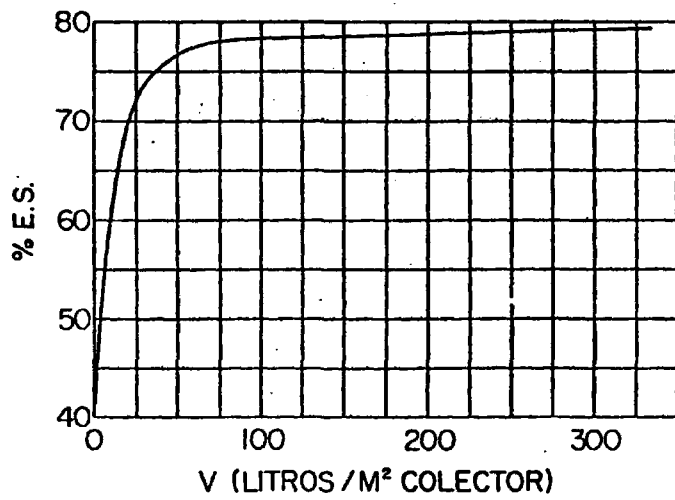


FIG. 51 VARIACION DEL APORTE SOLAR A LA CARGA TERMICA CON EL VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO.

2.- Temperatura de utilización .-

La gráfica 52 muestra los valores óptimos del volumen de almacenamiento para diferentes temperaturas de utilización. En ella se observa que para altas temperaturas de utilización son aconsejables pequeños volúmenes de almacenamiento, ya que de esta forma la unidad de acumulación está mas tiempo a una temperatura próxima al entorno en que se la necesita.

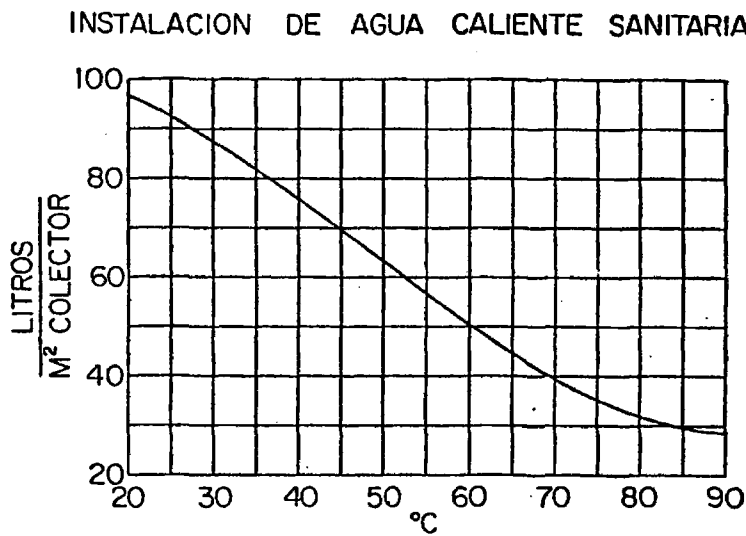


FIG. 52 VARIACION DEL VOLUMEN OPTIMO CON LA TEMPERATURA DE UTILIZACION

Para temperaturas usuales de agua caliente sanitaria, el volumen óptimo es de 75 litros / m<sup>2</sup> de panel solar. Para mayores temperaturas, volúmenes inferiores producen mejores rendimientos en la instalación.

3.- Precio m<sup>2</sup> de depósito construido .-

La gráfica 53 muestra la variación del volumen óptimo con el precio del m<sup>2</sup> de depósito construido. ( La superficie de un depósito define mejor su precio que el volumen ). Para valores del orden de 4.000 Pts / m<sup>2</sup> (precio actual estimado de un depósito de acero galvanizado, e incluido aislamiento), el volumen aconsejable es del orden de 70 litros / m<sup>2</sup> de colector instalado.

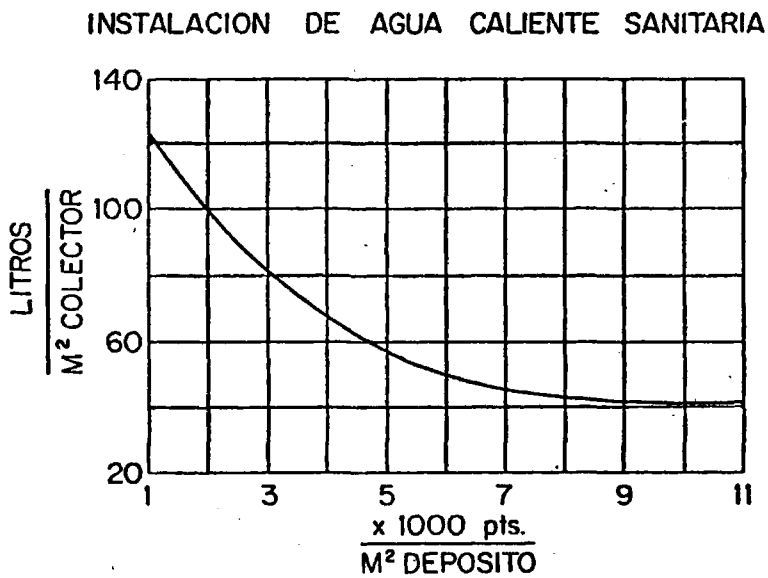


FIG. 53 VARIACION DEL VOLUMEN OPTIMO CON EL PRECIO DEL M<sup>2</sup> DE DEPOSITO..

## 6. ESTUDIO DE INSTALACIONES TIPO.

Mediante el procedimiento de cálculo anteriormente expuesto, puede estudiarse el comportamiento térmico y la rentabilidad económica de diversos tipos de instalaciones solares:

- a) Instalación de agua caliente sanitaria.
- b) Instalación de calefacción solar.
- c) Instalación de calefacción y refrigeración mediante sistema combinado bomba de calor-energía solar.
- d) Climatización de piscinas.
- e) Agua caliente para consumo industrial.

Como ejemplo de la aplicación de este estudio de optimización, vamos a estudiar a continuación dos de los tipos de instalaciones solares más usuales en la actualidad: Agua caliente sanitaria y calefacción solar.

### 6.1. Instalación de agua caliente sanitaria.-

El agua caliente sanitaria para uso individual o comunidades, es una de las aplicaciones más extendidas en la actualidad.

El sistema más sencillo, basado en el efecto termosifón, consiste en un colector solar y un depósito de almacenamiento, que ha de ser instalado por encima del nivel del colector. El agua contenida en el mismo, disminuye la densidad al calentarse por efecto de la radiación solar y fluye hacia la parte más alta de todo el sistema, que es la parte alta del depósito de acumulación. Su lugar es reemplazado por más agua fría procedente de la parte inferior del depósito, estableciéndose

se de esta forma una circulación por efecto termosifón.

En instalaciones de mayor tamaño, es conveniente desde los puntos de vista térmico y económico, forzar la circulación mediante una bomba de impulsión. En este tipo de instalaciones, las temperaturas de funcionamiento de los colectores solares son inversamente proporcionales al flujo de circulación a su través, alcanzándose mayores rendimientos que en el sistema anterior, aunque la instalación de una bomba de impulsión, presupone gastos de energía eléctrica y mantenimiento.

El aumento de rendimiento obtenido, sólo compensa estos gastos en grandes instalaciones.

La superficie absorbente de los colectores solares se enfría durante la noche por efecto de emisión de radiación I.R., bajando su temperatura 4° ó 5° C por debajo de la temperatura ambiente. Excepto en zonas muy templadas, existe el riesgo de heladas en las noches de invierno, de forma que debe preverse un medio para evitar dicho efecto: el vaciado de la instalación, o la utilización de un fluido anticongelante en circuito cerrado, separado mediante un intercambiador del agua caliente de consumo, aunque todos estos dispositivos aumentan el coste de la instalación.

Una de las características que contribuyen a la rentabilidad de este tipo de instalaciones es la continuidad del consumo a lo largo del año, que puede estimarse en un 70 % en verano, del consumo en invierno.

A continuación se expone el estudio de optimización de una instalación de las siguientes características:

INSTALACION DE AGUA CALIENTE SANITARIA PARA UNA COMUNIDAD DE VECINOS EN UN EDIFICIO DE 10 PLANTAS Y 6 VIVIENDAS POR PLANTA.

Se prevee un consumo medio diario de 175 litros por vivienda de agua a 45°C en invierno y 40°C en verano, con un consumo de un 70 % en verano del anteriormente mencionado.

La energía convencional utilizada como fuente de apoyo a la instalación solar es combustible gaseoso (gas ciudad) a 2.0 Ptas/termia, calculado a partir del rendimiento neto de caldera, conductos, etc. ...

El precio de la instalación ha sido calculado a base de 12.000 Ptas/m<sup>2</sup> de colector solar y 3.825 Ptas/m<sup>2</sup> de depósito construido.

La tabla 18 presenta los datos de entrada al programa para esta instalación. Las tablas 19 a 24 presentan los datos de salida del mismo. De ellas pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- 1) El suministro del 71.5 % de la energía necesaria en la instalación requiere una superficie colectora de 103 m<sup>2</sup> inclinados 45° con la horizontal, y un volumen de 8.000 litros como unidad de acumulación.
- 2) La inversión inicial necesaria es de 1.324.297 Ptas. lo que produce una repercusión por vivienda de 22.071 Ptas.



D A T O S   D E   S A L I D A  
\*\*\*\*\*

1.- SUPERFICIE COLECTORA OPTIMA PARA LA INSTALACION CONSI-  
DERADA.

103.0  
\*\*\*\*\*

2.- INCLINACION OPTIMA PARA UN MAXIMO APROVECHAMIENTO DE LA  
ENERGIA SOLAR.

45.  
\*\*\*\*\*

3.- % PREVISTO DE UTILIZACION DE ENERGIA SOLAR.

71.5 %  
\*\*\*\*\*

4.- PERIODO DE AMORTIZACION.  
AÑO EN EL CUAL SE IGUALAN LOS COSTOS DE INSTALACION  
CONVENCIONAL (INSTALACION Y COMBUSTIBLE CONVENCIONAL) Y  
DE LA INSTALACION SOLAR (INSTALACION CONVENCIONAL, INS-  
TALACION SOLAR Y COMBUSTIBLE AUXILIAR). A PARTIR DE  
ESTE AÑO, EMPIEZAN A PRODUCIRSE AHORROS POR LA UTILI-  
ZACION DE ENERGIA SOLAR.

8. AÑOS  
\*\*\*\*\*

5.- PRECIO DE LA INSTALACION.

A) INSTALACION CONVENCIONAL	0. PTS.
.....	.....
B) INSTALACION ENERGIA SOLAR	1324927. PTS.
.....	.....
C) PRECIO TOTAL	1324927. PTS.
.....	.....

6.- PRECIO POR MILLON DE KCAL.

A) INSTALACION CONVENCIONAL	2000. PTS. A MILL
.....	.....
B) INSTALACION ENERGIA SOLAR	1249. PTS. A MILL
.....	.....

DATOS DE RADIACION Y CONSUMO  
 .....

SUPERFICIE CON ORIENTACION 0 E INCLINACION 45.

MES	RADIACION (KCAL/M <sup>2</sup> DIA)	EN. NECES. (KCAL/MES)	EN. COLECT. (KCAL/MES)	EN. AUXILIAR (KCAL/MES)	SUMIN. E. SOLAR
ENERO	2559	9765000	4160709	5604290	42.61 %
FEBRERO	3381	8820000	4693054	4126945	53.21 %
MARZO	4121	5765000	6575503	3189496	67.34 %
ABRIL	4791	6614958	6300055	314942	95.24 %
MAYO	4556	6835498	6577291	258206	96.22 %
JUNIO	4738	6614998	4497515	117042	98.23 %
JULIO	5314	6835498	6835495	2	100.00 %
AGOSTO	5296	6835498	6835495	2	100.00 %
SEPTIEMBRE	4268	6614958	6380310	234648	96.45 %
OCTUBRE	3195	9765000	6141859	3623140	62.90 %
NOVIEMBRE	2784	9450000	4512325	4937674	47.75 %
DICIEMBRE	2703	5765000	4304142	5460857	44.08 %
TOTAL ANUAL	47313	97681408	69814080	27867296	71.47 %

TABLA 20

RENDIMIENTO - INCREMENTO DE TEMPERATURA

MES	RADIACION (KCAL/M2/DIA)	RENDIMIENTO ( % )	INCR. TEMP. ( C )	TEMP. FUNC ( C )
ENERO	2559	49.08	14.84	24.84
FEBRERO	3381	50.54	18.67	28.67
MARZO	4121	51.02	21.63	33.63
ABRIL	4791	45.16	37.68	47.68
MAYO	4556	44.11	40.98	50.98
JUNIO	4738	46.82	42.73	52.73
JULIO	5314	40.81	57.38	67.38
AGUSTO	5296	42.23	56.61	66.61
SEPTIEMBRE	4268	47.45	41.28	51.28
OCTUBRE	3395	57.04	22.02	32.02
NOVIEMBRE	2784	53.43	16.97	26.97
DICIEMBRE	2703	49.65	15.39	25.39
VALOR MEDIO	3992	48.11	32.35	42.35

TABLA 21

INSTALACION CONVENCIONAL

\*\*\*\*\*

MES	(KCAL: MES)	(TE: MES)	(PTS. )
ENERO	9763000	9765	19530
FEBRERO	8820000	8820	17640
MARZO	9763000	9765	19530
ABRIL	6614998	6614	13229
MAYO	6835498	6835	13670
JUNIO	6614998	6614	13229
JULIO	6835498	6835	13670
AGOSTO	6835498	6835	13670
SEPTIEMBRE	6614998	6614	13229
OCTUBRE	9763000	9765	19530
NOVIEMBRE	9450000	9450	18900
DICIEMBRE	9763000	9765	19530
TOTAL ANUAL	97681408	97631	195362

SEGUN LOS DATOS ANTERIORES, ESTA INSTALACION TENDRIA UN CONSUMO DE 97681. TER. DE COMBUSTIBLE ANUALMENTE, ES DECIR 195363. PTS. ANUALES.

