

Optimización del dimensionado de instalaciones de energía solar térmica para producción de agua caliente sanitaria

Luis Platón Arias⁽¹⁾, D. Julio Francisco San José Alonso⁽²⁾

⁽¹⁾*Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Valladolid, Paseo del Cauce s/n, 47011, Valladolid. Spain.*

⁽²⁾*Dpto. Ingeniería Energética y Fluidodinámica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Valladolid, Paseo del Cauce s/n, 47011, Valladolid. Spain.
Tel: +34 (9)83 423313 Fax: +34 (9)83 423310 e.mail: julsan@eis.uva.es*

Resumen

El objeto del presente proyecto es desarrollar un programa de dimensionado de instalaciones de energía solar térmica para la producción de ACS, que permita el cálculo de los valores óptimos de los distintos parámetros de influencia (superficie, inclinación, orientación, aporte energético) para distintas situaciones y demandas. El cálculo de la aportación energética se ha realizado según el método f-chart. El cálculo de la radiación solar sobre superficies inclinadas y orientadas se ha realizado según el modelo de Klein. El programa se ha desarrollado mediante una hoja de cálculo en formato EXCEL por su amplia implantación.

Palabras Clave: Energía solar, dimensionado, f-chart, radiación inclinada y orientada, optimización.

Abstract

The present project object is to develop a sizing program for domestic hot water solar energy installations, that allow to calculate the different influence parameters optimum values (surface, tilt, orientation, solar gains) for different situations and demands. Solar gains estimation is based on the f-chart method. Solar radiation over tilted and oriented surfaces is calculated according Klein's method. The program has been developed in EXCEL format due its large employing.

Keywords: Solar energy, sizing, f-chart, tilted and oriented radiation, optimization.

1. Introducción

La situación energética actual de la Unión Europea está definida fundamentalmente por dos aspectos:

1. el crecimiento del consumo energético y el descenso de la producción energética propia, debido a una disminución de las reservas energéticas.
2. un crecimiento alarmante de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera y el agravamiento del cambio climático.

El 29 de noviembre de 2000, la Unión Europea adoptó el “Libro Verde: hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético”.

En éste, planteaba las medidas a adoptar para resolver los problemas anteriores, es decir, la imposibilidad de autoabastecimiento y el cambio climático.

Respecto al desarrollo de las fuentes de energías renovables, el 26 de noviembre de 1997, la Unión Europea adoptó el “Libro Blanco para una estrategia y un plan de acción comunitarios”, mediante el cual adquirió el compromiso de que en el año 2010 el 12% del consumo energético total debería provenir de fuentes de energía renovable.

Los compromisos adoptados por la Unión Europea motivaron a España a redactar y aprobar el 27 de noviembre de 1997 el “Plan de fomento de las energías renovables en España”, mediante el cual se comprometía a que al menos el 12% de la energía consumida fuera de origen renovable.

Tras el “Balance del Plan de fomento de las energías renovables en España durante el período 1999-2004” realizado por el IDAE, se llegó a la conclusión de que el crecimiento de las renovables era insuficiente para conseguir los objetivos iniciales. Se decidió entonces llevar a cabo una revisión del Plan, para considerar en el mismo, el aumento del consumo energético primario experimentado e incluir los nuevos objetivos de producción eléctrica y biocarburantes indicados en las Directivas europeas aprobadas tras la redacción del plan de fomento inicial.

Como consecuencia, a finales de agosto de 2005 se aprueba el “Plan de las energías renovables en España 2005-2010”, el cual establece los siguientes objetivos:

- el 12% del consumo energético provendrá de fuentes renovables
- el 29,4% del consumo eléctrico será de origen renovable
- el 5,75% de los combustibles utilizados en los transportes serán biocarburantes.

De los actuales 700.000 m² de superficie de captación instalados en la actualidad se pretende alcanzar una superficie total instalada para el año 2010 de 4.900.000 m², lo cual supone la nueva instalación de una superficie de aproximadamente 4.200.000 m². Este dato muestra claramente las dimensiones e importancia que cobrará la energía solar térmica en los próximos años en el panorama nacional.

La administración, consciente de lo ambicioso de estos objetivos, pretende facilitar su consecución, mediante las siguientes medidas:

1. medidas de obligatoriedad: desarrollo de nuevas normativas que contemplen la exigencia de equipar a las nuevas edificaciones con instalaciones de energía solar térmica. Este tipo de medidas se formalizan en el Código Técnico de la Edificación (cuya aprobación y entrada en vigor se produjo el 29 de septiembre de 2006) y las diversas ordenanzas municipales (actualmente en vigor en Barcelona, Madrid, Valencia, Valladolid, etc...).

2. programas de ayudas a las inversiones y de concienciación de la sociedad gestionadas por las distintas Comunidades Autónomas.

En la siguiente tabla se recoge la contribución solar mínima que exige el CTE para las distintas zonas climáticas y tipos de sistema convencional, en función de la demanda diaria:

Tabla 1. Contribución solar mínima según el CTE.

Tabla 2.1. Contribución solar mínima en %. Caso general

Demanda total de ACS del edificio (l/d)	Zona climática				
	I	II	III	IV	V
50-5.000	0	0	50	60	70
5.000-6.000	0	0	55	65	70
6.000-7.000	0	35	61	70	70
7.000-8.000	0	45	63	70	70
8.000-9.000	0	52	65	70	70
9.000-10.000	0	55	70	70	70
10.000-12.500	0	65	70	70	70
12.500-15.000	30	70	70	70	70
15.000-17.500	35	70	70	70	70
17.500-20.000	45	70	70	70	70
> 20.000	52	70	70	70	70

Tabla 2.2. Contribución solar mínima en %. Caso Efecto Joule

Demanda total de ACS del edificio (l/d)	Zona climática				
	I	II	III	IV	V
50-1.000	50	60	70	70	70
1.000-2.000	50	63	70	70	70
2.000-3.000	50	66	70	70	70
3.000-4.000	51	69	70	70	70
4.000-5.000	58	70	70	70	70
5.000-6.000	62	70	70	70	70
> 3.000	70	70	70	70	70

Uno de los principales problemas que encuentra el proyectista a la hora de diseñar una instalación, es el cálculo de la radiación solar disponible sobre la superficie de captación inclinada y orientada. Los métodos empleados en la actualidad, basados en la aplicación de coeficientes de corrección tabulados sobre la radiación horizontal, resultan laboriosos

y no exentos de un riesgo de error elevado al exigir el manejo de un número elevado de cifras.

