

# CÁLCULO DE INSTALACIONES SOLARES TÉRMICAS. MÉTODO F-CHART

## Índice

1. Conocimientos previos de instalaciones solares térmicas .....	2
2. Hojas del libro .....	6
3. Modo de introducción de datos .....	7
4. Datos necesarios en el cálculo .....	8
4.1. Selección de la población.....	8
4.2. Datos de la superficie .....	8
4.3. Datos de la demanda de ACS y calefacción .....	9
4.4. Datos del campo solar .....	13
4.5. Datos de acumulación y eficiencia de intercambio .....	14
5. Resultados.....	15
6. Método de cálculo F-Chart .....	18
6.1. Cálculo de las necesidades energéticas .....	19
6.2. Cálculo de radiación solar incidente .....	20
6.3. Cálculo de X .....	20
6.4. Cálculo de $F'R_{UL}$ .....	21
6.5. Cálculo de $K_1$ y $K_2$ .....	22
6.1.5.1. Capacidad de almacenamiento ( $K_1$ ) .....	22
6.1.5.2. Factor de corrección para ACS ( $K_2$ ).....	22
6.6. Cálculo de Y.....	23
6.7. Cálculo del grado de cobertura mensual .....	23
6.8. Cálculo del grado de cobertura anual .....	23
6.9. Resultados obtenidos con el método F-Chart.....	24

## MANUAL DEL USUARIO

Este manual es una guía para facilitar el manejo y aprendizaje de la hoja de cálculo Excel titulada "Método\_F\_Chart". La aplicación permite realizar el prediseño de instalaciones solares térmicas para la preparación de agua caliente sanitaria (ACS) y apoyo a calefacción de baja temperatura.

# CÁLCULO DE INSTALACIONES SOLARES TÉRMICAS. MÉTODO F-CHART

## Conocimientos previos de instalaciones solares térmicas

El captador solar térmico aprovecha parte de la radiación solar que incide sobre éste. La parte no aprovechada se debe a las pérdidas hacia el ambiente que le rodea, convección y radiación. La energía aprovechada se cede al fluido caloportador que circula por el interior del colector y es conducido hasta la cesión de energía con el depósito de acumulación gracias al intercambio con serpentín, doble envolvente o intercambiador de placas. En lugares fríos el fluido caloportador es una mezcla de agua con anticongelante, no existiendo mezcla posible entre el fluido que circula por los captadores y el agua caliente acumulada en el depósito que se usará para consumir.

El aprovechamiento solar del captador se debe al efecto invernadero, el vidrio deja pasar la radiación solar de onda corta proveniente del Sol y es opaco a la radiación emitida en longitud de onda larga de la placa absorbente, produciéndose el calentamiento de la superficie absorbidora. La placa absorbente trasvasa energía al fluido que circula por los tubos soldados a la placa, produciéndose el aprovechamiento de energía en el primario.

El rendimiento de un captador solar térmico ( $\eta$ ) respecto de la radiación incidente, para un instante de funcionamiento dado, se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$\eta = a - \frac{b \times (T_m - T_0)}{I} \quad [1.1]$$

- a: Parámetro óptico del captador facilitado por el fabricante mediante ensayo de homologación (adimensional).
- b: Coeficiente de pérdidas del captador facilitado por el fabricante mediante ensayo de homologación ( $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$ ).
- I: Radiación solar incidente sobre el captador ( $\text{W/m}^2$ ).
- $T_m$ : Temperatura media del fluido caloportador en el interior del captador ( $^\circ\text{C}$ ).

$$T_m = \frac{T_s + T_e}{2} \quad [1.2]$$

- $T_s$ : Temperatura del fluido caloportador a la salida del captador ( $^\circ\text{C}$ ).
- $T_e$ : Temperatura del fluido caloportador a la entrada del captador ( $^\circ\text{C}$ ).

El RITE (1998) impone ciertas restricciones de diseño en las instalaciones solares en cuanto al área de captación, volumen de acumulación, orientación e inclinación, sombreado, etc.

En una instalación el primer dato que hay que obtener es el área de captación que se debe instalar para satisfacer un grado de cubrimiento, casi siempre se suele diseñar para un cubrimiento de un 60%, valor similar al que suelen indicar las ordenanzas solares.