TABLA 22

ENERGIA SUMINISTRADA POR LOS COLECTORES SOLARES

MES	(KCAL: MES)	(TE: MES)	( PTS. )
ENERO	4163709	4160	8321
FEBRERO	4693054	4693	9386
MARZO	4575303	4575	13151
ABRIL	6300355	6300	12600
MAYO	6571291	6577	13154
JUNIO	6457915	6497	12995
JULIO	6835495	6835	13670
AGOSTO	6835495	6835	13670
SEPTIEMBRE	6363310	6380	12760
OCTUBRE	6141459	6141	12283
NOVIEMBRE	4512125	4512	9024
DICIEMBRE	4304142	4304	8608
TOTAL ANUAL	69816080	69814	139628

LA INSTALACION DE 103.0 M2 DE COLECTORES SOLARES  
 PERMITIRIA EL AHORRO DE 69814 TE. DE COMBUSTIBLE, ES-  
 DEC. R 139628 PTS ANUALES

TABLA 23

ENERGIA AUXILIARA LA INSTALACION SOLAR

\*\*\*\*\*

MES	(KCAL: MES)	(TE: MES)	(PTS. )
ENERO	5664290	5604	11208
FEBRERO	4126945	4126	8253
MARZO	3187496	3189	6378
ABRIL	314742	314	629
MAYO	253206	258	516
JUNIO	117082	117	234
JULIO	2	0	0
AGOSTO	2	0	0
SEPTIEMBRE	236088	234	469
OCTUBRE	3621140	3623	7246
NOVIEMBRE	4937674	4937	9875
DICIEMBRE	5463857	5460	10921
TOTAL ANUAL	27667296	27867	55734

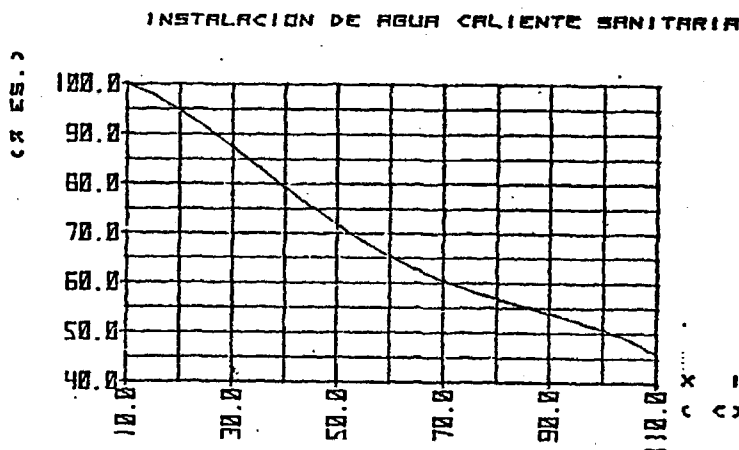
LA INSTALACION SOLAR NECESITARIA EL APOYO DE UNA FUENTE CONVENCIONAL QUE SUMINISTRARA COMO PROMEDIO EL 28.5% DE LA ENERGIA NECESARIA ANUALMENTE. ESTO SUPONE UN CONSUMO ANUAL EN ENERGIA AUXILIAR DE 27867 TE. DE COMBUSTIBLE ES DECIR 55734 PTS ANUALES

TABLA 24

- 3) Dicha inversión inicial permitiría un ahorro anual de 139.628 Ptas. en combustible, de las 195.363 Ptas. anuales calculadas como el consumo en combustible para el suministro del agua caliente sanitaria en dicha instalación por una fuente convencional.
- 4) El periodo de amortización de la inversión inicial sería de 8 años, es decir, el ahorro en combustible compensaría la inversión inicial en dicho periodo. A partir de este año la instalación produciría 139.628 Ptas/anuales de beneficio.

Temperatura de utilización.-

La gráfica 54 expresa la variación del aporte solar a la carga térmica de una instalación de agua caliente sanitaria, con la temperatura de utilización de la misma.



**FIG. 54** VARIACION DEL APORTE SOLAR CON LA TEMPERATURA DE UTILIZACION (REF. 100%)

en la que se observa que el aporte solar presenta una fuerte dependencia de la temperatura de utilización, motivada por la elevada temperatura de la unidad de acumulación, que produce bajos rendimientos de captación.

#### 6.2. Calefacción solar de viviendas.-

El calor necesario para el confort de edificios, puede ser suministrado por la energía solar, mediante sistemas que en esencia son versiones aumentadas de las instalaciones de agua caliente sanitaria.

La temperatura requerida para la calefacción, varía según sea el tipo de intercambiador utilizado para introducir el calor almacenado - al interior del edificio, y puede oscilar entre 40° y 70°C., temperaturas para las cuales pueden emplearse colectores solares planos.

Las componentes esenciales de éstas instalaciones son: colectores solares, unidad de almacenamiento, intercambiador de calor al interior del edificio, elementos de control, y fuente de energía auxiliar.

Uno de los aspectos importantes a considerar en una instalación de calefacción mediante energía solar, es el estudio de cargas térmicas del edificio a climatizar, que se realiza calculando el producto UA para cada uno de los elementos de pérdidas: pared, vidrios, suelo, techo, puertas e infiltración y renovación de aire necesario para mantener la pureza del ambiente.

En una instalación convencional, esta cantidad debe ser multiplicada por la diferencia de temperaturas entre la que se desea tener en

el interior del edificio y la temperatura exterior del mismo.

Dicha diferencia depende del nivel de confort deseado, oscilando, para Madrid, por ejemplo, entre  $-1^{\circ}$  y  $-3^{\circ}$ , cuando la temperatura media es del orden de  $4.5^{\circ}$  calculada para un periodo diario de 24 horas. Puesto que la instalación de calefacción solar, debe suplir la carga térmica sólo durante el periodo diario de calefacción, la temperatura media será superior a la anteriormente mencionada.

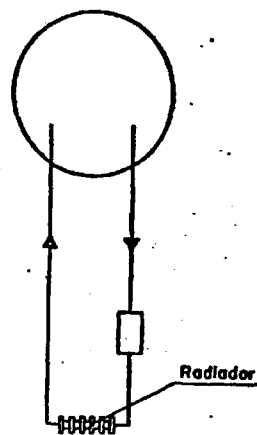
El proyectar la instalación de calefacción convencional a partir de la temperatura media exterior de  $-1^{\circ}$  ó  $-3^{\circ}$  lleva consigo un sobredimensionado de la caldera y radiadores, pero el consumo de combustible será sólo el necesario para suplir la carga en las condiciones reales que se presenten. Este sobredimensionado no supone un gasto elevado frente al coste total de la instalación a lo largo de toda su vida de funcionamiento, puesto que en una instalación convencional la inversión inicial sólo representa una fracción pequeña del coste total.

Una instalación solar, presenta como característica importante un gasto inicial de capital y puesto que éste tipo de instalaciones siempre deben llevar asociadas una instalación convencional de apoyo, pueden encontrarse soluciones más económicas al dimensionar la instalación según un método de día promedio, dejando a la fuente auxiliar encargada de suplir los casos extremos. El método grados días puede ser utilizado a éste propósito.

Un segundo aspecto a considerar en una instalación de calefacción solar, es el referente al compromiso: temperatura de funcionamiento

-potencia necesaria de los intercambiadores de calor al interior del edificio- modo de conexión de la fuente auxiliar.

Supongamos el esquema de la figura 55 . Una vez fijado el dimensionado de los intercambiadores al interior del edificio, queda impuesta la temperatura mínima de entrada en los mismos.



**FIG. 55** Instalación de calefacción solar con conexión de la fuente auxiliar en serie.

La fuente auxiliar, entrará en acción cuando la temperatura del agua almacenada en la unidad de acumulación sea inferior al valor mínimo impuesto.

En este tipo de instalaciones, la temperatura de retorno de los radiadores es en muchas ocasiones superior a la temperatura de la unidad de acumulación, con lo que se estará introduciendo energía en el mismo a base de la fuente auxiliar. Esto representa un inconveniente ya que impone una temperatura mínima de funcionamiento del sistema igual a la temperatura de retorno de los radiadores utilizados.

En una instalación según el esquema de la figura 56 en el cual la fuente auxiliar está instalada en paralelo con el sistema solar, la circulación puede ser dirigida por el circuito 1 ó 2 según que la temperatura de la unidad de almacenamiento sea superior o inferior a la de trabajo de los radiadores. Dicho sistema presenta igualmente el inconveniente de imponer una temperatura mínima de funcionamiento al sistema, con la consiguiente baja eficacia de captación de los colectores solares.

Un tercer modo de conexión de la fuente auxiliar es la de sobrecalentamiento eléctrico de aire. En dicho sistema, una unidad fan-coil transfiere el calor desde la unidad de acumulación al interior del edificio. El aire de salida del fan-coil se hace pasar por una batería de resistencias eléctricas que lo sobrecalienta si es necesario, con una intensidad de corriente variable a través de las mismas. La ventaja de este tipo de conexión de la fuente auxiliar, es que puede utilizar el agua almacenada a cualquier nivel de temperatura, produciéndose altos rendimientos en la instalación. La utilización de energía eléctrica, es su principal inconveniente a causa de su mayor precio, por lo cual a efectos económicos, dicho tipo de instalación puede llegar a ser rentable como una instalación de calefacción por radiadores, Fig. 57.

- ① Si  $T_{dp} < T_{min}$
- ② Si  $T_{dp} > T_{min}$

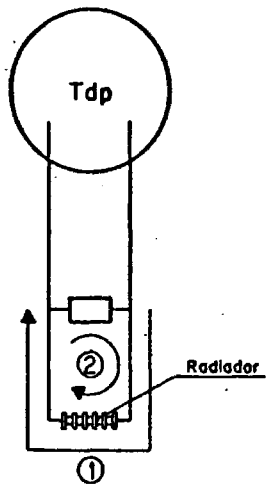
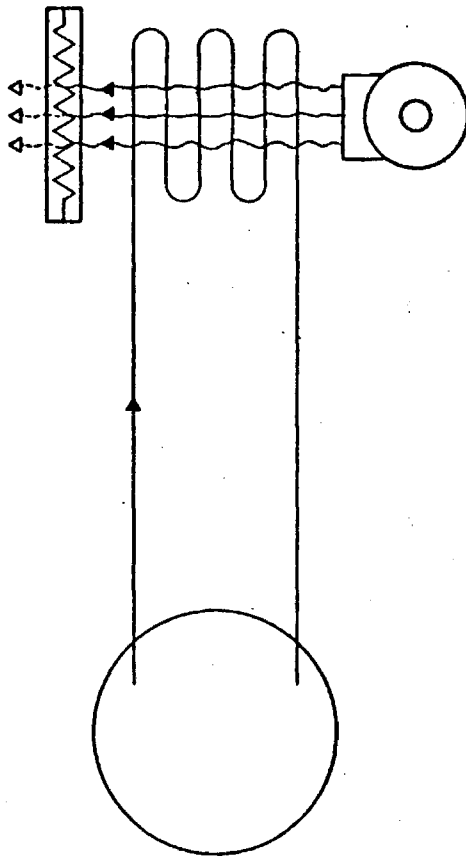


FIG. 56 Instalación de calefacción solar con conexión de la fuente auxiliar en paralelo.



**FIG. 57** Instalación de calefacción solar con sobrecalentamiento eléctrico del aire.

A efectos comparativos se exponen a continuación los resultados de la modelización de dos tipos de instalaciones de calefacción por energía solar, con distintas formas de conexión de la fuente auxiliar, según los conceptos expresados anteriormente (Tablas 25 a 36) :

Instalación de agua caliente sanitaria y calefacción para una vivienda unifamiliar en Madrid. El consumo previsto de agua caliente sanitaria es de 3760 KJ/h (900 Kcal/h), con un consumo en verano de un 70 % del correspondiente a invierno. Las temperaturas de utilización de la misma son 40 °C en invierno y 35 °C en verano.

El coste de la instalación solar se calcula a base de 12.000 Pts/m<sup>2</sup> de colector solar y 3825 Pts/m<sup>2</sup> de depósito construido.

La instalación alternativa es una instalación convencional de calefacción por propano, cuyo precio por MJ es de 0,48 Pts(2. Pts/term).

Se estudia el comportamiento comparativo de dos tipos diferentes de instalaciones solares:

1) Instalación de calefacción solar por fan-coil, con electricidad como fuente auxiliar y cuyo precio por termia es de 2,0 Pts. / term. (0,6 Pts / MJ). El factor C del fan-coil utilizado es de : 5,016 KJ/h/°C ( 1200 Kcal/h/°C).

2) Instalación de calefacción solar mediante radiadores sobredimensionados ( Factor K = 1254000 KJ / h ( 30.000 Kcal/h ) ), con propano como fuente auxiliar.

\*\*\*\*\*  
 DATOS DE ENTRADA  
 \*\*\*\*\*

- \* TIPO DE INSTALACION : AGUA CALIENTE Y CALEFACCION (FAN-COIL)
- \* PROVINCIA : MADRID
- \* LATITUD : 40 24 30
- \* SUPERFICIE COLECTORA : 45 M2
- \* INCLINACION : 45 GRADOS
- \* VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO : 3500 LITROS
- \* RENDIMIENTO DEL COLECTOR : FRITA)= 0.83 FR.UL=4.375
- \* DIAS DE FUNCIONAMIENTO A LA SEMANA : 7 DIAS
- \* COEFICIENTE GLOBAL DE PLACAS DEL EDIFICIO : 789. KCAL R H R C
- \* FACTOR C DEL FAN-COIL UTILIZADO : 1200. KCALR H R C
- \* PRECIO M2 DEPOSITO CONSTRUIDO : 2000. PTS R M2
- \* INVERSION INICIAL INSTALACION CONVENCIONAL : 500000. PTS
- \* INVERSION INICIAL INSTALACION SOLAR : 901797. PTS
- \* PRECIO M2 COLECTOR INSTALADO : 15000. RTS
- \* PRECIO TERIA ENERGIA CONVENCIONAL : 2.00 PTS R TERM
- \* PRECIO TERIA ENERGIA DE APoyo : 2.00 PTS R TEPH
- \* CARGA HIRAKIA DE AGUA CALIENTE SANITARIA :

HORA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
TERA R H	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
RAZON DIAS EN R MESES	1.0	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	1.0	1.0	1.0
TEMP. AG. SANIT	40.0	40.0	40.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	40.0	40.0	40.0
RAD. HORIZONTAL	154.8	232.9	338.8	465.9	504.9	559.0	614.8	548.0	385.4	257.2	177.7	151.2
GRADOS DIAS	316.2	240.4	192.2	102.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.0	204.0	300.7

D A T O S   D E   S A L I D A  
\*\*\*\*\*

1.- SUPERFICIE COLECTORA OPTIMA PARA LA INSTALACION CONSIDERADA.

45.0  
\*\*\*\*\*

2.- INCLINACION OPTIMA PARA UN MAXIMO APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR.

45.  
\*\*\*\*\*

3.- % PREVISTO DE UTILIZACION DE ENERGIA SOLAR.

71.3 %  
\*\*\*\*\*

4.- PERIODO DE AMORTIZACION.  
AÑO EN EL CUAL SE IGUALAN LOS COSTOS DE INSTALACION CONVENCIONAL (INSTALACION Y COMBUSTIBLE CONVENCIONAL) Y DE LA INSTALACION SOLAR (INSTALACION CONVENCIONAL, INSTALACION SOLAR Y COMBUSTIBLE AUXILIAR). A PARTIR DE ESTE AÑO, EMPIEZAN A PRODUCIRSE AHORROS POR LA UTILIZACION DE ENERGIA SOLAR.

13. AÑOS  
\*\*\*\*\*

5.- PRECIO DE LA INSTALACION.

A) INSTALACION CONVENCIONAL	20000.	PTS.
	*****	
B) INSTALACION ENERGIA SOLAR	70179.	PTS.
	*****	
C) PRECIO TOTAL	90179.	PTS.
	*****	

6.- PRECIO POR MILLON DE KCAL.