Tabla 2. Coeficientes de corrección en función de la inclinación para $\varphi=41^\circ$

LATITUD = 41°

Incli.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,07	1,06	1,05	1,03	1,02	1,02	1,02	1,03	1,05	1,08	1,09	1,09
10	1,14	1,12	1,09	1,06	1,03	1,02	1,03	1,06	1,1	1,15	1,18	1,17
15	1,21	1,17	1,12	1,07	1,04	1,03	1,04	1,08	1,14	1,21	1,26	1,24
20	1,26	1,21	1,15	1,08	1,04	1,02	1,04	1,09	1,17	1,27	1,33	1,31
25	1,31	1,24	1,17	1,09	1,03	1,01	1,03	1,1	1,2	1,32	1,39	1,37
30	1,35	1,27	1,18	1,08	1,01	0,99	1,02	1,09	1,21	1,35	1,44	1,42
35	1,38	1,29	1,18	1,07	0,99	0,96	0,99	1,08	1,22	1,38	1,49	1,47
40	1,4	1,3	1,18	1,05	0,96	0,93	0,96	1,06	1,22	1,4	1,52	1,5
45	1,42	1,3	1,16	1,03	0,93	0,89	0,93	1,04	1,21	1,41	1,55	1,52
50	1,42	1,3	1,14	0,99	0,88	0,84	0,88	1,01	1,19	1,41	1,56	1,54
55	1,42	1,28	1,12	0,95	0,83	0,79	0,84	0,97	1,17	1,41	1,57	1,54
60	1,41	1,26	1,08	0,91	0,78	0,73	0,78	0,92	1,14	1,39	1,56	1,54
65	1,39	1,23	1,04	0,85	0,72	0,67	0,72	0,87	1,09	1,36	1,54	1,53
70	1,36	1,19	0,99	0,8	0,66	0,61	0,66	0,81	1,04	1,32	1,52	1,5
75	1,32	1,15	0,94	0,73	0,59	0,54	0,59	0,74	0,99	1,28	1,48	1,47
80	1,28	1,1	0,88	0,67	0,52	0,46	0,52	0,67	0,93	1,23	1,44	1,43
85	1,23	1,04	0,82	0,6	0,44	0,39	0,44	0,6	0,86	1,16	1,38	1,38
90	1,17	0,98	0,74	0,52	0,36	0,31	0,36	0,52	0,78	1,09	1,32	1,32

Además, los métodos disponibles para el cálculo de pérdidas por desviación son tan solo estimativos y no son útiles en cálculos precisos. En algunos casos, como el de Castilla y León, dichos valores se encuentran tabulados, pero no siempre cubren todos los casos que se presentan en la realidad.

A la hora de determinar la configuración del campo de captación (inclinación y orientación), el proyectista se basa a menudo en las recomendaciones indicadas por el IDAE en su pliego de condiciones técnicas ya que llevar a cabo un estudio numérico de las distintas posibilidades exige una gran cantidad de tiempo.

Se considera la dirección Sur como orientación óptima y la mejor inclinación, β_{opt} , dependiendo del período de utilización, uno de los valores siguientes:

- Consumo constante anual: la latitud geográfica
- Consumo preferente en invierno: la latitud geográfica + 10°
- Consumo preferente en verano: la latitud geográfica - 10°

Figura 1. Recomendaciones incluidas en el PCT del IDAE

Asumir estas recomendaciones sin un análisis cuantitativo resulta un tanto arriesgado. Además, en numerosas ocasiones la interpretación de estas recomendaciones es complicada: ¿Cuándo una demanda es “muy” ó “poco” preferente en una estación? Otras veces, las características arquitectónicas de la edificación, impiden adoptar la

configuración indicada por las recomendaciones, y evaluar si las pérdidas son ó no admisibles resulta de nuevo un proceso laborioso.

Estos problemas se han solucionado en parte con la aparición en el mercado de numerosos programas de cálculo de diferentes casas comerciales. Lamentablemente, en la mayoría de los casos dichos programas sólo permiten el cálculo de instalaciones basadas en su gama de productos ó tan sólo disponen de la opción de cálculo en una determinada región y dejan de ser útiles de cara al proyectista.

La inminente entrada en vigor del futuro Código Técnico de la Edificación, cuyo reglamento obliga entre otras cuestiones a dotar a las nuevas edificaciones de sistemas de aprovechamiento solar térmico, así como las recientes aprobaciones de las ordenanzas solares en numerosos municipios con la misma intención, prevé un aumento drástico del número de instalaciones de energía solar térmica.

Por otro lado, el diseño de instalaciones de energía solar térmica requiere de un preestudio y cálculo precisos. En este tipo de tecnologías, el sobredimensionamiento de equipos trae consigo desventajas técnicas y económicas más graves que en las instalaciones “convencionales”.

Los técnicos deberán estar preparados para dar respuesta a la futura demanda que se plantea, aportando soluciones acertadas y viables. El éxito o fracaso de este cometido dependerá en gran medida de las herramientas de trabajo de las que se disponga, lo que ha motivado el desarrollo del presente proyecto.

2. Instalaciones de energía solar térmica para producción de ACS

Las instalaciones de energía solar térmica para producción de ACS pueden adoptar distintas configuraciones, sin embargo el principio de funcionamiento en todos los casos es el mismo. Una configuración habitual de este tipo de instalaciones se muestra en la siguiente figura:

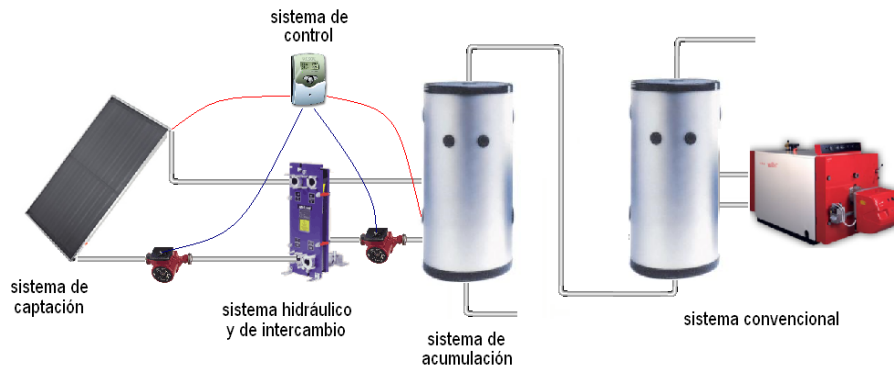


Figura 2. *Sistemas de una instalación de energía solar térmica para producción de ACS*

Cuando la radiación solar incide sobre los captadores, éstos comienzan a absorber dicha radiación elevándose así la temperatura de los mismos. En el momento en el que la temperatura de los captadores, y del fluido que contienen, está por encima de la temperatura de acumulación el sistema de control activa las bombas. El fluido caliente del primario y el agua fría del depósito son conducidas al intercambiador donde se produce el intercambio térmico entre ambos fluidos. El agua sanitaria, ahora caliente retorna a la parte alta del acumulador, mientras que el fluido del primario retorna a los captadores para ser calentado de nuevo y repetir de esa forma el ciclo. La histéresis del sistema de control impide que se produzcan arranques y paradas intermitentes de las bombas. El sistema seguirá funcionando hasta que la temperatura de los captadores sea inferior a un valor de consigna y no pueda producirse la transferencia de calor al agua del acumulador.

3. Cálculo de la demanda energética en instalaciones de energía solar térmica para producción de ACS

La demanda energética en una instalación de ACS se corresponde con la energía necesaria para elevar el agua consumida desde la temperatura de distribución ó red hasta la temperatura de consumo.

Llevar a cabo una correcta estimación de la demanda energética es de gran importancia, ya que es uno de los datos fundamentales en base a los cuales se realizará el dimensionado de la instalación.