El sistema solar se debe diseñar y calcular en función de la energía que se aporta a lo largo de un día y no en función de la potencia que pueden suministrar los captadores solares. Para determinar la radiación solar que incide en el captador se utiliza un modelo de cálculo de radiación horario.



## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart

Para el cálculo del volumen se tiene que cumplir la relación entre volumen de acumulación y el área captadora que indica el RITE (1998) en su ITE 10.1.3.2, recogido en la figura 1.1.

El método más extendido para el cálculo de captadores solares térmicos es el Método F-Chart, basado en un modelo de análisis medio mensual.

### ITE 10.1.3.2 Área de los colectores y volumen de acumulación

El área total de los colectores tendrá un valor tal que se cumpla la condición:

$$1,25 \leq 100 A/M \leq 2$$

siendo:

**A** la suma de las áreas de los colectores, expresada en m<sup>2</sup>

**M** el consumo medio diario de los meses de verano, expresado en L/d

**V** el volumen del depósito acumulador, expresado en L

En las instalaciones cuyo consumo sea constante a lo largo del año, el volumen del depósito de acumulación cumplirá la condición:

$$0,8 \cdot M \leq V \leq M$$

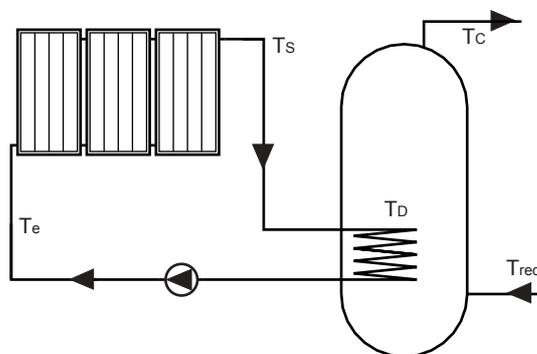
Cuando se instale menos superficie de colectores que la resultante del cálculo, deben justificarse en la memoria del proyecto las razones de esta decisión y el volumen del depósito acumulador por cada metro cuadrado de área instalada debe ser igual o menor que 80 litros.

**Figura 1.1**

Parámetros de diseño para instalaciones solares térmicas indicados por la normativa del RITE (1998). (Fuente: RITE (1998)).

Una instalación solar térmica, a groso modo, está compuesta por el campo de captadores solares y por los depósitos de acumulación desde los que suministra agua caliente a consumo.

En la figura 1.2 se incluye un esquema de una instalación individual con los elementos principales que la componen, captador; tuberías de captadores a depósito, depósito de acumulación, bomba, tubería entrada agua fría a depósito y tubería agua caliente a consumo. Cuando la instalación es para un número elevado de viviendas se utiliza un intercambiador de placas para transferir la energía de los captadores al depósito, variando el número de depósitos en función del tamaño de la instalación.



**Figura 1.2**

Esquema de instalación solar térmica para una vivienda. Los captadores calientan el depósito ( $T_D$ ) a través de un serpentín interior en el depósito por el que circula el fluido caloportador impulsado por la bomba. El agua entra fría al depósito ( $T_{red}$ ) y es calentada ( $T_c$ ) cuando existe radiación solar por los captadores.

Para viviendas colectivas el área de captación por vivienda se sitúa cercano a 1 m<sup>2</sup>/vivienda para captadores planos de alta calidad, con un consumo medio diario ACS de 85 l/día vivienda.

## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart



Los captadores se deben orientar próximos al sur y con una inclinación de  $50^\circ$ , si se quiere conseguir un aprovechamiento anual de ACS. Para otras condiciones de uso se pueden cambiar los ángulos para optimizar el grado de cobertura.

En las figuras siguientes se incluyen algunas imágenes de los componentes de las instalaciones solares térmicas.

**Figura 1.3**  
Campo de captadores solares térmicos planos en el edificio bioclimático del CIFPSEER de Imárcoain (Navarra).