A) INSTALACION CONVENCIONAL	3287.	PTS A MILL
	*****	
B) INSTALACION ENERGIA SOLAR	2896.	PTS A MILL
	*****	

RESULTADOS MENSUALES

\*\*\*\*\*

MES	RAT. MES	T.MENS	REND	R.AC	CARGA	E.JT.MES	E.AUX.MES	# E.S.	KAC	VOLUMEN	AR. COL
ENERO	3572611.	26.38	52.05	52.05	3883344.	1848817.	2034520.	47.61	47.61	3500.	45.
FEBRERO	4231167.	27.00	55.16	53.74	3074533.	2252200.	822331.	73.25	58.94	3500.	45.
MARZO	5747388.	45.74	45.98	50.48	2513640.	2446235.	67405.	97.32	69.13	3500.	45.
ABRIL	3173202.	82.62	25.39	42.33	1391292.	1391292.	0.	100.00	71.08	3500.	45.
MAYO	6333320.	119.48	8.32	34.39	273420.	273420.	0.	100.00	73.74	3500.	45.
JUNIO	6145712.	118.20	3.77	29.37	264600.	264600.	0.	100.00	74.35	3500.	45.
JULIO	7181511.	137.79	7.70	25.36	273420.	273420.	0.	100.00	74.95	3500.	45.
AGOSTO	7130143.	139.67	8.03	22.67	273420.	273420.	0.	100.00	75.52	3500.	45.
SEPTIEMBRE	5702487.	125.14	7.37	21.32	264600.	264600.	0.	100.00	76.05	3500.	45.
OCTUBRE	4717237.	80.20	18.60	20.83	865578.	865578.	0.	100.00	77.64	3500.	45.
NOVIEMBRE	3759639.	38.39	45.53	22.32	2631384.	1736010.	895373.	65.97	75.69	3500.	45.
DICIEMBRE	3771317.	27.67	52.43	24.35	3712131.	1958704.	1753420.	52.76	71.30	3500.	45.
TOTAL ANUAL	65761000.	81.15	24.05	24.35	19421360.	13848295.	5573050.	71.30	71.30	3500.	45.
	0.		0.			0.		0.			0.

TABLA 27

ENERO  
\*\*\*\*\*

DIA	TFDP	TMUP	T.MS	K.CIA	NAUCIA	JUTIL	CARGA	U.ES	UAUXOI	LOSDP
1	23.1	22.3	20.3	52.49	173784.6	96426.8	125268.9	118067.8	7201.2	2235.0
2	22.6	24.4	20.9	39.43	75336.1	23705.3	125268.9	47404.5	77364.7	1649.9
3	23.0	24.8	21.7	48.70	102188.4	69708.7	125268.9	46454.3	78814.9	1714.4
4	23.7	26.2	20.1	53.34	130532.4	62909.8	125268.9	62670.6	59578.6	1824.8
5	23.9	26.5	20.5	54.32	136261.9	72512.8	125268.9	70118.4	58150.7	1845.9
6	23.6	26.1	20.8	53.38	126037.1	66938.1	125268.9	80216.3	59052.9	1800.3
7	23.3	25.4	20.7	51.23	113376.9	58134.3	125268.9	57516.1	67753.1	1738.7
8	22.1	22.6	20.3	21.30	41773.8	9087.3	125268.9	11564.1	113705.0	1596.4
9	22.3	23.0	20.5	33.33	58180.5	19536.6	125268.9	17219.7	108049.4	1526.0
10	22.4	23.2	20.8	35.09	61164.1	21463.2	125268.9	19775.4	105493.7	1532.1
11	21.9	29.7	20.6	57.39	175286.3	101490.8	125268.9	80191.8	45775.2	2076.1
12	21.3	30.7	20.4	57.39	175286.3	102229.4	125268.9	97743.8	27525.3	2158.5
13	21.3	31.0	20.6	57.67	179013.8	133236.8	125268.9	94954.7	25114.3	2174.0
14	22.0	29.3	20.0	50.32	199622.4	90224.5	125268.9	96142.3	27126.7	2021.6
15	22.8	29.5	20.1	57.33	167031.4	55317.3	125268.9	91109.3	34159.7	2337.1
16	23.0	25.1	21.6	47.34	54729.5	45418.0	125268.9	57052.4	68216.7	1659.5
17	23.3	25.5	20.7	52.73	115614.6	63765.6	125268.9	58029.7	67239.5	1693.6
18	23.3	24.9	21.5	49.34	57713.3	48231.2	125268.9	47673.1	77596.1	1621.5
19	22.1	22.5	20.0	19.12	37295.4	7243.1	125268.9	9162.0	116107.1	1418.1
20	25.4	27.9	20.5	57.12	193655.3	87761.2	125268.9	74377.8	58889.3	1873.9
21	22.9	24.6	20.7	45.31	84286.9	33695.8	125268.9	46344.1	79225.0	1581.8
22	23.0	25.9	20.7	54.34	123815.3	67237.2	125268.9	62357.4	62411.8	1691.6
23	22.3	24.2	20.3	45.53	81303.3	37019.8	125268.9	48377.4	86891.7	1541.8
24	23.1	24.9	21.7	50.50	54950.4	50574.6	125268.9	47856.1	77413.1	1590.4
25	23.7	23.0	20.2	59.39	206413.6	123919.4	125268.9	84523.3	40745.7	2269.3
26	25.2	29.6	20.4	58.33	168434.0	82643.8	125268.9	110158.7	14912.2	1978.3
27	26.0	28.0	20.3	57.33	158130.8	91124.9	125268.9	86448.0	36821.1	1904.6
28	22.1	23.0	20.6	23.33	40275.0	9643.5	125268.9	21769.7	103499.5	1409.8
29	24.5	27.1	20.4	56.76	140574.9	80317.7	125268.9	49906.9	55362.2	1744.8
30	22.7	24.1	20.9	43.84	73844.3	32353.3	125268.9	37403.0	87866.1	1488.2
31	22.1	22.5	20.2	23.49	38787.2	9284.7	125268.9	9804.6	119464.6	1351.3

TABLA 28

TE	FPDP	REUJ	KUJ	CARG	E.S.	MAUX	LUS	TE	TFDP	RENO	RAD	CARG	E.S.	GAUX	LUS	TE	TFDP	RENO	RAD	CARG	E.S.	GAUX	LUS
31..	27.0	3.3	3	78	78	0	151	32.7	30.4	0.0	0	78	78	0	100	33.9	23.5	0.0	0	78	78	0	148
32..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	30.4	28.1	0.0	0	78	78	0	141	23.5	26.3	0.0	0	78	78	0	129
33..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	28.1	26.0	0.0	0	78	78	0	126	26.3	24.8	0.0	0	78	78	0	116
34..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	26.0	25.4	51.5	287	78	78	4	30	24.8	24.9	82.6	203	78	33	45	109
35..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	25.4	25.4	62.0	430	78	78	2	24	24.8	26.1	57.0	305	78	35	44	107
36..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	64.7	541	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
37..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	66.2	606	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
38..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	67.7	671	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
39..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	69.2	736	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
40..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	70.7	801	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
41..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	72.2	866	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
42..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	73.7	931	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
43..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	75.2	996	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
44..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	76.7	1061	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
45..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	78.2	1126	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
46..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	79.7	1191	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
47..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	81.2	1256	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
48..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	82.7	1321	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
49..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	84.2	1386	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
50..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	85.7	1451	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
51..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	87.2	1516	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
52..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	88.7	1581	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
53..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	90.2	1646	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
54..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	91.7	1711	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
55..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	93.2	1776	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
56..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	94.7	1841	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
57..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	96.2	1906	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
58..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	97.7	1971	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
59..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	99.2	2036	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
60..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	100.7	2101	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
61..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	102.2	2166	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
62..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	103.7	2231	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
63..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	105.2	2296	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
64..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	106.7	2361	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
65..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	108.2	2426	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
66..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	109.7	2491	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
67..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	111.2	2556	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
68..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	112.7	2621	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
69..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	114.2	2686	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
70..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	115.7	2751	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
71..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	117.2	2816	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
72..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	118.7	2881	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
73..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	120.2	2946	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
74..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	121.7	3011	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
75..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	123.2	3076	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
76..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	124.7	3141	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
77..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	126.2	3206	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
78..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	127.7	3271	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
79..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	129.2	3336	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
80..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	130.7	3401	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
81..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	132.2	3466	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
82..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	133.7	3531	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
83..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	135.2	3596	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
84..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	136.7	3661	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78	49	29	113
85..	26.7	26.7	0.0	78	78	0	142	24.8	24.8	138.2	3726	78	78	0	145	24.8	27.1	61.0	304	78			

CALCULO ECONOMICO

MES	TAO	E. N.C.	E. P. C.O.L	DIFERENCIA
1	255.753	3831344.	1843317.	2034527.
2	333.183	3071233.	2252230.	822332.
3	412.173	2511340.	2443235.	67405.
4	479.274	1391292.	0.	0.
5	527.301	213320.	213320.	0.
6	677.443	261300.	261300.	0.
7	534.876	213320.	213320.	0.
8	530.507	273320.	273320.	0.
9	526.851	261300.	261300.	0.
10	337.587	865378.	865378.	0.
11	270.490	2631384.	1736310.	895374.
12	270.324	3712131.	1558704.	1753427.

ENERGIA JFIL COLECTORES= 1584295. ENERGIA AUXILIAR= 5973065.

MES	CON. CUV	POUV	CUY AUX	AJK	INV. E.S.	INV. PRUP.	CONB. AUX	CON. CUV	G.T.E.C.	G.T.E.S.	AMORRO.
1	19421.	2.3	5573.	2.3	531797.0	500000.0	11146.1	3642.7	4816989.5	14941717.3	-6122727.8
2	19421.	2.3	5573.	2.3			13041.0	45443.0	646776.6	185596.1	-5661547.2
3	19421.	4.7	5573.	4.7			15257.9	53171.8	658024.8	188231.8	-5192346.2
4	19421.	3.2	5573.	3.2			17851.8	62211.0	669468.7	192107.7	-4714485.2
5	19421.	3.7	5573.	3.7			20865.6	72768.8	681111.6	195468.7	-4229322.3
6	19421.	4.4	5573.	4.4			24437.3	85163.6	692937.0	198847.8	-3735213.1
7	19421.	5.1	5573.	5.1			28591.6	99637.9	705008.3	202306.0	-3232510.7
8	19421.	6.0	5573.	6.0			33452.2	116576.3	717269.2	205824.3	-2721365.8
9	19421.	7.0	5573.	7.0			39139.1	136394.3	725743.4	209403.8	-2200726.3
10	19421.	8.2	5573.	8.2			45792.7	155581.3	742434.6	213045.6	-1671337.4
11	19421.	9.3	5573.	9.3			53577.5	180713.1	755346.4	216750.8	-1132741.7
12	19421.	11.2	5573.	11.2			62655.6	214450.8	768432.9	220420.3	-584779.2
13	19421.	13.2	5573.	13.2			73342.2	255587.4	781887.7	224355.5	-27286.9
14	19421.	15.4	5573.	15.4			85810.4	295337.3	795445.1	228257.5	539900.9
15	19421.	18.0	5573.	18.0			100398.1	345873.4	809278.5	232226.9	1116952.5
16	19421.	21.1	5573.	21.1			117465.7	403351.6	823352.3	236205.4	1704039.4
17	19421.	24.7	5573.	24.7			137434.8	478941.2	837671.1	240374.3	2301336.2
18	19421.	28.9	5573.	28.9			160749.7	560381.2	852339.3	244554.7	2909020.8
19	19421.	33.8	5573.	33.8			188154.4	658622.3	857060.5	248807.7	3427273.6
20	19421.	39.5	5573.	39.5			220117.2	787077.9	862139.6	253134.8	4156278.5

TABLA 30

\*\*\*\*\*  
 DATOS DE ENTRADA  
 \*\*\*\*\*

\* TIPO DE INSTALACION : AGUA CALIENTE Y CALEFACCION (RADIADORES)  
 \* PROVINCIA : MADRID  
 \* LATITUD : 40 24 30  
 \* SUPERFICIE COLECTORA : 45 M2  
 \* INCLINACION : 45 GRADOS  
 \* ORIENTACION : 3 GRADOS  
 \* VOLUMEN DE ALMACENAMIENTO : 3500 LITROS  
 \* RENDIMIENTO DEL COLECTOR : FR(TA)= 0.83 FR.UL=4.375  
 \* DIAS DE FUNCIONAMIENTO A LA SEMANA : 7 DIAS  
 \* COEFICIENTE GLOBAL DE PERDIDAS DEL EDIFICIO : 789. KCAL R H R C  
 \* FACTOR K DE LOS RADIADORES UTILIZADOS : 30000. KCAL R H  
 \* PRECIO M2 DEPOSITO CONSTRUIDO : 2000. PTS R M2  
 \* INVERSION INICIAL INSTALACION CONVENCIONAL : 500000. PTS  
 \* INVERSION INICIAL INSTALACION SOLAR : 901797. PTS  
 \* PRECIO M2 COLECTOR INSTALADO : 15000. PTS  
 \* PRECIO TERMA ENERGIA CONVENCIONAL : 2.00 PTS R TERM  
 \* PRECIO TERMA ENERGIA DE APOYO : 2.00 PTS R TERM  
 \* CARGA HORARIA DE AGUA CALIENTE SANITARIA :

HORA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
KCAL R H	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
RAZON CONS EN R MESES	1.0	1.0	1.0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	1.0	1.0	1.0
TEMP. AG. SANIT	40.0	40.0	40.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	35.0	40.0	40.0	40.0
RAD. HORIZONTAL	154.9	235.9	338.8	465.5	504.1	559.0	614.8	548.0	385.4	257.2	177.7	151.2
GRADOS DIAS	116.2	246.4	192.2	102.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	43.0	204.0	300.7

C A T O S D E S A L I D A

\*\*\*\*\*

1.- SUPERFICIE COLECTORA OPTIMA PARA LA INSTALACION CONSIDERADA.

45.0

\*\*\*\*\*

2.- INCLINACION OPTIMA PARA UN MAXIMO APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR.

45.

\*\*\*\*\*

3.- % PREVISTO DE UTILIZACION DE ENERGIA SOLAR.

59.2 %

\*\*\*\*\*

4.- PERIODO DE AMORTIZACION.  
 AÑO EN EL CUAL SE IGUALAN LOS COSTOS DE INSTALACION CONVENCIONAL (INSTALACION Y COMBUSTIBLE CONVENCIONAL) Y DE LA INSTALACION SOLAR (INSTALACION CONVENCIONAL, INSTALACION SOLAR Y COMBUSTIBLE AUXILIAR). A PARTIR DE ESTE AÑO, EMPIEZAN A PRODUCIRSE AHORROS POR LA UTILIZACION DE ENERGIA SOLAR.

15. AÑOS

\*\*\*\*\*

5.- PRECIO DE LA INSTALACION.