El cálculo numérico de la misma se realiza mes a mes de acuerdo a la ecuación (1):

$$L=M \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{cons}}-T_{\text{red}}) \quad (1)$$

Donde:

L: es la carga ó demanda energética del mes en J/mes

M: es el consumo diario de ACS (litros/día)

ρ : es la densidad del agua (1 kgr/litro)

c_p : es el calor específico del agua (4,18 KJ/kgr°C)

T_{cons} : es la temperatura de consumo del ACS (normalmente de 45 a 50 °C)

T_{red} : es la temperatura del agua fría de red en °C, valor el cual se encuentra tabulado en el “Pliego de condiciones técnicas de instalaciones de baja temperatura” (PET-REV-octubre 2002).

N: número de días del mes considerado

4. Cálculo de la radiación solar sobre superficies inclinadas y orientadas

4.1. Radiación y trayectoria solar

El Sol es un astro situado a una distancia media de la Tierra de $1,5 \cdot 10^{11}$ m y con una temperatura superficial aproximada de 5.700 K.

A partir de estos datos se estima que la radiación incidente en la superficie exterior de la atmósfera sobre la unidad de superficie vertical a dicha radiación es de aproximadamente 1.353 W/m^2 , lo que se conoce como constante solar.

Sin embargo, si analizamos la evolución de la constante solar a lo largo del año, observamos que varía de la siguiente forma:

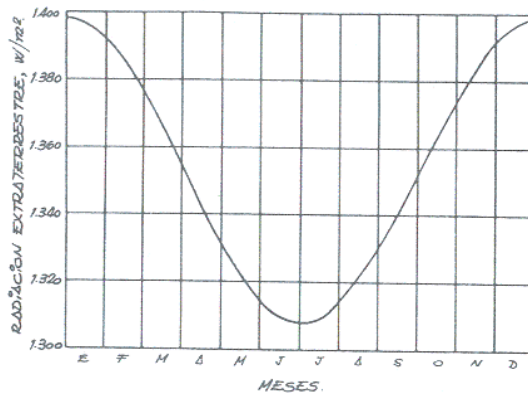


Figura 3. Evolución de la constante solar a lo largo del año

Esta variación es debida a la trayectoria de la Tierra alrededor del Sol, ya que en los meses de invierno la distancia entre ambos es menor y por tanto la potencia recibida es mayor. Sin embargo, parece contradictorio que la potencia recibida sea mayor en los meses de invierno, más fríos, que en los meses de verano. La explicación se encuentra en la declinación, es decir el ángulo que forma el plano del ecuador con el plano de la radiación solar.

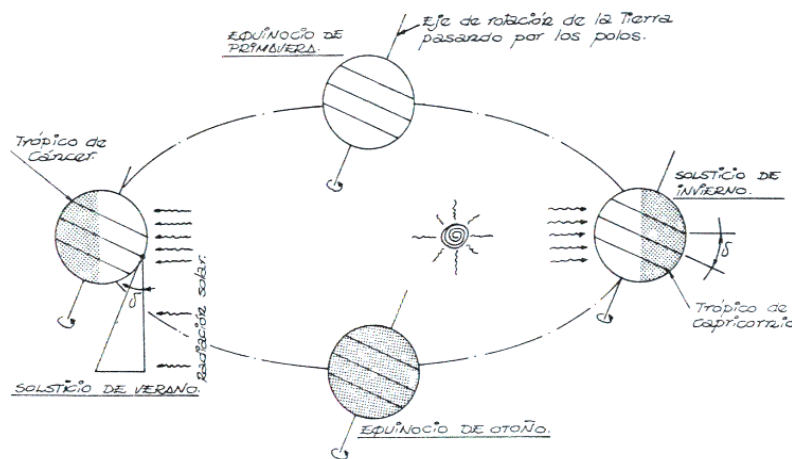


Figura 4. Trayectoria de la Tierra alrededor del Sol

Durante los meses de invierno, a pesar de encontrarse el Sol más cercano a la Tierra, la superficie de ésta, debido a la declinación, forma un ángulo menor con la radiación solar y por tanto la radiación efectiva captada es menor.

Una vez conocida la influencia de la declinación en la captación solar podemos analizar la inclinación idónea de una superficie de captación en cada época del año.

Si denominamos:

φ : latitud del lugar

β : inclinación de la superficie de captación respecto a la horizontal

δ : declinación del lugar

Para captar la mayor radiación posible, durante los meses de invierno, la superficie se deberá colocar perpendicular a la radiación incidente, tal y como muestra en la figura 5:

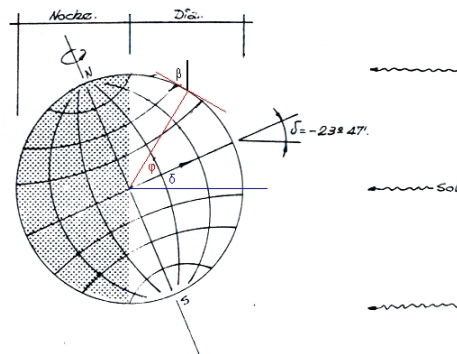


Figura 5. Posición de la Tierra durante los meses de invierno

El ángulo de inclinación óptimo de la superficie de captación deberá ser:

$$\beta = \varphi + \delta \quad (2)$$

es decir la suma de la latitud del lugar más la declinación.

Durante los meses de verano la situación es la siguiente:

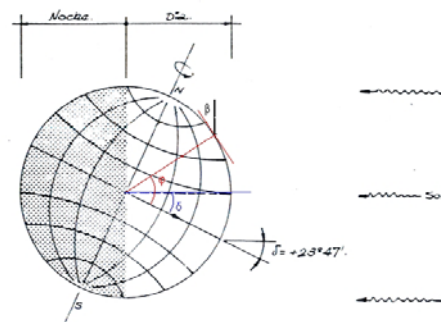


Figura 6. Posición de la Tierra durante los meses de verano

El ángulo de inclinación de la superficie de captación para captar la mayor radiación posible será:

$$\beta = \varphi - \delta \quad (3)$$

es decir la latitud menos la declinación.

Para los meses intermedios, considerando la declinación próxima a cero, la posición es:

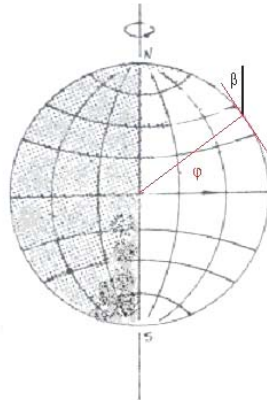


Figura 7. Posición de la Tierra durante los meses de primavera y otoño

El ángulo de inclinación de la superficie para lograr una captación óptima será:

$$\beta = \varphi \quad (4)$$

es decir la latitud del lugar.

Si analizamos ahora el movimiento del Sol respecto a la Tierra, las trayectorias tendrán el siguiente aspecto:

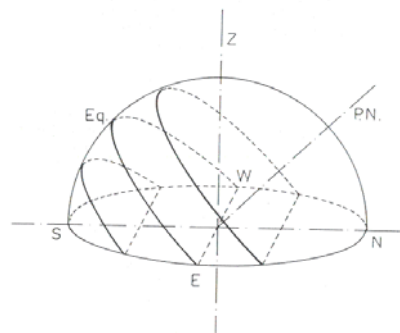


Figura 8. Trayectorias del Sol respecto a la Tierra

Es fácil comprobar, que la orientación que más favorece la captación de la radiación solar es la orientación SUR, sobre todo en los meses de invierno.