**Figura 1.4**  
Captadores solares térmicos integrados en edificio de 98 viviendas.





## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart



**Figura 1.5**  
Depósitos de acumulación solar para producción de ACS en edificio de 98 viviendas. El volumen total de acumulación es de 9.000 l.



**Figura 1.6**  
Intercambiador de placas para la transferencia de energía desde el primario de los captadores al secundario de los depósitos de acumulación.



## 2 Hojas del libro

El libro que compone la aplicación se divide en diferentes hojas en las que se introducen los datos o en las que se muestran los resultados. Las hojas son:

- **“Hoja en blanco”**. Esta hoja está sin protección por lo que permite al usuario manipularla insertando resultados de otras hojas, hacer comparaciones, introducir fórmulas, etc.
- **“Datos y resultados”**. Permite definir todos los parámetros de la instalación solar térmica según el uso previsto y para la población elegida; obteniendo como resultado el área de los captadores, el volumen de acumulación, el grado de cubrimiento de la demanda y la rentabilidad económica.

En el prediseño realizado se verifica el cumplimiento de la normativa aplicable.

- **“BD Colector”**. Es una base de datos de colectores que permite modificar los datos o incorporar nuevos modelos. Algunos de los datos son de mera información, no utilizándose en el cálculo de los captadores.
- **“Perfiles de consumo”**. El consumo diario de ACS que se utiliza como estándar es el de Munt y que es el habitualmente empleado en el Método F-Chart. En la hoja se permite incluir perfiles de consumo mensual que corrijan, por ejemplo, la ausencia de vecinos en el edificio en verano o el uso estacional de un hotel.
- **“BD clima”**. Es una base de datos climática que facilita los datos medios mensuales de radiación solar global horizontal diaria, la temperatura media de las máximas y de las mínimas, la temperatura del agua de red y la localización de poblaciones españolas. La base de datos se puede ampliar o modificar. Los datos incluidos provienen principalmente del Pliego de Condiciones Técnicas del IDAE y del Instituto Nacional de Meteorología.

Cuando se selecciona la población en la hoja “Datos y resultados”, se importan los datos climáticos que le corresponden de la hoja “BD clima” a la hoja de “Datos y resultados”.

- **“1”, “2”, ... , y “12”**. Estas hojas están ocultas y son donde está implementado el método de cálculo de radiación solar horario y el Método F-Chart. Cada una de las hojas toma los valores que le corresponden de la hoja “Datos y resultados” y calcula el grado de cobertura de la instalación solar térmica para el mes correspondiente, siendo llevado este valor a la hoja “Datos y resultados”.



## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart

### 3 Modo de introducción de datos

En las hojas de datos que componen el libro hay diferenciados dos tipos de celdas, que indican la posibilidad de introducir datos o sólo muestran resultados y están protegidas contra escritura.

Para diferenciar ambos tipos de celdas, las de introducción de datos son de color azul claro, presentando de color amarillo las de resultado de algún cálculo. La figura 3.1 recoge ambos tipos de casillas.

Radiación sobre captador	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept	oct	nov	dic
Rad. incidente captador (Wh/m <sup>2</sup> día)	2640	3465	4212	4375	4697	5147	5559	5593	5006	3912	2973	2353

Datos edificio e instalación	Consumo día (lit)	Tipo instalación
Nº viviendas	40	Suministro ACS
Consumo A.C.S. (l/persona día)	30	
nº personas / vivienda	3,2	
CeI (kg/°C)	4187	
Tº agua consumo (°C)	45	

**Azul: Introducción de datos**

Necesidades calefacción (kWh/mes)	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept	oct	nov	dic

Perfil ocupación anual	Diferenciado (2.200 viv)
Ocupación edificio para ACS (%)	
	enero: 150, febrero: 127, marzo: 116, abril: 105, mayo: 90, junio: 77, julio: 69, agosto: 69, sept: 77, oct: 94, nov: 114, dic: 151

Datos característicos captadores	Área colectores(m <sup>2</sup> )
Nº captadores	24
Modelo captador	VISSMANN VITOSOL 100-2,5
Área de captador (m <sup>2</sup> )	2,50
a	0,83
b(W/m <sup>2</sup> ·K)	3,68