A)	INSTALACION CONVENCIONAL	200003.	PTS.
		*****	
B)	INSTALACION ENERGIA SOLAR	701797.	PTS.
		*****	
C)	PRECIO TOTAL	901797.	PTS.
		*****	

6.- PRECIO POR MILLON DE KCAL.

A)	INSTALACION CONVENCIONAL	3287.	PTS A MILL
		*****	
B)	INSTALACION ENERGIA SOLAR	3139.	PTS A MILL
		*****	

TABLA 32

RESULTADOS MENSUALES

\*\*\*\*\*

MES	RAJ. MES	T.MENS	REND	R.AC	CARGA	E.UT.MES	E.AUX.MES	T E.S.	PAC	VOLUMEN	AR. COL
ENERO	3573614.	42.31	34.47	34.47	3883344.	1116321.	2767015.	28.75	28.75	3500.	45.
FEBRERO	4261170.	42.08	41.65	38.38	3074533.	1675495.	1399033.	54.50	40.12	3500.	45.
MARZO	5743892.	48.38	43.65	40.51	2513640.	2338072.	175968.	93.02	54.16	3500.	45.
ABRIL	6407917.	82.63	20.35	36.02	1391292.	1391292.	0.	100.00	60.03	3500.	45.
MAYO	4350377.	119.43	0.36	29.36	272420.	273420.	0.	100.00	61.01	3500.	45.
JUNIO	037230.	118.20	8.84	25.36	264600.	264600.	0.	100.00	61.92	3500.	45.
JULIO	7413814.	137.79	7.75	22.11	273420.	273420.	0.	100.00	62.81	3500.	45.
AGOSTO	7388978.	139.67	8.04	19.53	273420.	273420.	0.	100.00	63.66	3500.	45.
SEPTIEMBRE	5702489.	125.14	7.37	16.57	264600.	264600.	0.	100.00	64.45	3500.	45.
OCTUBRE	4737235.	80.20	18.60	18.58	865578.	865578.	0.	100.00	66.80	3500.	45.
NOVIEMBRE	3759608.	46.00	38.64	19.80	2631384.	1427927.	1203454.	54.27	64.70	3500.	45.
DICIEMBRE	3771017.	42.49	37.41	20.81	3712131.	1324745.	2387377.	35.69	59.16	3500.	45.
TOTAL ANUAL	65030288.	85.61	20.81	20.91	19421360.	11488889.	7932447.	59.16	57.16	3500.	45.
	0.		0.			0.		0.			0.

ENERO  
\*\*\*\*\*

J/A	TFJP	THOP	T.MS	R.DIA	RADIA	QUITL	CARGA	O.E.S	GAUXDI	LOSUP
1	41.2	41.7	40.0	46.13	173744.6	80267.8	125268.9	55445.6	69923.5	3155.2
2	41.0	41.3	40.4	13.49	10160.3	10160.3	125268.9	7796.4	117472.8	3113.7
3	41.1	41.7	40.8	26.47	102188.4	27453.2	125268.9	24088.6	101180.6	3138.0
4	41.1	42.2	40.8	35.26	130532.6	66003.9	125268.9	62752.9	82516.3	3175.0
5	41.1	42.3	40.1	36.12	134261.9	48762.0	125268.9	45527.4	79741.8	3180.4
6	41.1	42.1	40.4	34.28	126057.1	43206.8	125268.9	40128.1	85141.1	3153.5
7	41.1	41.9	40.6	30.55	113376.9	35992.4	125268.9	31986.7	93282.5	3129.4
8	40.2	40.6	40.0	0.3	41770.8	0.0	125268.9	0.0	125269.2	3014.4
9	40.3	40.2	40.4	5.43	58180.5	3161.9	125268.9	0.0	125269.2	2976.7
10	40.7	40.5	40.7	7.47	61164.1	4571.6	125268.9	0.0	125269.2	2993.2
11	41.3	44.5	44.0	44.55	175286.3	78083.7	125268.9	72671.1	52577.9	3328.8
12	41.3	44.9	44.3	44.30	177223.9	79277.9	125268.9	75905.9	49283.2	3351.0
13	41.4	45.0	44.5	45.30	179015.8	80666.6	125268.9	77180.3	46089.8	3355.4
14	41.2	43.7	41.6	42.21	159622.4	67384.5	125268.9	64845.7	60423.4	3239.5
15	41.2	44.2	40.3	43.50	167081.4	72672.8	125268.9	49315.1	59954.0	3272.5
16	41.1	41.7	40.5	25.03	54729.5	23765.6	125268.9	21247.4	104021.8	3055.3
17	41.1	41.9	40.8	32.42	115414.7	37433.5	125268.9	44167.1	90902.1	3072.2
18	41.1	41.7	40.7	26.55	97713.1	25939.2	125268.9	22929.7	102339.4	3043.4
19	41.2	40.6	40.0	0.0	37295.4	0.0	125268.9	0.0	125269.2	2947.5
20	41.2	43.0	40.8	41.08	153655.3	64503.0	125268.9	50321.7	67217.4	3145.4
21	41.0	41.5	40.8	20.73	84286.9	17472.7	125268.9	14866.6	110402.5	3010.5
22	41.1	42.1	40.0	34.97	123815.3	43300.1	125268.9	40132.0	85137.1	3054.3
23	41.0	41.4	40.8	19.40	81303.4	15772.9	125268.9	12928.0	11241.1	2991.5
24	41.1	41.7	40.9	27.30	99350.8	27946.0	125268.9	24339.3	100429.8	3010.7
25	41.1	47.5	52.4	48.77	206613.6	100771.7	125268.9	83135.8	42133.3	3498.3
26	41.1	43.3	40.8	41.04	148434.0	60919.5	125268.9	71519.9	53649.2	3132.2
27	41.2	43.7	41.7	42.83	158130.8	67815.6	125268.9	64518.0	60751.1	3161.2
28	40.4	40.7	40.0	0.3	40279.0	0.0	125268.9	0.0	125269.2	2905.0
29	41.1	42.5	40.8	40.19	140574.9	56655.5	125268.9	50916.4	74352.4	3045.4
30	41.0	41.3	40.2	15.67	73864.4	11568.1	125268.9	9024.9	116244.3	2941.2
31	40.2	40.6	40.0	0.0	38787.2	0.0	125268.9	0.0	125269.2	2872.2

TABLA 34

TE	TFDP	REND	RAD	CARG	E.S.	CAUX	LOS
DIA: 49							
41.2	39.5	0.0	0	7J	56	22	215
39.2	39.3	0.0	0	78	6	72	208
39.2	39.2	0.0	106	78	0	78	204
39.2	40.6	35.1	307	78	0	78	204
40.2	42.4	50.2	451	78	37	41	204
42.2	44.2	55.4	510	78	78	0	214
44.2	46.7	57.2	633	78	78	0	225
46.1	49.1	56.0	650	78	78	0	236
49.1	50.6	51.3	533	78	78	0	245
50.2	50.8	42.5	451	78	78	0	247
50.2	49.4	23.5	337	78	78	0	238
49.2	47.1	0.0	106	78	78	0	229
47.1	44.8	0.0	0	78	78	0	220
46.2	42.5	0.0	0	78	78	0	211
DIA: 52							
39.2	39.2	0.0	0	78	0	78	212
39.2	39.1	0.0	0	78	0	78	206
39.2	39.0	0.0	90	78	0	78	202
39.2	39.6	20.3	223	78	0	78	197
39.2	41.1	41.5	343	78	8	71	197
41.1	42.2	43.4	431	78	54	24	200
42.1	43.1	51.4	433	78	78	0	202
43.1	44.0	51.2	433	78	78	0	203
44.1	44.3	46.3	431	78	78	0	205
46.1	43.7	37.3	343	78	78	0	201
43.7	41.9	13.0	223	78	78	0	191
41.9	39.6	0.0	0	78	77	2	182
39.6	39.3	0.0	0	78	9	69	195
39.2	39.3	0.0	0	78	0	78	190
DIA: 55							
41.2	39.6	0.0	0	78	68	10	214
39.6	39.3	0.0	0	78	8	71	206
39.2	39.2	0.0	48	78	0	78	202
39.2	39.2	0.0	135	78	0	78	193
39.2	39.6	16.4	203	78	0	78	186
39.2	40.3	29.8	255	78	7	71	196
40.3	40.7	35.1	280	78	29	50	185
40.7	40.8	35.4	280	78	41	37	182
40.8	40.5	29.9	255	78	43	35	180
40.5	39.9	17.6	203	78	34	44	176
39.9	39.4	0.0	135	78	17	61	173
39.4	39.3	0.0	48	78	1	77	178
39.3	39.2	0.0	0	78	0	78	183
39.2	39.2	0.0	0	78	0	78	187
DIA: 58							
39.2	39.2	0.0	0	78	0	78	211
39.2	39.2	0.0	0	78	0	78	205
39.2	39.1	0.0	109	78	0	78	200
39.1	40.5	36.4	337	78	0	78	200
40.5	42.5	51.2	463	78	36	42	201
42.5	44.4	56.1	533	78	78	0	209
44.4	47.0	57.9	634	78	78	0	221
47.0	49.4	56.7	654	78	78	0	232
49.4	51.3	52.3	533	78	78	0	241
51.3	51.3	43.4	463	78	78	0	243
51.3	50.0	24.7	307	78	78	0	235
50.0	47.7	0.0	109	78	78	0	227

TE	TFDP	REND	RAD	CARG	E.S.	CAUX	LOS
DIA: 50							
42.5	40.2	0.0	0	78	79	0	219
40.2	39.4	0.0	0	78	27	52	209
39.4	39.3	0.0	101	78	2	76	204
39.3	40.4	31.9	237	78	0	78	203
40.4	42.1	48.3	430	78	32	46	204
42.1	43.5	53.9	541	78	78	0	209
43.5	45.6	56.1	606	78	78	0	218
45.6	47.6	55.1	606	78	78	0	226
47.6	48.8	50.5	541	78	78	0	234
48.8	48.8	41.7	430	78	78	0	234
48.8	47.3	22.6	237	78	78	0	225
47.3	45.0	0.0	101	78	78	0	216
45.0	42.7	0.0	0	78	78	0	207
42.7	40.4	0.0	0	78	78	0	198
DIA: 53							
39.3	39.2	0.0	0	78	0	78	212
39.2	39.1	0.0	0	78	0	78	206
39.1	39.1	0.0	106	78	0	78	202
39.1	40.4	34.9	302	78	0	78	201
40.4	42.3	50.2	453	78	32	47	204
42.3	44.1	55.3	570	78	78	0	211
44.1	46.5	57.2	639	78	78	0	221
46.5	48.8	56.0	639	78	78	0	231
48.8	50.2	51.4	570	78	78	0	240
50.2	50.4	42.7	453	78	78	0	241
50.4	49.0	23.7	302	78	78	0	233
49.0	46.7	0.0	106	78	78	0	224
46.7	44.4	0.0	0	78	78	0	215
44.4	42.1	0.0	0	78	78	0	206
DIA: 56							
39.2	39.1	0.0	0	78	0	78	210
39.1	39.1	0.0	0	78	0	78	204
39.1	39.0	0.0	82	78	0	78	200
39.0	39.6	21.9	232	78	0	78	195
39.6	41.2	42.6	348	78	8	70	195
41.2	42.3	49.3	438	78	57	22	198
42.3	43.3	52.2	491	78	78	0	200
43.3	44.3	51.9	491	78	78	0	202
44.3	44.7	47.5	438	78	78	0	204
44.7	44.1	38.7	348	78	78	0	201
44.1	42.4	15.0	232	78	78	0	191
42.4	40.1	0.0	82	78	78	0	182
40.1	39.4	0.0	0	78	22	56	183
39.4	39.3	0.0	0	78	2	77	187
DIA: 59							
43.0	40.7	0.0	0	78	78	0	219
40.7	39.5	0.0	0	78	42	36	206
39.5	39.3	0.0	116	78	4	74	200
39.3	40.9	39.2	330	78	0	78	201
40.9	42.9	52.9	496	78	47	31	203
42.9	45.2	57.5	624	78	78	0	213
45.2	48.2	58.9	699	78	78	0	227
48.2	51.0	57.5	699	78	78	0	241
51.0	53.0	52.8	624	78	78	0	252
53.0	53.5	44.2	496	78	78	0	255
53.5	52.2	25.6	330	78	78	0	248
52.2	49.9	0.0	116	78	78	0	240
49.9	47.6	0.0	0	78	78	0	231

TE	TFDP	REND	RAD	CARG	E.S.	CAUX	LOS
DIA: 51							
40.4	39.4	0.0	0	78	33	45	214
39.4	39.3	0.0	0	78	3	76	208
39.3	39.2	0.0	72	78	0	78	203
39.2	39.5	12.4	203	78	0	78	197
39.5	40.7	36.7	305	78	5	73	195
40.7	41.7	44.9	384	78	42	36	197
41.7	42.3	48.3	430	78	71	8	197
42.3	42.7	48.3	430	78	78	0	196
42.7	42.5	44.1	384	78	78	0	145
42.5	41.6	35.0	305	78	78	0	190
41.6	40.0	14.4	203	78	66	10	180
40.0	39.4	0.0	72	78	19	59	181
39.4	39.3	0.0	0	78	1	77	185
39.3	39.2	0.0	0	78	0	78	190
DIA: 54							
42.1	39.8	0.0	0	78	78	0	215
39.8	39.3	0.0	0	78	14	64	207
39.3	39.3	0.0	104	78	0	78	202
39.3	40.5	33.4	296	78	0	78	201
40.5	42.3	49.6	445	78	35	43	203
42.3	43.4	55.0	559	78	78	0	209
43.4	46.2	57.0	627	78	78	0	219
46.2	48.4	55.8	627	78	78	0	229
48.4	49.8	51.3	559	78	78	0	237
49.8	49.9	42.5	445	78	78	0	238
49.9	48.5	23.6	296	78	78	0	229
48.5	46.2	0.0	104	78	78	0	220
46.2	43.9	0.0	0	78	78	0	212
43.9	41.6	0.0	0	78	78	0	203
DIA: 57							
39.3	39.2	0.0	0	78	0	78	211
39.2	39.2	0.0	0	78	0	78	205
39.2	39.1	0.0	88	78	0	78	200
39.1	39.9	25.8	249	78	0	78	196
39.9	41.5	44.4	373	78	16	62	196
41.5	42.7	51.2	470	78	65	13	199
42.7	44.0	53.9	527	78	78	0	204
44.0	45.3	53.3	527	78	78	0	208
45.3	46.0	48.9	470	78	78	0	212
46.0	45.6	40.1	373	78	78	0	209
45.6	44.0	20.8	249	78	78	0	200
44.0	41.7	0.0	88	78	78	0	191
41.7	39.6	0.0	0	78	71	8	184
39.6	39.3	0.0	0	78	8	70	187
DIA: 60							
45.3	43.6	0.0	0	58	58	0	236
43.6	41.9	0.0	20	58	58	0	220
41.9	40.2	0.0	151	58	58	0	205
40.2	39.7	32.6	291	58	58	0	193
39.7	40.5	48.6	411	58	58	0	188
40.5	42.3	54.3	505	58	58	0	195
42.3	44.7	56.0	563	58	58	0	206
44.7	46.9	54.8	563	58	58	0	215
46.9	48.5	50.0	505	58	58	0	224
48.5	48.9	41.6	411	58	58	0	227
48.9	48.2	25.1	291	58	58	0	223
48.2	46.4	0.0	151	58	58	0	218
46.4	44.7	0.0	20	58	58	0	213

CALCULO ECONÓMICO  
\*\*\*\*\*

MES	RAD	E. NEC.	E. P. COL	DIFERENCIA
1	255.958	3883344.	1116321.	2767023.
2	338.167	3074533.	1675495.	1399038.
3	412.179	2513540.	2339072.	175568.
4	479.105	1391292.	1331292.	0.
5	455.655	273420.	273420.	0.
6	473.870	264600.	264600.	0.
7	531.457	273420.	273420.	0.
8	529.676	273420.	273420.	0.
9	426.851	264600.	264600.	0.
10	339.586	865578.	865578.	0.
11	278.489	2631384.	1427927.	1203457.
12	270.324	3712131.	1324745.	2387385.