Todo lo anterior, explica de forma sencilla la base de las recomendaciones sobre la colocación de captadores, que se resumen de la manera siguiente:

- Inclinación: Latitud para demandas constantes a lo largo del año
Latitud + 10° para demandas estacionales de invierno
Latitud - 10° para demandas estacionales de verano

Orientación: Sur

Obviamente las recomendaciones, modifican la inclinación de los captadores respecto a la latitud un ángulo inferior a la declinación (10°), ya que todos los casos expuestos anteriormente son casos extremos (declinación máxima y mínima) y solamente suceden una vez al año.

Otro aspecto importante es la forma en la que la radiación es recibida por una superficie de captación. Existen tres tipos de radiación incidente sobre una superficie inclinada y orientada:

a. radiación directa: es la radiación que procede del Sol sin modificación en su dirección, es decir, que se recibe del ángulo sólido del disco solar.

b. radiación difusa: es la radiación que ha sufrido modificación en su dirección procedente de toda la bóveda celeste, excepto la que llega del Sol, originada por los efectos de dispersión de los componentes de la atmósfera.

c. radiación del albedo: es la radiación procedente de la reflexión de la radiación directa y difusa sobre el suelo.

En la figura 36 se muestran las distintas componentes de la radiación que incide sobre una superficie inclinada:

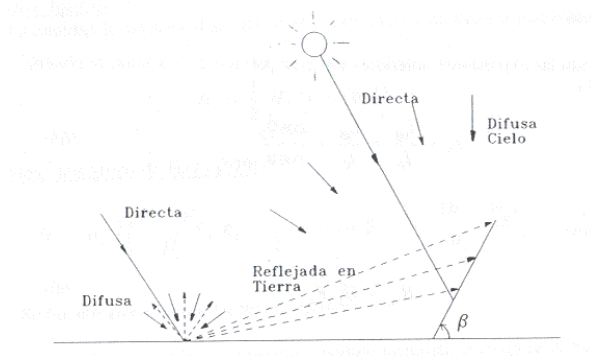


Figura 9. Componentes de la radiación solar incidente sobre una superficie inclinada

4.2. El método tradicional de cálculo de la radiación solar sobre superficies inclinadas y orientadas

Para las distintas provincias de España, se encuentran disponibles los datos de radiación sobre una superficie horizontal, para los distintos meses del año en MJ/m²·día (energía en MJ que incide sobre un m² horizontal en un día medio de cada mes).

En las instalaciones de energía solar térmica la superficie de captación suele estar inclinada para recibir una radiación mayor. Para obtener el valor de la radiación solar sobre superficies inclinadas se utilizan una serie de tablas que contienen un factor de corrección para la radiación horizontal en función de la latitud del lugar y de la inclinación de la superficie de captación. Dichas tablas se recogen en el “Pliego de condiciones técnicas de instalaciones de baja temperatura” (PET-REV-octubre 2002).

Por ejemplo, para la latitud=41° la tabla tendría el siguiente aspecto:

Tabla 3. Coeficientes de corrección en función de la inclinación para $\varphi=41^\circ$

LATITUD = 41°												
Incli.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1,07	1,06	1,05	1,03	1,02	1,02	1,02	1,03	1,05	1,08	1,09	1,09
10	1,14	1,12	1,09	1,06	1,03	1,02	1,03	1,06	1,1	1,15	1,18	1,17
15	1,21	1,17	1,12	1,07	1,04	1,03	1,04	1,08	1,14	1,21	1,26	1,24
20	1,26	1,21	1,15	1,08	1,04	1,02	1,04	1,09	1,17	1,27	1,33	1,31
25	1,31	1,24	1,17	1,09	1,03	1,01	1,03	1,1	1,2	1,32	1,39	1,37
30	1,35	1,27	1,18	1,08	1,01	0,99	1,02	1,09	1,21	1,35	1,44	1,42
35	1,38	1,29	1,18	1,07	0,99	0,96	0,99	1,08	1,22	1,38	1,49	1,47
40	1,4	1,3	1,18	1,05	0,96	0,93	0,96	1,06	1,22	1,4	1,52	1,5
45	1,42	1,3	1,16	1,03	0,93	0,89	0,93	1,04	1,21	1,41	1,55	1,52
50	1,42	1,3	1,14	0,99	0,88	0,84	0,88	1,01	1,19	1,41	1,56	1,54
55	1,42	1,28	1,12	0,95	0,83	0,79	0,84	0,97	1,17	1,41	1,57	1,54
60	1,41	1,26	1,08	0,91	0,78	0,73	0,78	0,92	1,14	1,39	1,56	1,54
65	1,39	1,23	1,04	0,85	0,72	0,67	0,72	0,87	1,09	1,36	1,54	1,53
70	1,36	1,19	0,99	0,8	0,66	0,61	0,66	0,81	1,04	1,32	1,52	1,5
75	1,32	1,15	0,94	0,73	0,59	0,54	0,59	0,74	0,99	1,28	1,48	1,47
80	1,28	1,1	0,88	0,67	0,52	0,46	0,52	0,67	0,93	1,23	1,44	1,43
85	1,23	1,04	0,82	0,6	0,44	0,39	0,44	0,6	0,86	1,16	1,38	1,38
90	1,17	0,98	0,74	0,52	0,36	0,31	0,36	0,52	0,78	1,09	1,32	1,32

Para estimar las pérdidas globales por desviación respecto al Sur el IDAE, en su “Pliego de condiciones técnicas de instalaciones de baja temperatura” (PET-REV-octubre 2002), propone el método gráfico de la figura 10:

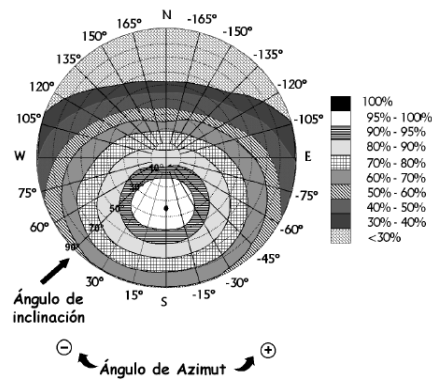


Figura 10. Método gráfico de estimación de pérdidas por desviación respecto al Sur propuesto por el IDAE

Una vez expuestos los anteriores métodos podemos concluir:

1. el método de cálculo de radiación sobre superficies inclinadas es excesivamente laborioso. Por otro sólo ofrece información para valores discretos de la inclinación (0, 5, 10, 15, ...), lo cual impide su utilización en un programa automático de optimización.

2. el método de cálculo de las pérdidas por desviación tan sólo aporta una estimación de las pérdidas globales a lo largo del año por desviación, sin dar ninguna información acerca de la variación por desviación de la radiación para cada uno de los meses.