Coste instalación (€/m <sup>2</sup> captador)
450

Datos Método F-Chart	
Cte. Abs-trans	0,96
Cte. Intercambiador	0,95
Vicos en depósito / m <sup>2</sup> captador	64

Volumen acumulación (l)
3840

RESUMEN RESULTADOS INSTALACIÓN DE CAPTADORES SOLARES TÉRMICOS	
Energía anual cubierta por captadores (kWh/año)	40.207
Energía no cubierta por captadores (kWh/año)	18.924
Porcentaje cubierta por los captadores	68,0%
Rendimiento medio de los captadores	44%

**Amarillo: Resultados**

COMPROBACIÓN NORMATIVA RITE (ITE 10.1.3.2)	
Diseñar con consumo medio en meses de verano	NO
1) Relación área captadora	1,25 < 1,56 < 2
	CUMPLE NORMATIVA ÁREA CAPTADORA
2) Relación volumen acumulación	3072 < 3840 < 3840
	CUMPLE NORMATIVA VOLUMEN ACUMULACION

Figura 3.1

Las celdas en azul permiten introducir datos. Las amarillas son de resultados y no se puede acceder a modificar la información que contienen.

Aparte de celdas de introducción de datos, algunas celdas azules son de selección de opciones desplegables, en las que el usuario puede elegir entre las diferentes posibilidades que se incluyen.

Localización	Latitud (°)
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">           NAVARRA - Pamplona         </div>	42,0

**Celda desplegable de selección**

(en color azul figuran los datos que se pueden modificar)

Datos de la superficie captadora	Inclinación(°)	albedo(°)
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">           NAVARRA - Pamplona         </div>	50	0,2

(0=horizontal, 90=vertical) (0,1=mar, 0,2=terreno normal, 0,4=pradera, 0,9=nieve)

Datos clima	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept	oct	nov	dic
Rad (G Hor (Wh/m <sup>2</sup> día)	1561	2444	3596	4431	5349	6233	6595	5926	4510	2979	1865	1364
Tº ambiente (°C)	5,1	6,5	8,7	10,2	14,0	17,6	20,7	20,9	18,1	13,6	8,6	6,1
Tº med máximas (°C)	9,9	11,1	14,0	15,5	19,8	23,9	27,6	27,8	24,4	18,7	12,8	9,7
Tº med mínimas (°C)	1,2	1,9	3,3	4,9	8,2	11,2	13,7	14,0	11,7	8,4	4,3	2,4
Tº ambiente durante horas de sol (°C)	7,2	9,1	11,6	13,1	17,2	21,1	24,5	24,7	21,6	16,4	10,9	8,1
Tº agua en red (°C)	5	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5
Horas de sol	9,3	10,4	11,7	13,3	14,4	15,0	14,7	13,7	12,2	10,7	9,6	9,0

Figura 3.2

Celda desplegable para seleccionar la población para la que se va a realizar los cálculos de la instalación solar térmica. Las localidades de la lista son las incluidas en la base de datos "BD clima".

Cuando se lleva a cabo cualquier modificación en algún dato, automáticamente se calculan todos los resultados de nuevo, realizándose la actualización instantáneamente.



## 4 Datos necesarios en el cálculo

En este apartado se incluyen los datos necesarios para llevar a cabo el cálculo de la instalación solar térmica.

### 4.1. SELECCIÓN DE LA POBLACIÓN

El primer paso es seleccionar la población para la que se van a realizar los cálculos. Para llevar a cabo la selección hay que acceder a la celda de la población y elegir la localidad, figura 3.2.

En caso de querer introducir una nueva población se modificará la hoja de datos "BD clima", añadiendo al final de ésta el nombre de la población, la latitud y los datos medios mensuales de radiación global sobre horizontal, temperaturas ambientales de las máximas y de las mínimas y la temperatura media del agua de red.

**Figura 4.1**  
La introducción de una nueva población con sus datos climáticos en la base de datos "BD clima" se lleva a cabo después de los datos ya existentes o modificando éstos.