ENERGIA UTIL COLECTORES= 11488885. ENERGIA AUXILIAR= 7332471.

MES	CON	COV	PCJV	CON	AUX	P	AUX	INV.E.S.	INV. PROP.	COMB.AUX	COM.CONV	G.T.E.C.	G.T.E.S.	AMORRO
1	19421.	2.0	7932.	2.0	501797.0	500000.0	15864.9	38842.7	8818909.5	15018447.9	-6144958.4			
2	19421.	2.3	7932.	2.3	18552.0	45446.0	646776.6	264169.8	-5817351.6					
3	19421.	2.7	7932.	2.7	21717.5	53171.8	656024.8	268764.0	-5428090.8					
4	19421.	3.2	7932.	3.2	25439.5	62211.0	669468.7	273438.2	-5032060.3					
5	19421.	3.7	7932.	3.7	29729.1	72786.8	681111.6	278193.6	-4629142.3					
6	19421.	4.4	7932.	4.4	34733.0	85160.6	692957.0	283031.7	-4219217.0					
7	19421.	5.1	7932.	5.1	40636.1	99037.9	705008.3	287954.0	-3802162.7					
8	19421.	6.0	7932.	6.0	47614.5	116576.3	717269.2	292961.8	-3377855.3					
9	19421.	7.0	7932.	7.0	55738.9	136394.3	729743.4	298856.8	-2946166.7					
10	19421.	8.2	7932.	8.2	65179.5	159581.3	742436.6	303240.4	-2506774.5					
11	19421.	9.6	7932.	9.6	76263.0	186713.1	755346.4	308514.1	-2060142.2					
12	19421.	11.2	7932.	11.2	89224.2	218450.8	768482.9	313879.6	-1605538.9					
13	19421.	13.2	7932.	13.2	104392.3	255587.4	781847.7	319338.3	-1153329.5					
14	19421.	15.4	7932.	15.4	122138.9	299037.3	795445.1	324892.0	-672476.5					
15	19421.	18.0	7932.	18.0	142932.5	349873.4	809278.5	330542.2	-193740.2					
16	19421.	21.1	7932.	21.1	167135.8	409351.6	823352.3	336290.5	293321.7					
17	19421.	24.7	7932.	24.7	195619.0	478441.2	837671.1	342138.9	746854.0					
18	19421.	28.9	7932.	28.9	228874.2	560361.2	852239.3	348089.1	1293004.2					
19	19421.	33.8	7932.	33.8	267782.8	655022.3	867060.5	354142.7	1805922.0					
20	19421.	39.5	7932.	39.5	313305.7	767077.9	882139.6	360301.6	2327760.0					

TABLA 36

Los resultados son los siguientes :

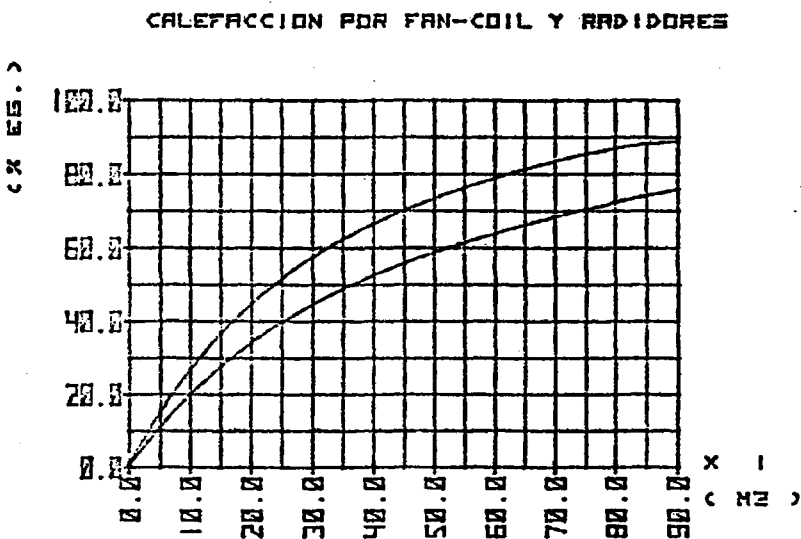
. La instalación de calefacción por Fan-coil, necesita  $45 \text{ m}^2$  de colectores solares para proporcionar el 71.3 % de la carga térmica necesaria.

. La instalación de calefacción solar por radiadores proporciona con la misma superficie colectora, un 59.2 % de la carga térmica. La causa de este menor aporte solar en el caso de instalaciones por radiadores, es la menor potencia de los mismos, lo cual provoca temperaturas medias de almacenamiento de  $42.3 \text{ }^\circ\text{C}$  en Enero mientras que la instalación de fan-coil presenta temperaturas medias de almacenamiento de  $26.4 \text{ }^\circ\text{C}$  en el mismo mes.

. Los rendimientos de ambas instalaciones son bajos debido a que las necesidades de calefacción en verano son nulas y la instalación solar de  $45 \text{ m}^2$  de colectores solares, supliendo únicamente la pequeña carga de agua caliente sanitaria conduce a temperaturas de almacenamiento muy elevadas.

. En el aspecto económico, es necesario destacar que si bién el rendimiento de la instalación con Fan-coil es superior, dicha instalación impone el uso de una fuente de energía de precio superior, lo que produce que el periodo de amortización en ambas instalaciones sea del mismo orden.

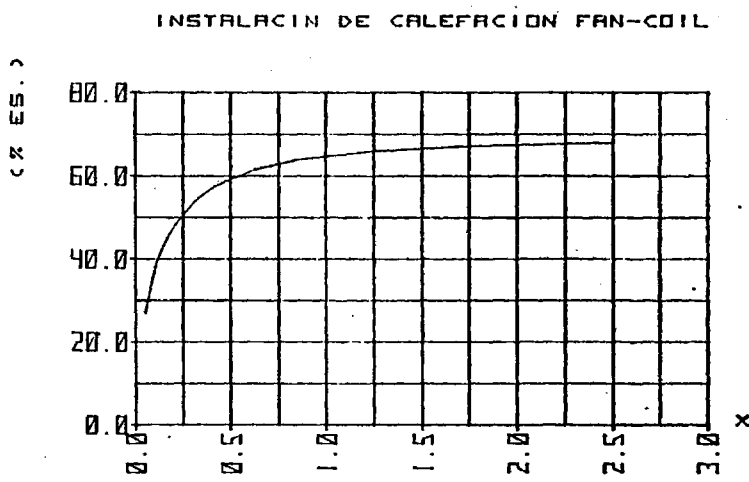
. La Fig. 58 muestra la variación del aporte solar con diferentes superficies colectoras en ambos casos.



**FIG 58** VARIACION DEL APORTE SOLAR CON LA DIMENSION DE LA SUPRFICIE COLECTORA

En ellas se han supuesto fijas las potencias de los intercambiadores de calor al interior del edificio utilizado.

Las gráficas 59 y 60 muestran la influencia de dicho parámetro sobre el aporte solar de la instalación :



**FIG. 59** VARIACION DEL APORTE SOLAR CON EL COCIENTE (FACTOR C / UA) FAN-COIL

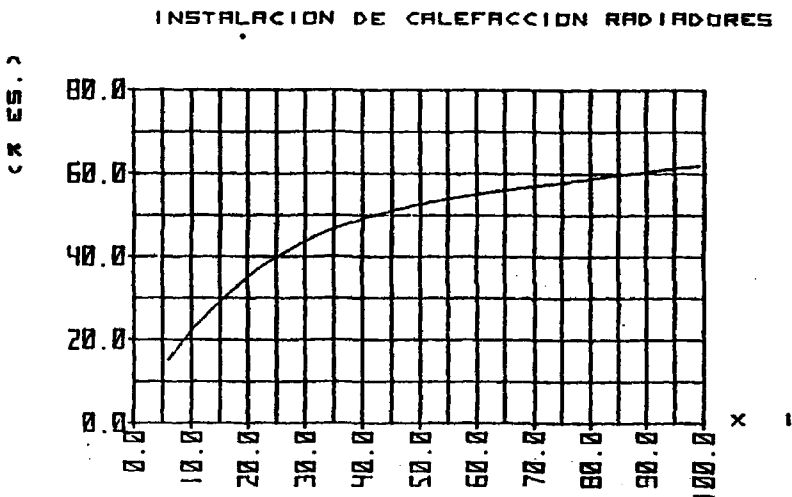


FIG. 60 VARIACION DEL APORTE SOLAR CON EL COCIENTE (FACTOR K/UA) RADIADOR

en las cuales, las potencias de los intercambiadores han sido referidas al factor UA del edificio. Los valores óptimos para ésta variable están comprendidos entre 1 y 2 para el cociente C /UA (fan-coil) y del orden de 40 para el cociente K /UA (radiadores).

7. Resultados económicos .- Influencia sobre la rentabilidad de los siguientes parámetros.

A continuación se expone la influencia de los distintos parámetros económicos sobre la rentabilidad de la instalación, definida mediante el periodo de amortización de la instalación, es decir, el tiempo que debe transcurrir para que el ahorro en combustibles producido por la instalación compense la diferencia entre inversiones iniciales de la instalación solar y la instalación convencional que se presenta como alternativa. Se presentan las gráficas de ambas instalaciones : agua caliente sanitaria y calefacción por fan-coil, a efectos comparativos.

7.1. Precio del combustible convencional.

Para un valor fijo de la inversión inicial, las Fig. 61 y 62 presentan el periodo de amortización de la instalación solar con el precio del combustible convencional con el cual, la instalación solar debe competir:

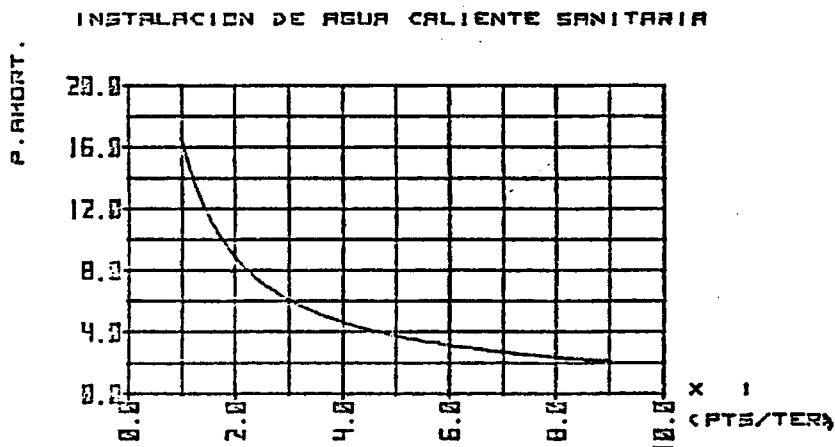


FIG. 61 VARIACION DEL PERIODO DE AMORTIZACION CON EL PRECIO ENERGIA CONVENCIONAL Y APOYO

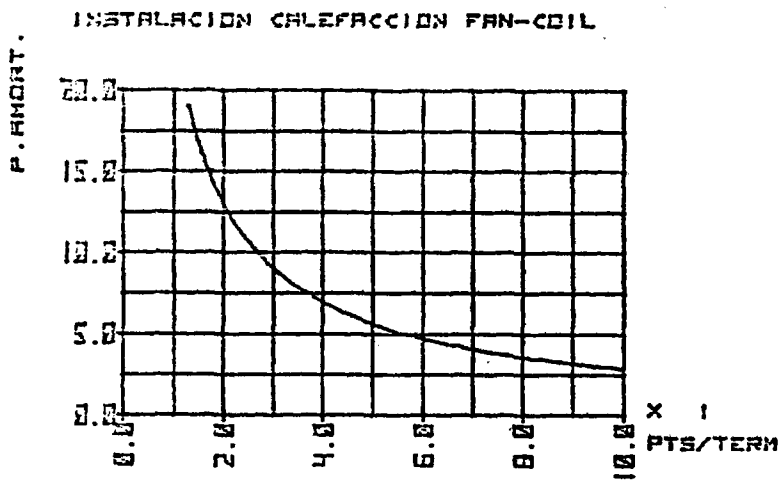


FIG. 62 VARIACION DEL PERIODO DE AMORTIZACION CON EL PRECIO ENERGIA CONVENCIONAL Y APOYO

Para precios actuales de combustible gaseoso, de 2.0 Pts/termia., la instalación de agua caliente sanitaria se amortiza en 8.8 años y la de calefacción en 13 años., pero en el caso de que la instalación solar sustituyera a una instalación eléctrica, los periodos de amortización bajarían a valores de 6 y 9 años. El caso de instalaciones de agua caliente sanitaria mediante termos eléctricos es muy frecuente en la actualidad, y frente a ellas la instalación solar es plénamente competitiva.

7.2. Incremento de precios de combustibles.

Las gráficas 63 y 64 muestran la variación del periodo de amortización con el incremento de precio de combustibles convencionales. El incremento del índice de coste de vida se ha supuesto de un 15 % y el de coste de combustibles de referencia de un 17 % .