4.3. Cálculo de la radiación solar sobre superficies inclinadas y orientadas mediante el método de Klein

El método de Klein se basa en que la radiación que incide sobre el plano inclinado se puede calcular como la suma de cada una de las componentes de la radiación sobre el plano horizontal (directa y difusa) por un coeficiente de corrección por el nuevo ángulo de incidencia de cada una de ellas, es decir:

$$H_{\text{inclinado}} = K_1 \cdot H_{\text{HORdirecta}} + K_2 \cdot H_{\text{HORdifusa}} + \rho \cdot K_3 \cdot H_{\text{HORglobal}} \quad (5)$$

La cuestión es calcular cada una de las componentes de la radiación sobre el plano horizontal, ya que estos valores normalmente no están disponibles. El método de Klein define un “coeficiente de claridad” K_T de la siguiente forma:

$$K_T = H/H_0 \quad (6)$$

Este coeficiente, que es la relación entre la radiación solar horizontal en la superficie de la Tierra y la radiación solar horizontal extraterrestre, da una idea del efecto de dispersión de la radiación debido a la nubosidad y los diversos agentes de la atmósfera y por tanto estará íntimamente ligado al valor de la componente difusa de la radiación solar horizontal sobre la superficie terrestre. En la figura 11 se muestra gráficamente el significado físico de este coeficiente:

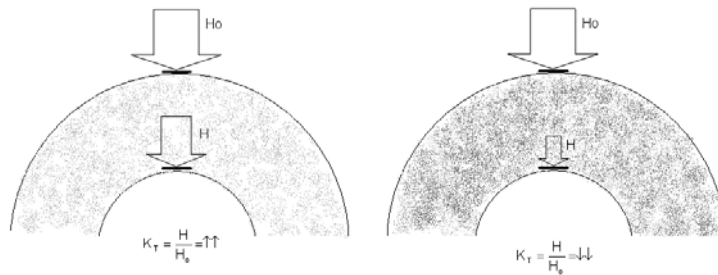


Figura 11. Cálculo del coeficiente de claridad en diversas condiciones

Varios autores, a través de medidas experimentales de radiación difusa y directa, han corroborado que efectivamente existe una relación entre el coeficiente de claridad y el peso de la componente difusa de la radiación solar sobre la superficie horizontal en la Tierra. La correlación cuyos resultados son más cercanos a los ofrecidos por la Base de datos climatológica de Castilla y León es la correlación publicada por los profesores Martínez-Lozano & Utrillas & Gómez:

$$\begin{aligned} H_{\text{dif}}/H_{\text{glob}} &= 0,99 && \text{si } K_T \leq 0,20 \\ H_{\text{dif}}/H_{\text{glob}} &= 1,36 - 1,65 \cdot K_T && \text{si } K_T > 0,20 \end{aligned} \quad (7)$$

Conocida la componente difusa de la radiación sobre el plano horizontal, se puede calcular la componente directa:

$$H_{\text{directa}} = H_{\text{glob}} - H_{\text{dif}} \quad (8)$$

Se define la radiación solar sobre el plano inclinado y orientado H_{incl} como el producto de la radiación solar sobre el plano horizontal H_{glob} y un coeficiente de corrección R , tal y como se muestra en la ecuación 9:

$$H_{\text{incl}} = H_{\text{glob}} \cdot R \quad (9)$$

Se define R de la siguiente manera:

$$R=(1-H_{\text{dif}}/H_{\text{glob}})\cdot R_B+(H_{\text{dif}}/H_{\text{glob}})\cdot(1+\cos(s))/2+\rho(1-\cos(s))/2 \quad (10)$$

Donde:

s es la inclinación de la superficie de captación

ρ es el coeficiente de reflexión del suelo ó albedo (normalmente $\rho=0,2$)

R_B es un coeficiente de corrección de la radiación directa, función de γ (el ángulo de azimut ó desviación respecto al sur de la superficie inclinada, Este negativo, Oeste positivo), ω_{sr} (ángulo horario de la salida del Sol) y ω_{ss} (ángulo horario de la puesta del Sol) [12]

En resumen, partiendo de la radiación solar sobre una superficie horizontal, de la latitud del lugar y de la inclinación y orientación de la superficie a estudiar hemos obtenido la radiación solar sobre dicha superficie, para cualquier inclinación y orientaciones comprendidas entre 0 y 90° (condiciones de validez del método aplicado)

5. Cálculo de la aportación energética en instalaciones de ACS mediante el método “f-chart”

El “f-chart” ó método de las curvas-f, es un método que permite estimar la aportación energética de un sistema solar para producción de ACS ó ACS y calefacción en períodos de tiempo relativamente largos. Ha sido desarrollado desde 1974 por los profesores W.A. Beckman, S. A. Klein, y J.A. Duffie en el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de Madison en Wisconsin. En las instalaciones solares, los parámetros que influyen en el rendimiento del captador son muy variables, y suponer unas condiciones medias de funcionamiento supone asumir un riesgo elevado. A raíz de la simulación de numerosas instalaciones, a través de TRNSYS, y el posterior estudio de resultados se concluyó que, a pesar de que efectivamente las condiciones y por tanto el rendimiento de los captadores era variable, el aporte energético de la instalación en períodos largos de tiempo (por ejemplo un mes), seguía una determinada correlación dependiente de dos parámetros adimensionales. Dicha correlación se expresa de forma gráfica en la figura 12:

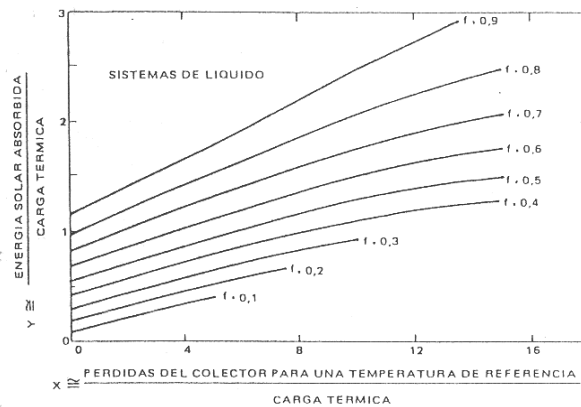


Figura 12. Curvas-f

Para estimar la aportación energética de la instalación solar mensualmente, basta con determinar cada uno de los dos parámetros adimensionales y aplicar la correlación de las curvas-f. De forma numérica f se puede calcular mediante la ecuación (11):

$$f=1,029 \cdot Y-0,065 \cdot X-0,245 \cdot Y^2+0,0018 \cdot X^2+0,0215 \cdot Y^3 \quad (11)$$

El parámetro X representa la relación entre las pérdidas de energía del captador y la carga total de calentamiento durante un mes y se define de la siguiente forma:

$$X=A \cdot F_R U_L \cdot (F'_R / F_R) \cdot (T_{ref} - T_a) \cdot \Delta t / L \quad (12)$$

El parámetro Y expresa la relación entre la energía absorbida en la superficie captadora y la carga total de calentamiento durante un mes:

$$Y=A \cdot F_R (\tau \alpha)_n \cdot (F'_R / F_R) \cdot (\tau \alpha) / (\tau \alpha)_n H_T \cdot N \cdot A / L \quad (13)$$

Donde:

$F_R U_L$: es el coeficiente de pérdidas de la curva de rendimiento del captador en función de t_e en $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

$F_R (\tau \alpha)_n$: es el factor óptico de la curva de rendimiento del captador

F'_R / F_R : es el factor de corrección del captador-intercambiador e indica la disminución de energía útil obtenida por utilizar un intercambiador de calor y un doble circuito. En el “Pliego de condiciones técnicas de instalaciones de baja temperatura” (PET-REV-octubre 2002) se recomienda tomar un valor de 0,95.