LOCALIDAD	Rad EHC(Wh/m²)	Rad Feb(Wh/m²)	Rad Mar(Wh/m²)	Rad Abr(Wh/m²)	Rad May(Wh/m²)	Rad Jun(Wh/m²)	Rad Jul(Wh/m²)	cRad Ago(Wh/m²)
ALABA	3277,70	4946,67	3111,11	3011,11	4111,11	4811,11	5027,70	4805,56
ALBACETE	1881,11	2946,67	4186,67	5333,33	5868,89	6872,22	7418,67	6444,44
ALICANTE	2381,11	3333,33	4527,78	5250,00	6449,67	6868,89	7406,67	6258,90
ALMERÍA	2472,22	3380,89	4555,56	5444,44	6449,67	6833,33	7327,78	6258,90
ASTURIAS	1472,22	2138,89	2944,44	3388,89	4186,67	4222,22	4868,67	4111,11
AVILA	1686,67	2527,78	3730,00	4946,67	5388,89	6194,44	7305,56	7027,78
BADAJOS	1805,56	2777,78	3777,78	5184,44	6055,56	6833,33	7194,44	6811,11
BALIAREIS	2030,00	2972,22	4030,00	4830,00	5833,33	6305,56	6732,22	6732,22
BARCELONA	1805,56	2638,89	3383,33	4472,22	5186,67	6038,89	6806,00	6027,78
BURGOS	1478,67	2184,44	3444,44	4444,44	5184,44	6172,22	6388,89	6736,00
CÁDIZ	2350,00	3184,44	4381,11	5138,89	5786,67	6811,11	7194,44	6338,89
CANTABRIA	1586,89	2055,56	3055,56	3011,11	4472,22	4722,22	5111,11	4308,56
CASTELLÓN	2222,22	3380,89	4355,56	4833,33	5722,22	6844,44	6838,89	5418,67
CELTA	2472,22	3030,89	3186,67	5833,33	6750,00	7418,67	7444,44	6758,90
CIUDAD REAL	1544,44	2385,56	4186,67	5184,44	5944,44	6583,33	7327,78	6444,44
CÓRDOBA	2030,00	2385,56	4184,44	5138,89	6055,56	7194,44	7818,67	6872,22
CUENCA	1638,89	2444,44	3583,33	4222,22	5184,44	6113,11	7111,11	6194,44
GERONA	1972,22	2946,67	3944,44	4418,67	5184,44	6277,78	6794,44	5138,89
GRANADA	2186,67	3030,00	4222,22	5138,89	6033,33	6868,89	7418,67	6558,56
GUADALAJARA	1805,56	2380,89	3380,89	4372,22	5388,89	6305,56	6844,44	6444,44
GUIPÚZCOA	1827,78	2138,89	3138,89	3280,00	4286,67	4806,00	4472,22	3777,78
HUELVA	2111,11	3138,89	4444,44	6449,67	6994,44	7113,11	7872,22	7113,11
HUESCA	1918,67	2527,78	4111,11	5138,89	5472,22	6388,89	6906,00	5861,11
JÁEN	1881,11	2895,56	4030,00	5030,00	5638,89	6777,78	7418,67	6694,44
LA CORUÑA	1930,00	2222,22	3186,67	3444,44	4277,78	4906,00	4833,33	4258,90
LA RIOJA	1555,56	2444,44	3895,56	4911,11	5333,33	5844,44	6472,22	5777,78
LAS PALMAS	3111,11	3944,44	4944,44	5444,44	6327,78	6250,00	6758,90	6683,33
LEÓN	1611,11	2446,67	3833,33	4777,78	5449,67	6108,89	6732,22	5805,56
LERIDA	1686,67	2730,00	3777,78	5222,22	5805,56	6277,78	6811,11	5818,67
LUGO	1446,67	2111,11	3250,00	4222,22	4750,00	5418,67	6811,11	5111,11
MADRID	1881,11	2944,44	3777,78	5222,22	5805,56	6527,78	7222,22	6418,67
MÁLAGA	2385,56	3333,33	4355,56	5138,89	6444,44	6805,56	7361,11	6444,44
MILILLA	2611,11	3580,00	4777,78	5638,89	6388,89	6888,89	6888,89	6277,78
MURCIA	2838,89	4111,11	4811,11	5868,67	6722,22	7113,11	7894,44	6827,78

Introducir nueva población con sus datos al final de la lista de localidades.  
Se permite modificar datos ya existentes.  
Como máximo se puede incluir el número de poblaciones que cabe en las celdas con cuadrícula.