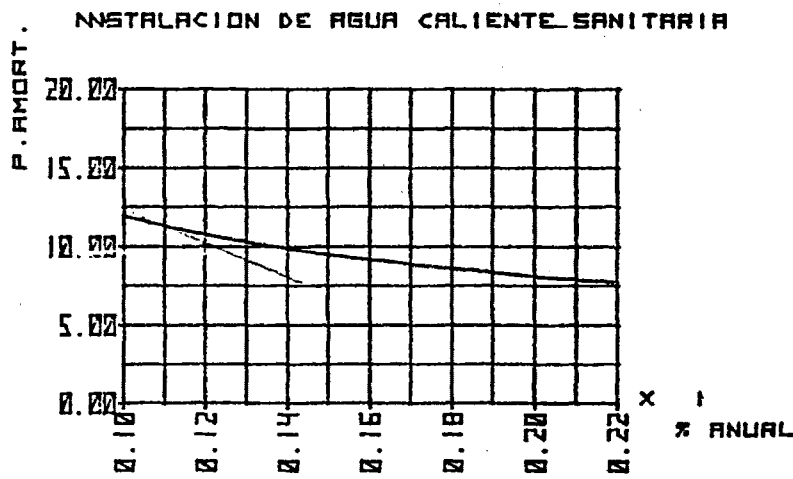


FIG. 63 VARIACION DEL PERIODO DE AMORTIZACION CON EL INCR. PRECIO COMBUSTIBLE CONVENCIONAL

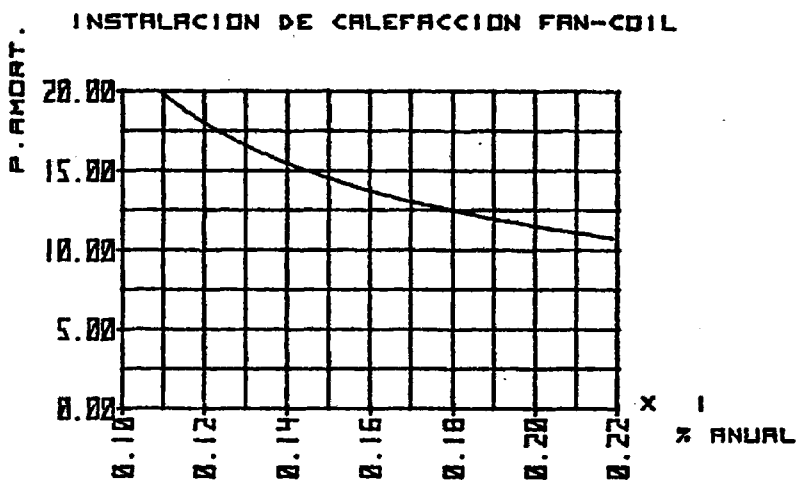


FIG. 64 VARIACION DEL PERIODO DE AMORTIZACION CON EL INCR. PRECIO COMBUSTIBLE CONVENCIONAL.

En ellas, puede analizarse el efecto de que los combustibles aumenten en mayor o menor proporción que el índice de coste de vida. Se concluye, que dicha variable no influye significativamente en la rentabilidad de la instalación.

7.3. Precio del m<sup>2</sup> de colector solar.

. Las gráficas 65 y 66 muestran la variación del periodo de amortización con el precio del m<sup>2</sup> de colector solar. Se han tomado como referencia de precios actuales : 15.000 Pts/m<sup>2</sup> y 12.000 Pts/m<sup>2</sup> para instalaciones de calefacción y agua caliente sanitaria respectivamente, dada la mayor simplicidad de ésta última instalación.

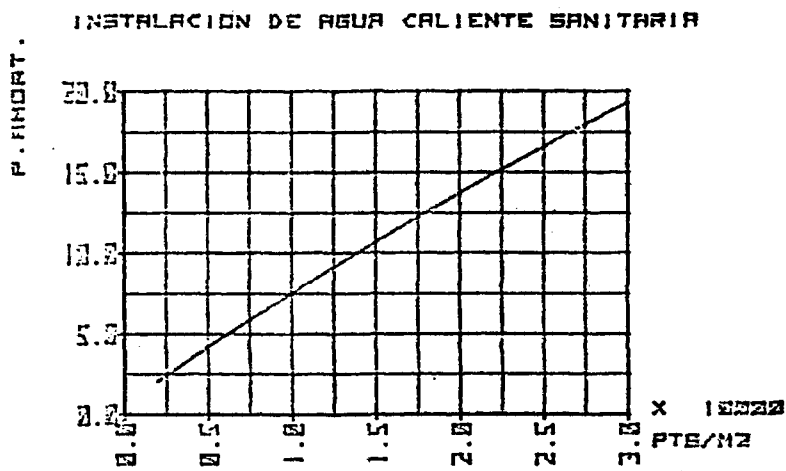
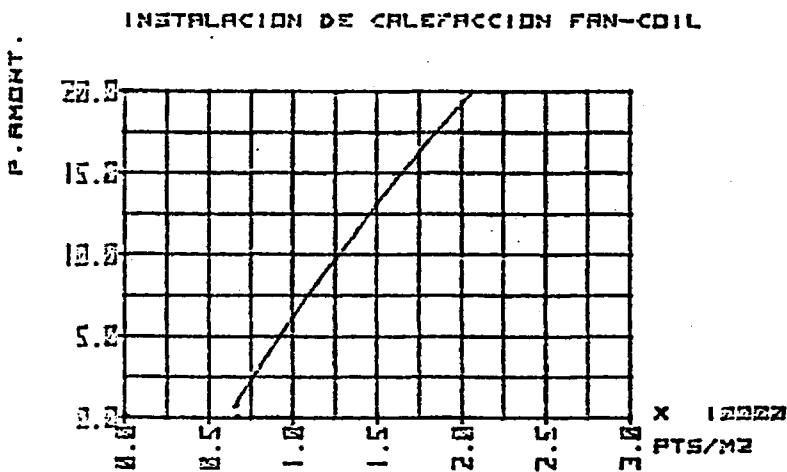


FIG. 65 VARIACION DEL PERIODO DE AMORTIZACION CON EL PRECIO DEL M2 COLECTOR SOLAR



**FIG. 66** VARIACION DEL PERIODO DE AMORTIZACION CON EL PRECIO DEL M<sup>2</sup> COLECTOR SOLAR

De ellas se deduce que ésta es un parámetro muy influyente en la rentabilidad de la instalación.

De éstas gráficas y las anteriores se concluye que los parámetros económicos son, en general, más importantes que los térmicos en el momento de diseñar una instalación, es decir, los sistemas de diseño óptimo, son aquellos que están formados a base de componentes de bajo costo y gran durabilidad, aunque para ello sea necesario sacrificar la obtención de altas prestaciones en los mismos.

7.4. Inversión inicial de la instalación convencional.

. Las gráficas 67 y 68 muestran la variación del periodo de amortización con la inversión inicial convencional. En el caso de la instalación de calefacción, la inversión inicial convencional es de 500.000 Pts. frente a 200.000 Pts. en el caso solar correspondientes a los conceptos que no son propiamente de la instalación solar. En el caso de la instalación de agua caliente sanitaria, la inversión convencional es la misma para ambas instalaciones ya que se ha supuesto el mismo tipo de fuente convencional de apoyo.

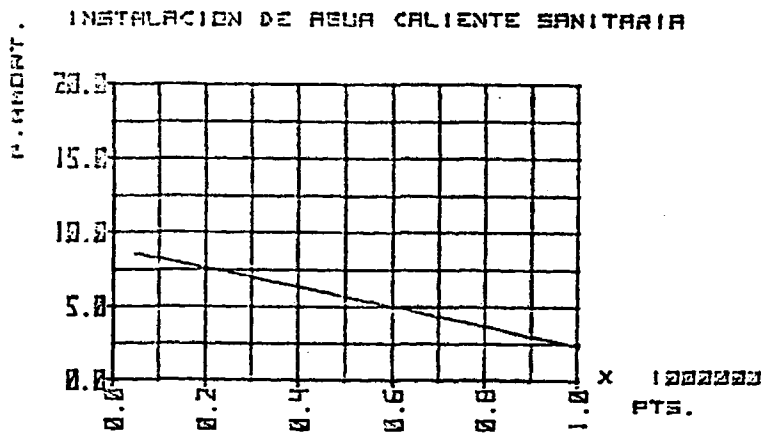
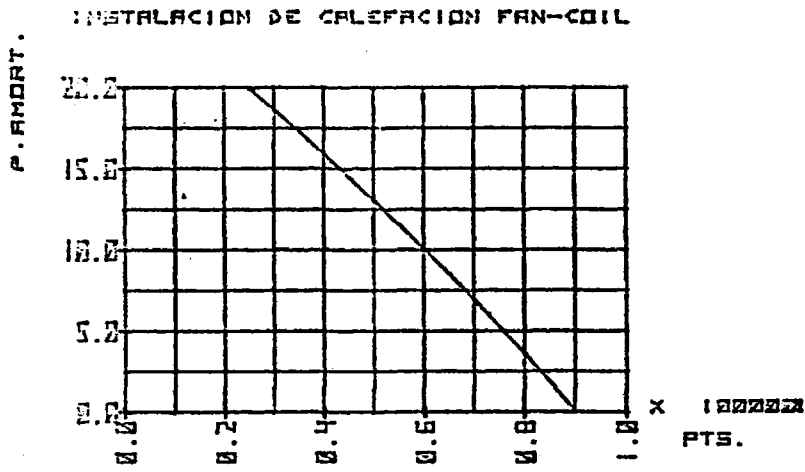


FIG. 67 VARIACION DEL PERIODO DE AMORTIZACION CON LA INVERSION INICIAL CONVENCIONAL



**FIG. 68** VARIACION DEL PERIODO DE AMORTIZACION CON LA INVERSION INICIAL CONVENCIONAL

En dichas gráficas se observa la fuerte dependencia del periodo de amortización con la diferencia de inversiones iniciales, es decir, con la cantidad que debe ser amortizada a base de ahorro en combustibles.

7.5. Aporte solar a la carga térmica.

. Las gráficas 69 y 70 muestran la variación del periodo de amortización con el aporte solar a la carga térmica. Dicha curva nos da idea del efecto de las prestaciones térmicas de la instalación, sobre la rentabilidad de la misma. Por ejemplo, la utilización de un colector solar de calidad superior, o con tratamiento selectivo, conduciría a un mayor aporte solar para la misma dimensión de la superficie colectora. Dicho aumento, según se deduce de la figura, no produce gran disminución del periodo de amortización.

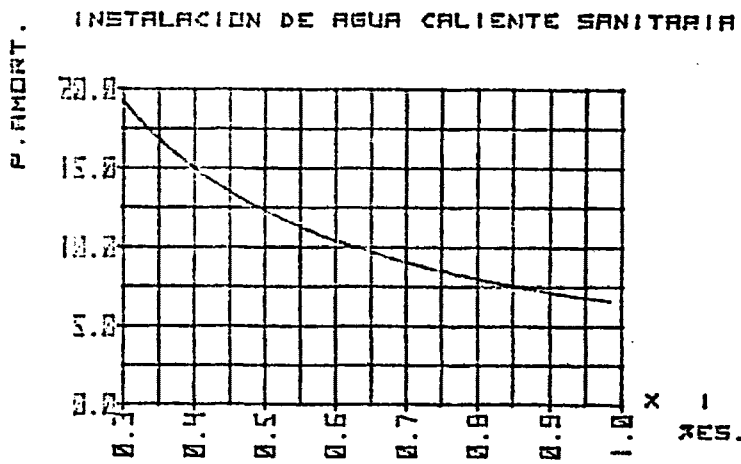
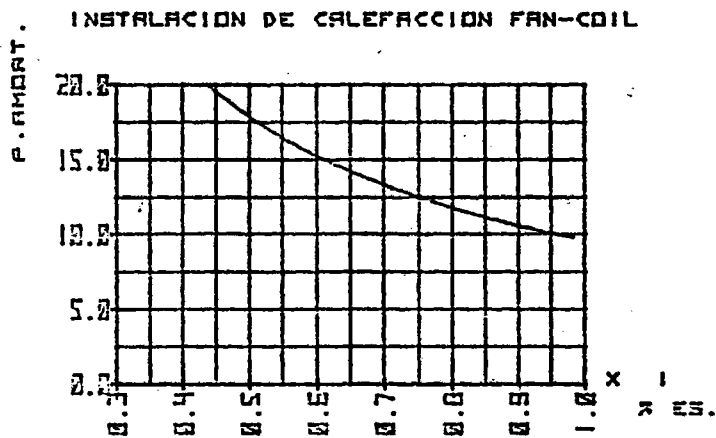


FIG. 69 VARIACION DEL PERIODO DE AMORTIZACION CON EL APORTE SOLAR A LA CARGA TERMICA



**FIG. 70** VARIACION DEL PERIODO DE AMORTIZACION CON EL APORTE SOLAR A LA CARGA TERMICA

7.6. Consideración global de los parámetros económicos.

Dado que la tecnología solar es relativamente reciente y que la demanda actual es muy escasa, es de esperar que en el futuro el precio del m<sup>2</sup> de colector solar baje fuertemente. La experiencia en la utilización de materiales resistentes a las condiciones adversas y el progresivo aumento de la demanda, inducirán la fabricación de grandes series, por procedimientos totalmente automatizados con la consiguiente baja en el coste de los colectores solares, lo que a su vez, hará mas rentable las instalaciones solares, aumentará la demanda y bajará de nuevo el precio del colector solar. Este ciclo tenderá a estabilizarse progresivamente.

Las gráficas 71 y 72 muestran la rentabilidad de las instalaciones solares en el futuro, según el precio del colector solar suba o baje respecto al índice de coste de vida.

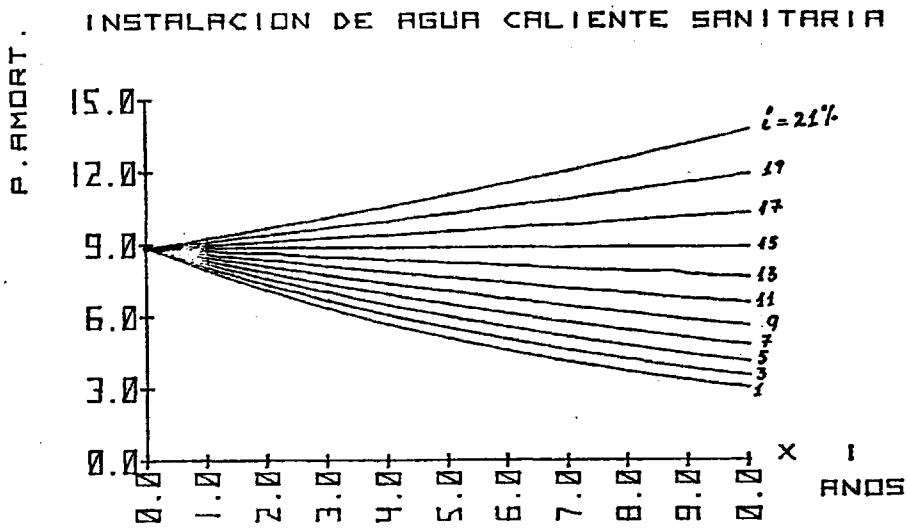
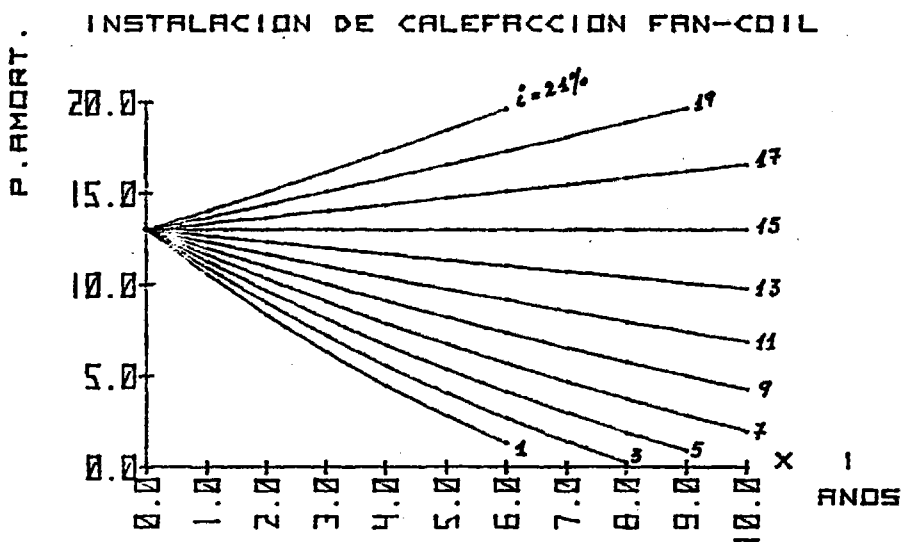


FIG. 71 RENTABILIDAD DE LA INSTALACION CON EL AUMENTO DE PRECIO DEL COLECTOR SOLAR



**FIG. 72 RENTABILIDAD DE LA INSTALACION CON EL AUMENTO DE PRECIO DEL COLECTOR SOLAR.**

Por ejemplo, suponiendo que el precio del panel solar, suba un 7% anual frente a un 15% de incremento de costo de vida, el periodo de amortización de la instalación de calefacción, será de 9, 7, 5 y 2.5 años, para un tiempo de 2.5, 5, 7.5, y 10 años a partir del momento actual.