T_{ref} : es la temperatura de referencia fijada. Se toma un valor de $100^\circ C$.

T_a : es la temperatura ambiente media mensual en °C. Esta temperatura se puede obtener de las tablas incluidas en el “Pliego de condiciones técnicas de instalaciones de baja temperatura” (PET-REV-octubre 2002).

Δt : son los segundos del mes considerado.

L: es la carga ó demanda térmica del mes en J/mes

$(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$: es un coeficiente de corrección del producto transmitancia absortancia, por no incidir la radiación verticalmente a la cubierta como sucede en los ensayos de los captadores. Para pequeñas desviaciones del Sur e inclinaciones 15° más o menos la latitud del lugar se recomienda un valor de 0,96 para captadores con una cubierta simple y de 0,94 para captadores de doble cubierta.

H_T : es la radiación diaria media mensual sobre la superficie de los captadores en $J/m^2 \cdot \text{día}$

El parámetro adimensional X se deberá corregir tanto si el volumen de acumulación seleccionado es distinto a 75 l/m^2 de superficie de captación como si la demanda es únicamente de producción de ACS. [11]

En conclusión, conocida la radiación solar sobre la superficie de captación y el tipo y número de captadores instalados, se puede calcular la aportación energética mensual para una determinada demanda mediante el empleo del método de las curvas f.

6. Cálculo de instalaciones mediante el programa “opti-f”

6.1. Introducción

Se han implementado en una hoja de cálculo en formato EXCEL los cálculos expuestos anteriormente: demanda energética, radiación solar sobre superficies inclinadas y orientadas y aportación solar mediante el método f-chart. Esto ha dado lugar a un sistema de ecuaciones dependientes entre sí. Mediante la función “solver” incorporada en EXCEL (dicha función permite resolver problemas de optimización en sistemas de ecuaciones, definiendo la variable objetivo, las restricciones y las variables independientes), se han estudiado los problemas de optimización que se exponen a continuación.

6.2. Cálculo del aporte solar máximo

Se ha analizado el siguiente caso: maximizar el aporte solar anual, variando la inclinación, orientación y superficie de captación sujeto a la restricción de no sobrepasar el 100% de cobertura ninguno de los meses del año. El análisis se ha realizado para tres tipos de demandas (preferente en verano, constante y preferente en invierno) y se ha comparado con los resultados obtenidos siguiendo las recomendaciones de inclinación y orientación del IDAE.

En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos para las distintas demandas, representando en naranja la solución óptima (máximo aporte) y en verde la solución convencional (siguiendo las recomendaciones del IDAE). Nota: En las gráficas las series se denominan del siguiente modo: inclinación-orientación-superficie.

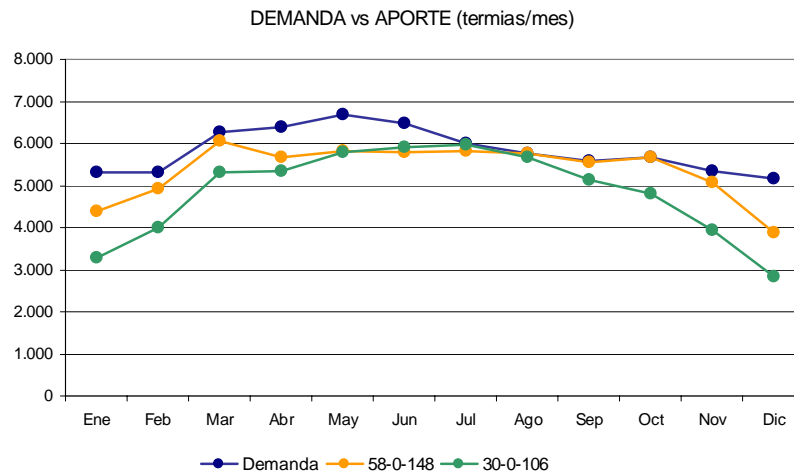


Figura 13. Gráfica Demanda vs Aporte para el perfil de consumo de verano

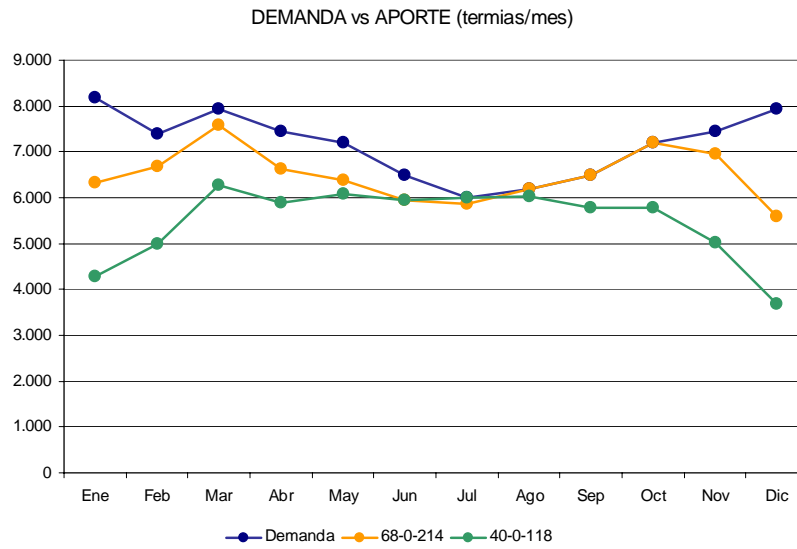


Figura 14. Gráfica Demanda vs Aporte para un perfil de consumo constante

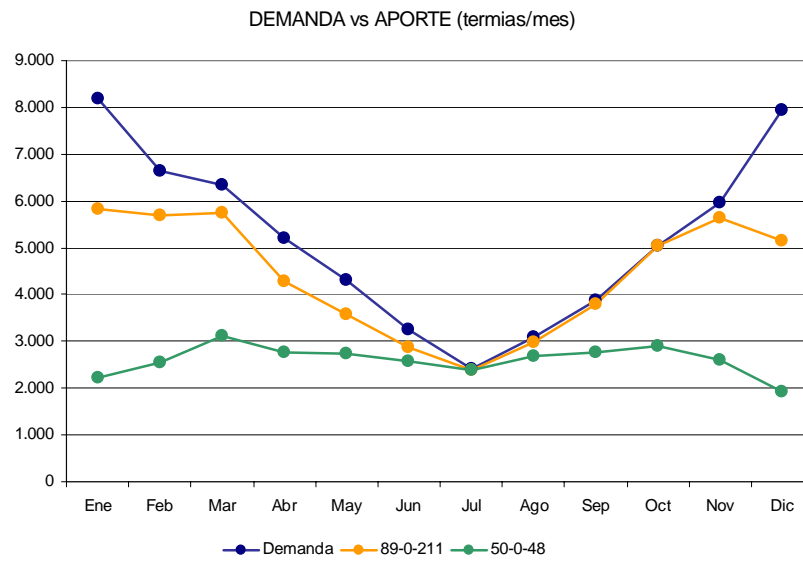


Figura 15. Gráfica de Demanda vs Consumo para el perfil de invierno

En la siguiente tabla se recogen de forma resumida los resultados obtenidos:

Tabla 4. Resumen de resultados obtenidos

ÓPTIMA / CONVENCIONAL	Verano	Anual	Invierno
Inclinación (°)	58° / 30°	68° / 40°	89° / 50°
Aporte (%)	92% / 83%	91% / 77%	85% / 50%

Superficie (m ²)	148 / 106	214 / 118	211 / 48
Aporte unitario (termias/m ²)	435 / 547	363 / 556	251 / 651

A raíz de los resultados anteriores se observa que las recomendaciones de inclinación y orientación no son válidas para el diseño de instalaciones bajo el criterio de máximo aporte energético.

La inclinación adecuada para lograr un aporte máximo se encuentra en torno a los 30° por encima de la recomendada para cada tipo de demanda, salvo en el caso del consumo de invierno, en el que la óptima está 40° por encima de la recomendada.

Se obtienen bajo este criterio de dimensionado, porcentajes de sustitución por encima de los obtenidos en instalaciones convencionales desde los 9 puntos del caso de verano hasta los 35 del caso de invierno.

Sin embargo a medida que se obtiene un mayor porcentaje de sustitución, el aporte unitario de cada captador disminuye, lo cual implica por un lado una mayor necesidad de superficie a instalar y una menor rentabilidad de la instalación (cada captador instalado producirá un ahorro anual inferior).

En vista de lo anterior, se puede afirmar que este criterio de dimensionado es únicamente recomendable cuando la instalación solar se proyecte de forma conjunta a la edificación y por tanto se pueda considerar el espacio necesario desde el principio y la rentabilidad de la misma no tenga un peso específico elevado en el proceso de diseño (el coste de la instalación solar frente al coste total de ejecución de la obra es realmente bajo). Otro campo donde aplicar este criterio de dimensionado es en edificaciones con un especial interés en abastecerse exclusivamente de fuentes renovables: edificios autosuficientes, centros de investigación, construcciones bioclimáticas, etc...

6.3. Cálculo de la superficie mínima de captación necesaria

En este caso se ha buscado la superficie mínima necesaria para cubrir una fracción anual de la demanda energética, variando la inclinación y orientación de la superficie de captación y comprobando en todo caso que en ningún mes la fracción solar sea superior al 100%. Se ha analizado dicho problema para los tres tipos de demanda y se han

comparado los resultados obtenidos con los resultados de las soluciones tradicionales (inclinación y orientación recomendadas por el IDAE).

En este caso se ha considerado una demanda de ACS de 8.000 litros/día, con una temperatura de consumo de 45 °C, para una instalación situada en Salamanca. Para este tipo de instalaciones la contribución solar mínima en el caso general (sistema convencional no eléctrico) es del 55% según el Código Técnico de la Edificación.

Las siguientes figuras recogen los resultados obtenidos (en puntos la solución óptima en verde la solución convencional):

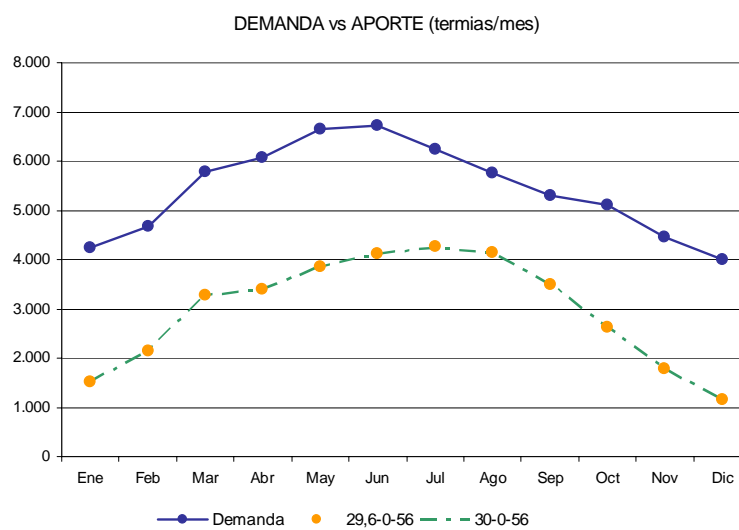


Figura 16. Gráfica Demanda vs Aporte para el perfil de consumo de verano

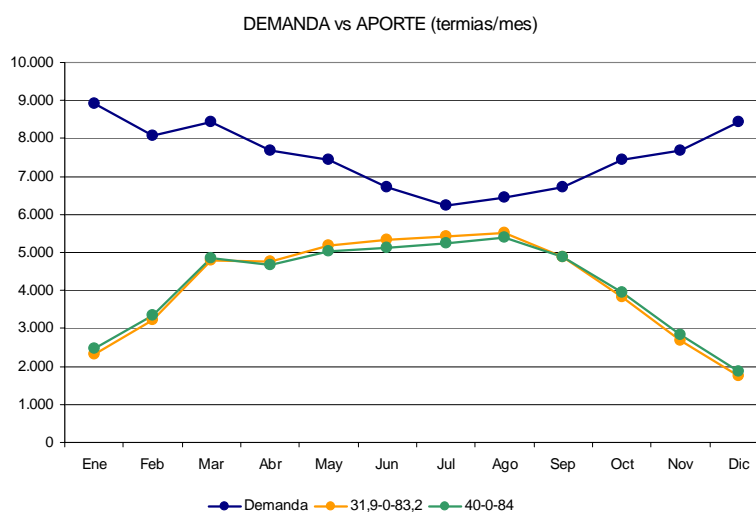


Figura 17. Gráfica Demanda vs Aporte para el perfil de consumo constante

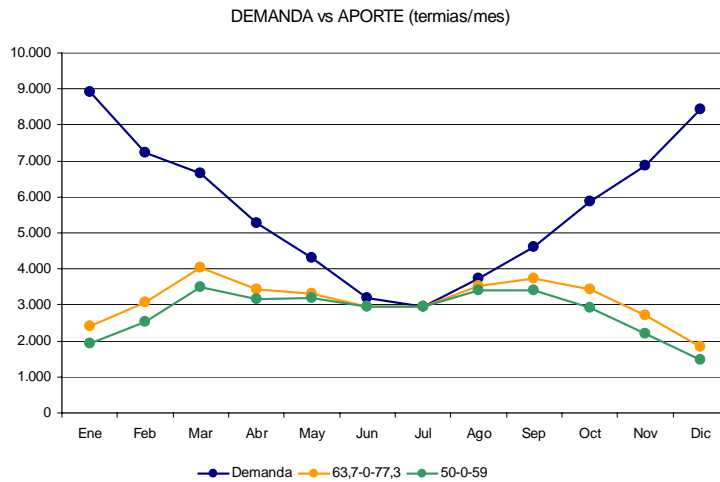


Figura 18. Gráfica Demanda vs Aporte para el perfil de consumo de invierno

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos durante los cálculos de superficie mínima a modo de resumen:

Tabla 5. Resumen de resultados obtenidos

ÓPTIMA / CONVENCIONAL	Verano	Anual	Invierno
Inclinación (°)	29,6° / 30°	32° / 40°	63,7° / 50°
Aporte (%)	55% / 55%	55% / 55%	55% / 49%
Superficie (m ²)	56 / 56	83,2 / 84	77,3 / 59,3

Los resultados anteriores muestran que tanto para los perfiles de verano y de consumo constante a lo largo del año la solución óptima es muy similar a la obtenida en base a las recomendaciones del IDAE. Sin embargo para perfiles de consumo preferente en invierno, la inclinación recomendada por el IDAE impide alcanzar los grados de sustitución indicados por la normativa. En estos casos es necesario dotar a las superficies de captación de una mayor inclinación reducir la captación en verano y poder así aumentar la superficie instalada hasta alcanzar el grado de cobertura necesario y no tener excedentes energéticos.