8.- Determinación de los puntos óptimos de diseño de las variables de dimensionado.

Como se ha expuesto anteriormente, el criterio de optimización de las variables de dimensionado es hacer máximo el ahorro producido por la instalación solar a lo largo de la vida prevista del sistema.

A continuación se expone el procedimiento de cálculo para determinar los valores óptimos de las variables de dimensionado, método que puede ser aplicado a cualquier tipo de instalación y a cualquier variable que se desee optimizar. Como ejemplo, se determinará el valor óptimo de la superficie colectora en una instalación de agua caliente sanitaria. El procedimiento se compone de los siguientes pasos :

El ahorro producido por la instalación solar, viene dado por la expresión (78) :

$$(116) \quad A_h = G_c - G_{es}$$

es decir :

$$(117) \quad A_h = G_c - I_{es} (1+v)^{20} + P'_0 G_{es} \sum_{i=1}^{20} (1+c)^{(i-1)} (1+v)^{(21-i)}$$

La inversión inicial de la instalación solar comprende :

- 1.- Inversión inicial solar propiamente dicha, es decir, el suministro e instalación de una cantidad  $S$  de  $m^2$  de colectores a un precio  $P_{col}$  Pts/ $m^2$  de colector instalado.

$$(118) \quad I_1 = S \cdot P_{col}$$

2.- Inversión inicial correspondiente a la unidad de acumulación, que es determinada proporcionalmente a la superficie colectora instalada y según un precio por m<sup>2</sup> de depósito construido. Para simplificar, la relación diámetro-altura del depósito se supone constante, de forma que la inversión inicial correspondiente a la unidad de acumulación viene dada por :

$$(119) \quad I_2 = 10 \pi ( P_{sv} \cdot S / 4 \pi )^{2/3} P_{dp}$$

3.- Existe una componente de la inversión inicial solar que tiene en cuenta los gastos independientes de la dimensión de la superficie colectora instalada, es decir, fuente auxiliar, instalación de convectoros ó radiadores, etc..., que a efectos comparativos, deben ser tenidos en cuenta en la instalación convencional y solar, en el caso de que sean distintos en ambas instalaciones.

$$(120) \quad I_3 = I_{cte.}$$

De este modo, la expresión del ahorro queda de la forma :

$$(121) \quad A_h = G_c - ( S \cdot P_{col} + 10 \pi ( P_{sv} \cdot S / 4 \pi )^{2/3} \cdot P_{dp} + I_{cte} ) (1+v)^{20} + \\ + Q_c ( 1 - F(S) ) P_0 \sum_{i=1}^{20} (1+c)^{(i-1)} \cdot (1+v)^{(21-i)}$$

El sumatorio, según la expresión (104), puede ser expresado de la forma :

$$(122) \quad A_h = G_c - \{ S \cdot P_{col} + 10 \pi ( P_{sv} \cdot S / 4 \pi )^{2/3} \cdot P_{dp} \} \cdot (1+v)^{20} + \\ + Q_c ( 1 - F(S) ) P_0^* ((1+v)^{21}/(v-c)) ( 1 - ((1+c) / (1+v))^{20} )$$

Si en esta expresión llamamos :

$$(123) \quad C_1 = 10 \pi ( P_{sv} / 4 \pi )^{2/3} \cdot P_{dp}$$

$$(124) \quad C_2 = ((1+v)/(v-c)) \cdot ( 1 - ((1+c)/(1+v))^{20} )$$

$$(125) \quad C_3 = ( 1+v )^{20}$$

se reduce a :

$$(126) \quad A_h = G_c - C_3 ( ( S \cdot P_{col} + C_1 S^{2/3} + I_{cte} + Q_c ( 1 - F(S) ) P_0^* C_2 )$$

Si en ésta expresión, calculamos la derivada parcial de  $A_h$  respecto a la superficie colectora, e igualamos a cero :

$$(127) \quad ( \partial A_h / \partial S ) = - C_3 ( P_{col} + (2/3) C_1 S^{-1/3} - Q_c P_0^* C_2 ( F(S) / S )$$

en la cual  $F(S)$  representa el aporte solar a la carga térmica y es función de las dimensiones de la superficie colectora en el caso que estamos considerando y de otras variables que representan el tipo de instalación.

El estudio de la variación del aporte solar a la carga térmica con la superficie colectora, puede ser llevado a cabo mediante el método de simulación anterior, de forma que se obtenga una nube de puntos de aportes solares correspondientes a diferentes superficies colectoras. Un método de ajuste por mínimos cuadrados nos permitirá representar dicha variación por medio de un polinomio de grado  $n$ ; la calidad del ajuste vendrá dada por el coeficiente de correlación.

Este método ha sido aplicado al caso de la instalación de agua caliente sanitaria que nos ocupa, obteniéndose los siguientes coeficientes para la representación del aporte solar en función de la superficie colectora :

$$(128) \quad F(S) = b_0 + b_1 S + b_2 S^2 + b_3 S^3 + b_4 S^4$$

donde :

$$\begin{aligned} b_0 &= -1.6879500803 \\ b_1 &= 4.45348743575 \cdot 10^{-1} \\ b_2 &= -9.36150399796 \cdot 10^{-4} \\ b_3 &= 1.11873650532 \cdot 10^{-6} \\ b_4 &= -6.0381194226 \cdot 10^{-10} \end{aligned}$$

de donde la derivada de  $F(S)$  respecto a  $S$  vale :

$$(129) \quad F'(S) = b_1 + 2 b_2 S + 3 b_3 S^2 + 4 b_4 S^3$$

y la condición de máximo o mínimo se deduce de igualar a cero la expresión :

$$(130) \quad P_{col} + (2/3) \cdot C_1 \cdot S^{-1/3} - q_c P_0 C_2 F'(S) = 0$$

El valor de S que anula esta ecuación, hace que el ahorro por la utilización de la energía solar sea mínimo ( puede comprobarse en la segunda derivada), con lo cual hemos deducido el valor óptimo de la superficie colectora de la instalación, que conduce a la combinación más conveniente entre el dimensionado de la instalación solar y la fuente auxiliar.

Este procedimiento puede ser utilizado para calcular el valor óptimo de las variables de dimensionado de cualquier tipo de instalación solar.

## CONCLUSIONES

### PARTE III

Se ha realizado el estudio técnico - económico de las variables de dimensionado de los siguientes tipos de instalaciones :

- a) Instalación de "agua caliente sanitaria".
- b) Instalación de calefacción solar.
- c) Instalación de calefacción y refrigeración mediante sistema combinado "bomba de calor - energía solar".
- d) Climatización de piscinas.
- e) Agua caliente para consumo industrial.

Del mismo se han extraído los siguientes resultados :

- 1.- La curva de normalización del colector solar puede ser utilizada para representar la actuación térmica del mismo, sometido a las condiciones ambientales de radiación y temperatura.
- 2.- Los valores óptimos de las variables de dimensionado deben ser calculados mediante criterios económicos. Solo estos permiten determinar los sistemas de mínimo costo y óptimo diseño.

- 3.- El ahorro producido por la instalación solar, a lo largo de la vida prevista de la misma, puede ser elegido como criterio económico de optimización en el estudio de los valores óptimos de las variables de dimensionado, y se ha deducido para él la expresión :

$$A_h = (1+v)^{20} ((I_c - I_{es}) + (P_0 Q_c - P'_0 Q_{es}) ((1+v)/(v-c)) (1 - ((1+c)/(1+v))^{20}))$$

- 4.- El período de amortización, o período de recuperación del capital invertido, puede ser elegido, como parámetro, para indicar la rentabilidad de la instalación solar, deduciéndose para el mismo la expresión :

$$i = \frac{\ln ( 1 + (((c-v)(I_{es} - I_c)) / ((1+v)(Q_c P_0 - Q_{es} P'_0))) )}{\ln (1+c) - \ln (1+v)}$$

- 5.- El estudio de la inclinación óptima debe ser llevado a cabo teniendo en cuenta los cinco factores siguientes :

- a) Latitud del lugar.
- b) Forma de la curva de consumo anual.
- c) Características meteorológicas del lugar.
- d) Dimensiones de la superficie colectora.
- e) Orientación con la cual han sido instalado los colectores solares.

y se ha concluido que el criterio de optimización para deducir su valor óptimo es el de máxima coincidencia entre la curva de consumo y la de energía captada por los colectores solares.

Se ha comprobado que pequeñas variaciones en la inclinación - en su entorno al valor óptimo- producen débiles efectos sobre el aporte solar.

- 6.- La orientación óptima para instalaciones con unidad de acumulación, es decir, para instalaciones de no utilización inmediata de la energía captada, es la orientación SUR, habiéndose comprobado que pequeñas variaciones de la orientación - en su entorno al valor óptimo - producen débiles efectos sobre el aporte solar.
- 7.- El valor óptimo del volumen de almacenamiento energético en una instalación solar depende de los siguientes factores :

- 1.- Dimensión de la superficie colectora.
- 2.- Temperatura de utilización.
- 3.- Precio de  $m^2$  de depósito construido.

y oscila entre 50 y 75 litros por  $m^2$  de colector instalado, para valores usuales de temperatura de utilización y precio de  $m^2$  de depósito. Valores inferiores a ellos producen una importante reducción del aporte solar, y valores superiores no producen grandes aumentos del mismo; en consecuencia, el criterio económico los hace igualmente desaconsejable.

- 8.- En general el cálculo de la carga térmica para instalaciones solares debe ser realizado mediante métodos de promedios a fin de no sobredimensionar la instalación. Los casos extremos serán suplidos por la fuente auxiliar convencional.
- 9.- En las instalaciones de calefacción solar, las conexiones de la fuente auxiliar, en forma de sobrecalentamiento eléctrico de aire, producen aportes solares del orden de un 10 % superiores a las de conexión en serie y paralelo en el circuito del fluido caloriportor.
- 10.- Se expone, en la parte final de la Tesis, un método de cálculo de los valores óptimos de las variables de dimensionado que puede ser utilizado para cualquier tipo de instalación solar.

Se deducen, por último, dos conclusiones de carácter general a todas las instalaciones solares estudiadas :

- 11.- La temperatura de trabajo del conjunto de la instalación presenta una influencia muy destacada sobre las prestaciones de la instalación. No es aconsejable, por tanto, obligar al sistema a trabajar, innecesariamente, a alta temperatura; por ejemplo, instalando un volumen de almacenamiento pequeño, intercambiadores de baja potencia, etc...
- 12.- Los parámetros económicos presentan mayor influencia sobre la rentabilidad de la instalación que las mejoras técnicas que

puedan implementarse en los distintos componentes; es decir, el futuro de la energía solar está en la utilización de componentes (principalmente los colectores solares) baratos y duraderos, y sin grandes sofisticaciones técnicas, siempre que su implantación conlleven una elevación de precios no justificada por una importante mejora de las prestaciones del sistema.

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

P A R T E   I I I

- (31) Hill, J.E., and Kusuda, T. "Method of testing for rating solar collectors based on thermal performance".  
Center for Building Technology, National Bureau Standards.  
Comunicación personal.
- (32) Pérez del Notario, P. "Método de cálculo de una instalación compuesta por colectores y acumuladores".  
Departamento de Energía y Propulsión. INTA. Comunicación personal.
- (33) Löf, G.O.G. and Tybout, R.A., "Cost of house heating with solar energy". Solar energy, 14, 253 (1973).
- (34) Butz, L.W., Beckman, W.A., and Duffie, J.A., "Simulation of a solar heating and cooling System". Solar Energy 16, 129 (1974).
- (35) Buchberg, H. and Roulet, J.R., "Simulation and Optimization of Solar Collection and Storage for House Heating".  
Solar Energy 12, 31 (1968).
- (36) Klein, S.A., Cooper, P.I., Beckman, W.A., and Duffie, J.A.,  
Madison, University of Wisconsin, Engineering Experiment Station  
Report - 38 (1974). "TRANSYS, A Transient Simulation Program".

INTERPRETACION DE RESULTADOS

Y CONCLUSIONES

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

### PARTE I

#### 1.- Radiación Solar .-

- a) Se ha comprobado que el método de Liu y Jordan puede ser utilizado en España para el cálculo de la exposición global horaria sobre superficies inclinadas, a partir de los datos experimentales de exposición diaria sobre superficie horizontal medidos por el Instituto Nacional de Meteorología.

Se considera de interés, como futura línea de trabajo, la obtención de datos de exposición horaria, en sus componentes directa y difusa, para la obtención de gráficas ( similares a las 1, 2 y 3 ) particularizadas para las condiciones climatológicas españolas.

#### 2.- Año "típico" de radiación solar .-

- b) Se propone como año "típico" ó "promedio" , representativo de la historia disponible de datos de radiación solar, el que queda definido por las siguientes características :

- . Promedios mensuales de radiación.
- . Secuencia de los días con distintos niveles de radiación.

- b) Los promedios mensuales de radiación del año típico deben ser iguales a los calculados como media de todos los años del período.
  
- c) La influencia de las secuencias meteorológicas que suelen presentarse en España ha sido considerada especialmente en este trabajo, concluyéndose que no afectan de forma significativa al comportamiento de una instalación correctamente dimensionada.
  
- d) Se ha demostrado que el año 1961 puede ser elegido como año típico ó promedio de radiación solar, representativo de la historia de datos disponibles en Madrid, puesto que, dicho año, como conjunto de datos de entrada en los programas de simulación conduce a los mismos resultados que la totalidad de datos disponibles relativos a todos los años.

## P A R T E   I I

Se subraya la conveniencia de dividir las distintas variables que entran en juego en el diseño de una instalación solar en dos grupos:

### 1.- Variables de diseño de componentes .-

Variables que no dan una dimensión específica a la instalación solar y deben ser estudiadas mediante el balance energético de los distintos componentes.

### 2.- Variables de dimensionado de instalaciones .-

Variables que deben ser estudiadas mediante un criterio técnico - económico que permita encontrar los sistemas de mínimo costo y, por tanto, de diseño óptimo.

El estudio de las variables de diseño de componentes ha dado lugar a las siguientes conclusiones :

### 1.- Distancia "placa - vidrio"

Variable que no ejerce una importante influencia en el comportamiento de la instalación y cuyos valores óptimos oscilan entre :

3 cm.      d      4 cm.

⋮

2.- Distancia entre tubos .-

Variable de fuerte influencia sobre el aporte solar a la carga térmica.

Este tipo de configuración (estructura tubular) puede, en principio, utilizarse con cualquier tipo de material, existiendo un compromiso entre el material utilizado, definido por su coeficiente de conducción de calor, y la distancia entre tubos existente.

La distancia óptima para los materiales más usuales son :

Cobre :	$K = 385 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$	$d = 12 \text{ cm.}$
Aluminio :	$K = 211 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$	$d = 10 \text{ cm.}$
Acero :	$K = 47.6 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$	$d = 6 \text{ cm.}$

3.- Producto "conductividad - espesor" de la placa absorbente .-

El espesor de la placa, conjugada con el coeficiente de conductividad de la misma, es una variable de fuerte influencia en las prestaciones de la instalación. Valores de su producto inferiores a  $0.1 \text{ W / } ^\circ\text{C}$  producen importantes descensos en el rendimiento del colector. Para valores superiores a  $0.1 \text{ W / } ^\circ\text{C}$  el aporte solar tiende asintóticamente a un valor máximo.

Para los materiales comúnmente utilizados el valor óptimo de esta variable, encontrado en el presente trabajo, se halla comprendido entre los siguientes intervalos :

Cobre :  $K = 385 \text{ W / m } ^\circ\text{C}$ .

$$0.26 \text{ mm} < d < 0.52 \text{ mm}.$$

Aluminio :  $K = 211 \text{ W / m } ^\circ\text{C}$ .

$$0.95 \text{ mm} < d < 0.50 \text{ mm}.$$

Acero :

$$2.00 \text{ mm} < d < 4.00 \text{ mm}.$$

#### 4.- Aislamiento base .-

Se ha verificado que dicha variable produce importantes descensos en las prestaciones del colector para valores inferiores a 3 cm. El valor óptimo oscila entre 3 y 5 cm. de aislamiento, dependiendo de la climatología a que el colector está sometido y el uso a que está destinado.

5.- Selectividad de la superficie absorbente .-

El estudio de la conveniencia de dotar a la superficie absorbente de propiedades selectivas, según sea el tipo de instalación en la cual los colectores solares están enclavados, el nivel de temperaturas deseado, etc... ha dado lugar a las siguientes conclusiones :

- a) La selectividad, definida como el cociente entre la absorptividad y emisividad, no indica las cualidades de la superficie absorbente , ya que para distintos valores de  $\alpha/\epsilon$  correspondientes a distintos  $\alpha$  , se obtienen aportes solares muy diferentes.

Se considera de interés la determinación de un coeficiente de selectividad  $\xi (\alpha, \epsilon)$  que, expresado en función de los coeficientes  $\alpha$  y  $\epsilon$  , represente las propiedades de la superficie absorbente.

- b) Se ha comprobado que altos valores de selectividad (superiores a  $\alpha/\epsilon = 5$  ) no son necesarios para la mayoría de las aplicaciones térmicas de la energía solar a temperaturas inferiores a 100 °C, ya que el aporte solar a la carga térmica tiende asintóticamente a un valor máximo a partir de dicho valor de selectividad para cualquier  $\alpha$  .

- c) Un tratamiento de superficie con propiedades de cuerpo negro ( $\alpha = \epsilon = 1$ ) conduce a mejores prestaciones que un tratamiento de selectividad 10 con valores de  $\alpha = 0.85$  y  $\epsilon = 0.08$ , es decir, una alta selectividad no conduce a buenos resultados si, para conseguirla se prescinde de tener un  $\alpha$  elevado.
- d) En general, las conclusiones que anteceden se hacen más evidentes para bajos valores de la temperatura de funcionamiento del sistema.

### P A R T E   I I I

Se ha realizado el estudio técnico - económico de las variables de dimensionado de los siguientes tipos de instalaciones :

- a) Instalación de "agua caliente sanitaria".
- b) Instalación de calefacción solar.
- c) Instalación de calefacción y refrigeración mediante sistema combinado "bomba de calor - energía solar".
- d) Climatización de piscinas.
- e) Agua caliente para consumo industrial.

Del mismo se han extraído los siguientes resultados :

- 1.- La curva de normalización del colector solar puede ser utilizada para representar la actuación térmica del mismo, sometido a las condiciones ambientales de radiación y temperatura.
- 2.- Los valores óptimos de las variables de dimensionado deben ser calculados mediante criterios económicos. Solo estos permiten determinar los sistemas de mínimo costo y óptimo diseño.

- 3.- El ahorro producido por la instalación solar, a lo largo de la vida prevista de la misma, puede ser elegido como criterio económico de optimización en el estudio de los valores óptimos de las variables de dimensionado, y se ha deducido para él la expresión :

$$A_h = (1+v)^{20} \left( (I_c - I_{es}) + (P_0 Q_c - P'_0 Q_{es}) \left( \frac{1+v}{v-c} \right) \left( 1 - \left( \frac{1+c}{1+v} \right)^{20} \right) \right)$$

- 4.- El período de amortización, o período de recuperación del capital invertido, puede ser elegido, como parámetro, para indicar la rentabilidad de la instalación solar, deduciéndose para el mismo la expresión :

$$i = \frac{\ln \left( 1 + \left( \frac{(c-v)(I_{es} - I_c)}{(1+v)(Q_c P_0 - Q_{es} P'_0)} \right) \right)}{\ln(1+c) - \ln(1+v)}$$

- 5.- El estudio de la inclinación óptima debe ser llevado a cabo teniendo en cuenta los cinco factores siguientes :

- a) Latitud del lugar.
- b) Forma de la curva de consumo anual.
- c) Características meteorológicas del lugar.
- d) Dimensiones de la superficie colectora.
- e) Orientación con la cual han sido instalados los colectores solares.

y se ha concluido que el criterio de optimización para deducir su valor óptimo es el de máxima coincidencia entre la curva de consumo y la de energía captada por los colectores solares.

Se ha comprobado que pequeñas variaciones en la inclinación - en su entorno al valor óptimo- producen débiles efectos sobre el aporte solar.

6.- La orientación óptima para instalaciones con unidad de acumulación, es decir, para instalaciones de no utilización inmediata de la energía captada, es la orientación SUR, habiéndose comprobado que pequeñas variaciones de la orientación - en su entorno al valor óptimo - producen débiles efectos sobre el aporte solar.

7.- El valor óptimo del volumen de almacenamiento energético en una instalación solar depende de los siguientes factores :

- 1.- Dimensión de la superficie colectora.
- 2.- Temperatura de utilización.
- 3.- Precio de  $m^2$  de depósito construido.

y oscila entre 50 y 75 litros por  $m^2$  de colector instalado, para valores usuales de temperatura de utilización y precio de  $m^2$  de depósito. Valores inferiores a ellos producen una importante reducción del aporte solar, y valores superiores no producen grandes aumentos del mismo; en consecuencia, el criterio económico los hace igualmente desaconsejable.

- 8.- En general el cálculo de la carga térmica para instalaciones solares debe ser realizado mediante métodos de promedios a fin de no sobredimensionar la instalación. Los casos extremos serán suplidos por la fuente auxiliar convencional.
- 9.- En las instalaciones de calefacción solar, las conexiones de la fuente auxiliar, en forma de sobrecalentamiento eléctrico de aire, producen aportes solares del orden de un 10 % superiores a las de conexión en serie y paralelo en el circuito del fluido caloriportor.
- 10.- Se expone, en la parte final de la Tesis, un método de cálculo de los valores óptimos de las variables de dimensionado que puede ser utilizado para cualquier tipo de instalación solar.

Se deducen, por último, dos conclusiones de carácter general a todas las instalaciones solares estudiadas :

- 11.- La temperatura de trabajo del conjunto de la instalación presenta una influencia muy destacada sobre las prestaciones de la instalación. No es aconsejable, por tanto, obligar al sistema a trabajar, innecesariamente, a alta temperatura; por ejemplo, instalando un volumen de almacenamiento pequeño, intercambiadores de baja potencia, etc...
- 12.- Los parámetros económicos presentan mayor influencia sobre la rentabilidad de la instalación que las mejoras técnicas que

puedan implementarse en los distintos componentes; es decir, el futuro de la energía solar está en la utilización de componentes baratos y duraderos, principalmente colectores solares, sin grandes sofisticaciones técnicas. Estas, sólo estarían justificadas en el caso de producir una importante mejora de las prestaciones del sistema a bajo costo.

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

P A R T E I

- (1) Liu, B.Y.H., and Jordan R.C. "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation".  
Solar Energy 4, nº 3, 1 (1960).
- (2) Liu, B.Y.H., and Jordan, R.C. "The long term average performance of flat plate solar energy collectors".  
Solar Energy 7, nº 2, 53 (1963).
- (3) Sharma, M.R., and Pal, R.S. "Interrelationship between total, direct and diffuse solar radiation in the tropics".  
Solar Energy 9, nº 4, 183 (1965).
- (4) Heywood, H. "The computation of solar radiation intensities".  
Solar Energy 10, nº 1, 46 (1965).
- (5) Parmelle, G.V., "Irradiation of vertical and horizontal surfaces by diffuse solar radiation from cloudless skies".  
Heating, Piping & Air Conditioning , August 1954.
- (6) Valko, P. "Probabilities of sunshine hours accumulated over periods of 2 N 31 consecutive days". Int. Congress. "The Sun in the Service of Mankind". Paris. June 1973 .
- (7) Duffie, J.A., and Beckman, W.A. "Solar Energy Thermal Processes".  
Wiley, New York. (1974).

- (8) Tricaud, J.F. "Contribution à l'estimation des ressources énergétiques solaire. Ebauche d'un atlas du rayonnement pour la France"  
These Univ. Paris VII. Avril (1976).
- (9) William, R.P., and Clintock, M. "Determining Typical Weather for use in solar energy simulations".  
Solar Energy, 21, 55 (1977).
- (10) Hottel, H.C., and Willier, A. "Evaluation of flat - plate solar collector performance ". Trans. Use Solar Energy, Univ. of Arizona Vol II . Thermal Processes 74 (1955).
- (11) Löf, G.O.G., and Tybout, R.A. "Cost of House heating with Solar Energy " Solar Energy, 14, 253 (1973).
- (12) Buchberg, H., and Roulet, J.R. "Simulation and Optimization of solar collection and storage for house heatings"  
Solar Energy, 12 (1), 1, (1968).
- (13) Butz, L.W., and Beckman, W.A., and Duffie, J.A.  
"Simulation of a solar heating and cooling system "  
Solar Energy, 16, 129 (1974).
- (14) Benseman, R.F., and Cook, F.W. " Solar radiation in New Zealand - the standard year". N.Z.Journal of Science, 12, 689 (1969)

- (15) Conk, R.L., Beckman, W.A., and Duffie, J.A. "Modeling of the CSU heating/cooling system ". Solar Energy 17, 21 (1975).
  
- (16) Klein, S.A., et al. "A method of simulation of solar processes and its applications". Solar Energy 17, 29 (1975).
  
- (17) Grupo de trabajo de Energia Solar. División Especial.  
Construcciones Aeronáuticas S.A. " Modelos matemáticos.  
Datos de entrada. Paquete de trabajo nº 606".  
Comunicación personal.

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

P A R T E II

- (18) Hottel, H.C. and Whillier, A., Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy, 2, Part I, 74, University of Arizona Press, 1958. "Evaluation of Flat-Plate Collector Performance".
- (19) Klein, S.A., Duffie, J.A., and Beckman, W.A., ASME, J. Engr. Power, 96 A, 109 (1974). "Transient Considerations of Flat-Plate Solar Collectors".
- (20) Liu, B.Y.H. and Jordan, R.C., Solar Energy, 7, 53 (1963). "A Rational Procedure for Predicting the Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors".
- (21) Tabor, H., Bull. Res. Coun. Israel, 6C, 155 (1958). "Radiation, Convection, and Conduction Coefficients in Solar Collectors".
- (22) Liu, B.Y.H. and Jordan, R.C., Solar Energy, 7, 53 (1963). "The Long-Term Average Performance of Flat-Plate Solar Energy Collectors".
- (23) Chapman, A.J. "Transmisión de calor" Ed. Interciencia, Madrid (1968)

- (24) Swinbank, W.C., Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 89 (1963).  
"Long-Wave Radiation From Clear Skies".
- (25) McAdams, W.C., Heat Transmission, 3rd ed., New York, McGraw-Hill  
1954.
- (26) Duffie, J.A. and Beckman, W.A. "Solar Energy Thermal Processes".  
Wiley, New York. (1974).
- (27) Whillier, A. and Saluja, G., "Effects of materials and construction  
details on the thermal performance of solar water heaters".  
Solar Energy 9, 21 (1965).
- (28) Hottel, H.C. and Woertz, B. B., "Performance of flat-plate solar-heat  
collectors". Trans. ASME 64, 91 (1942).
- (29) Bliss, R.W., "The derivations of several 'plate efficiency factors'  
Useful in the design of flat-plate solar-heat collectors".  
Solar Energy 3, 55, n° 4 (1959).
- (30) Gupta, C.L., "On generalizing the dynamic performance of solar  
energy systems". Solar energy, 13, 301 (1971).

BIBLIOGRAFIA

PARTE III

- (31) Hill, J.E., and Kusuda, T. "Method of testing for rating solar collectors based on thermal performance".  
Center for Building Technology, National Bureau Standards.  
Comunicación personal.
- (32) Pérez del Notario, P. "Método de cálculo de una instalación compuesta por colectores y acumuladores".  
Departamento de Energía y Propulsión. INTA. Comunicación personal.
- (33) Löf, G.O.G. and Tybout, R.A., "Cost of house heating with solar energy". Solar energy, 14, 253 (1973).
- (34) Butz, L.W., Beckman, W.A., and Duffie, J.A., "Simulation of a solar heating and cooling System". Solar Energy 16, 129 (1974).
- (35) Buchberg, H. and Roulet, J.R., "Simulation and Optimization of Solar Collection and Storage for House Heating".  
Solar Energy 12, 31 (1968).
- (36) Klein, S.A., Cooper, P.I., Beckman, W.A., and Duffie, J.A.,  
Madison, University of Wisconsin, Engineering Experiment Station  
Report - 38 (1974). "TRANSYS, A Transient Simulatio Program".