6.3. Cálculo de la superficie mínima de captación necesaria

En numerosas ocasiones las características constructivas dificultan la adopción de las recomendaciones en cuanto a inclinación y orientación de la superficie de captación que marca el IDAE. En otros casos la adopción de dichas recomendaciones supone llevar a cabo instalaciones poco estéticas e integradas en la edificación.

El programa opti-f permite analizar de forma sencilla si determinadas desviaciones de las recomendaciones en cuanto a inclinación y orientación son admisibles.

A modo de ejemplo se ha considerado una instalación de energía solar térmica para producción de ACS, situada en Valladolid, con un consumo constante a lo largo de 5.000 litros/día y una exigencia de aportación solar del 60%. La edificación en la que se pretende situar dispone de una cubierta inclinada 25° con una desviación respecto al Sur de 40°. Se han considerado dos opciones, por un lado una superficie de captación dispuesta de acuerdo a los criterios del IDAE y por otro una instalación con los captadores integrados en la cubierta.

Los resultados demuestran que la instalación convencional requiere una superficie de captación de 57 m² para lograr un aporte energético del 60% mientras que la instalación integrada necesita una superficie de captación de 60m², es decir 3m² más que la solución convencional.

Teniendo en cuenta que el coste de este incremento de superficie frente al coste total de la instalación supone aproximadamente un 5% y que la instalación integrada en cubierta supone un ahorro considerable en estructuras para la fijación de los captadores y una solución mucho más agradable desde el punto de vista estético, en este caso se puede considerar que la opción de instalar los captadores integrados en cubierta es claramente preferible.

En la siguiente figura se muestra una reproducción de las dos soluciones analizadas:

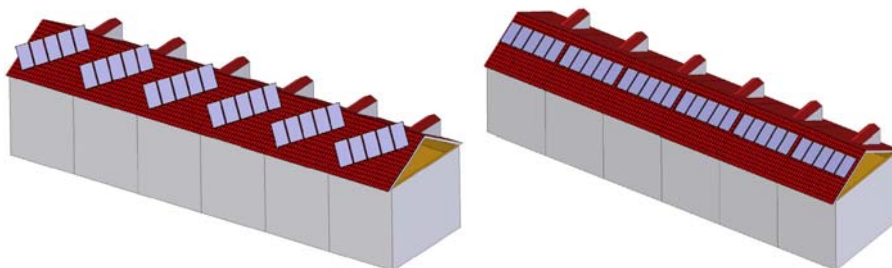


Figura 19. Aspecto de las instalaciones analizadas: convencional (a la izquierda) e integrada (a la derecha)

7. Conclusiones

El uso del programa desarrollado para el cálculo de los diversos ejemplos expuestos en el capítulo de cálculos, arroja las siguientes conclusiones a nivel técnico:

1. cuando se dimensiona bajo un criterio de máxima sustitución energética la inclinación del campo de captación, se encuentra por encima de la recomendada, favoreciendo la captación en invierno y reduciéndola en verano, lo que permite un aumento de la superficie de captación a instalar sin originar excedentes de producción. Este criterio implica una disminución significativa de la producción energética anual por unidad de superficie de captación y por tanto un descenso de la rentabilidad de la misma y un aumento del espacio de instalación necesario.

2. cuando el criterio de dimensionado se basa en el cumplimiento de la normativa, las recomendaciones del IDAE son adecuadas, salvo en los casos en los que el consumo sea preferente en invierno, en los cuales, se deberá aumentar la inclinación del campo de captación y la superficie de captación hasta lograr cubrir el porcentaje de sustitución exigido. En los casos en los que la forma de la curva de demanda lo permita, se procurará que el sistema tenga una inclinación propia de una demanda de verano, con objeto de favorecer la captación en estos períodos en los que el rendimiento es mayor y por tanto la rentabilidad de la instalación aumenta.

3. existen numerosos casos en los que la adopción de los criterios comunes de configuración del campo de captación son inviables por las características de la edificación ó resultan poco agradables estéticamente. En estos casos se deberá considerar la opción de integrar la instalación en la edificación, justificando dicha opción mediante un análisis comparativo de los parámetros de la instalación con integración y sin ella.

3. Referencias (eliminar el espaciado entre párrafos)

1. European Environment Agency *Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2003 Summary*. EEA. (2003)
2. Comisión Europea *Libro Verde. Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético*. Oficina de las publicaciones especiales de las comunidades europeas. (2001).
3. International Energy Agency *Key World energy statistics 2005*. (2005).
4. IDAE *Pliego de condiciones técnicas de instalaciones de baja temperatura*. (2001).
5. Dirección general de Arquitectura y Política de Vivienda del Ministerio de Vivienda *Código Técnico de la Edificación. Propuesta de Real Decreto de aprobación. 30 de octubre de 2003*. (2003).
6. M. Castro Gil, A. Colmenar Santos *Energía solar térmica de baja temperatura*. Ed. Progensa. (2004).
7. John A. Duffie, William A. Beckman *Procesos térmicos en energía solar*. Ed. Grupo Cero. (1979).
8. EREN *Energía solar Térmica y Fotovoltaica: Base de datos climatológica de Castilla y León*. Ed. Junta de Castilla y León – Consejería de Economía y Empleo. (2004).
9. José M. Fernández Delgado, Vicente Gallardo Rodríguez *Energía Solar Térmica en la Edificación*. AMV Ediciones. (2004).
10. V.V.A.A. *Curso de energía solar*. Ed. Universidad de Valladolid – Caja Salamanca y Soria.
11. William A. Beckman, Sanford A. Klein, John A. Duffie *Proyecto de sistemas térmico-solares por el método de las curvas-f*. Ed. Index. (1982).
12. S. A. Klein *Solar Energy Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces*. Vol. 19, (1977) pág. 325-319.
13. J. A. Martínez Lozano, M.P. Utrillas y V. Gómez *Renewable Energy Estimation of the diffuse solar irradiation from global solar irradiation. Daily and monthly average daily values*. Vol. 4 No. 1 (1994) pág. 95 – 100.
14. Pauli Andersen *Solar Energy Comments on "Calculations of monthly average insolation on tilted surfaces"* by S. A. Klein. Vol. 25, (1980) p. 287.

4. Agradecimientos

A la Cátedra de Energías Renovables de la E.T.S.I.I. de Valladolid, por reconocer, apoyar y motivar mi trabajo.