### 4.2. DATOS DE LA SUPERFICIE

Una vez seleccionada la población se debe definir el albedo de los alrededores y la orientación e inclinación de los captadores. Las convecciones que se han utilizado son:

- Orientación de la superficie: 0° = sur; 90° = oeste; -90° = este y 180° = norte.
- Inclinación de la superficie: 0° = horizontal; 90° = vertical.
- Albedo. Es la reflexión de los alrededores donde está ubicada la superficie a analizar: 0,1 = mar; 0,2 = terreno normal; 0,4 = pradera; 0,9 = nieve.



## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart



**Figura 4.2** Introducción en la hoja "Datos y resultados" de la orientación e inclinación de los captadores y del albedo del terreno.

### 4.3. DATOS DE LA DEMANDA DE ACS Y CALEFACCIÓN

El Método F-Chart permite calcular el grado de cubrimiento de la demanda de ACS y/o calefacción de baja temperatura de un edificio. A continuación se enuncian los datos que hay que introducir en la hoja "Datos y Resultados" para definir la demanda energética del edificio que puede apoyarse mediante la instalación solar térmica:

- **"Nº viviendas"**. Es el número de viviendas de igual consumo en el que se divide el edificio.
- **"Consumo ACS (l/persona día)"**. Consumo individual de ACS que realiza una persona en un día medio anual.
- **"Nº personas/vivienda"**. Número de habitantes medio de una vivienda.
- **"Tª agua consumo (°C)"**. Temperatura final de consumo del agua caliente. Un valor habitual es 45°C, aunque se almacene para consumo final a más temperatura por la normativa de legionela, debiendo mezclarse con agua fría en el uso final, resultando a nivel energético el mismo consumo que si se hubiera utilizado el caudal de consumo a la temperatura de 45°C.
- **"Consumo día (l/día)"**. Consumo medio diario de ACS que se realiza en el edificio. Este valor es el que hay que conseguir cuadrar con los datos de necesidades del edificio. Por ejemplo, si se tuviera un edificio con viviendas de 1 ó 4 dormitorios, cada tipo tiene una ocupación diferente. En este caso se puede ajustar el consumo final diario del edificio con los parámetros "Nº viviendas", "Consumo ACS (l/persona día)" y "Nº personas/vivienda".

Cuando el edificio no es residencial se pueden ajustar los parámetros para realizar el equivalente a un edificio residencial. El caso más normal sería el de un hotel o el de un hospital en el que el consumo se estimará por número de camas.

- **"Tipo instalación"**. Existe una selección múltiple que permite calcular con el modelo de instalación solar para suministro de ACS, la segunda opción calcula el suministro de ACS y calefacción de baja temperatura combinados.

Si se elige la opción de "Suministro de Calefacción+ACS" se tendrá que rellenar la tabla de consumo medio mensual de calefacción prevista del edificio. La figura 4.3 muestra esta tabla y las celdas en las que se introducen el resto de datos de consumo de la instalación solar térmica.



**Figura 4.3** Datos sobre la demanda energética del edificio a cubrir en parte por la instalación solar térmica objeto del diseño.

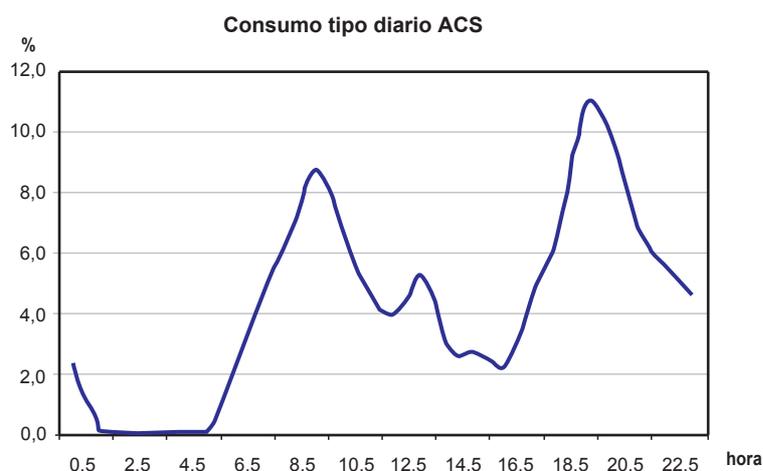
Las demandas energéticas pueden tener variaciones horarias, diarias (fin de semana) o mensuales (periodo de vacaciones). Un cálculo correcto de la instalación debería pasar por obtener un perfil de consumo horario en el edificio analizado.

## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart



En la mayoría de casos no se dispone del perfil de consumo del edificio, por lo que habrá que estimar un consumo tipo horario, pudiéndose utilizar cuando no se disponga de más información del consumo normalizado horario desarrollado por Muntch (1974), mostrado en la figura 4.4 y que se ha incluido en el cálculo del Método F-Chart en la hoja "Perfiles consumo".

**Figura 4.4**  
Porcentaje de consumo horario normalizado frente al consumo diario de ACS según Muntch (1974).



La curva de Muntch indica cómo se realiza el consumo típico de ACS en una vivienda a lo largo del día. Bastaría conocer el consumo total diario de la vivienda para saber cómo se distribuye de forma normalizada a lo largo del día.

El consumo de ACS medio diario que se tiene en una vivienda se puede obtener de los datos estadísticos obtenidos para 2.200 viviendas de Zaragoza, investigación realizada por el Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza y Viterra Energy Service a partir de 5 años de mediciones trimestrales en edificios de tipología bloque para diferentes sectores de la ciudad.

El consumo medio por vivienda obtenido es de 85,3 l/día vivienda, valor significativamente inferior al planteado en algunas ordenanzas o por fabricantes de captadores, y que conducirá a instalaciones con más área captadora en los edificios sin que ésta genere ningún beneficio al usuario, siendo más costosa tanto por el desembolso inicial como por los problemas de mantenimiento que tendrá durante su vida.

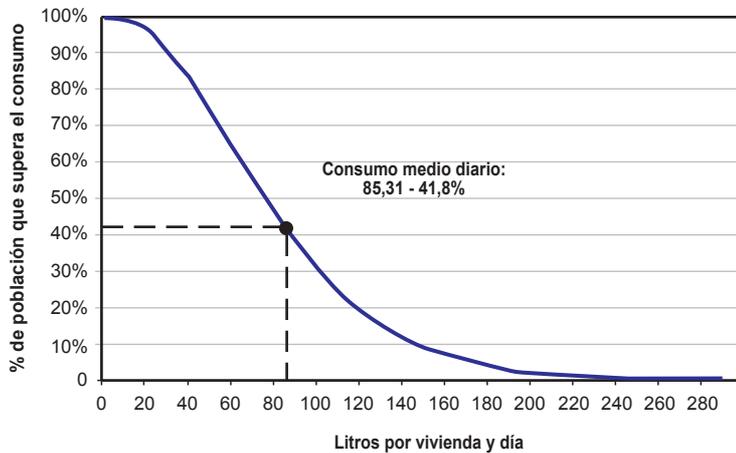
La estadística para Zaragoza arroja una ocupación de 3,2 personas/vivienda, similar a las estadísticas de otras poblaciones españolas. Por ejemplo, Pamplona se sitúa en 3,3 personas/vivienda.

Es interesante conocer para un valor de consumo diario dado, qué porcentaje de población se deja desatendida con producción solar. Para ello se ha construido una curva de consumo acumulado porcentual, figura 4.5.

En este gráfico, para un consumo diario dado, por ejemplo de 120 l/vivienda día, el eje de ordenadas indica un valor de un 20 %, esto significa que un 20 % de la población tiene un consumo medio de agua caliente sanitaria por encima de 120 litros diarios. O lo que es lo mismo, el 80 % de las viviendas consumen menos de 120 litros diarios de agua caliente.



## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart



**Figura 4.5**  
Porcentaje acumulado de consumo medio diario de ACS. (Fuente: Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza y Viterria Energy Service).

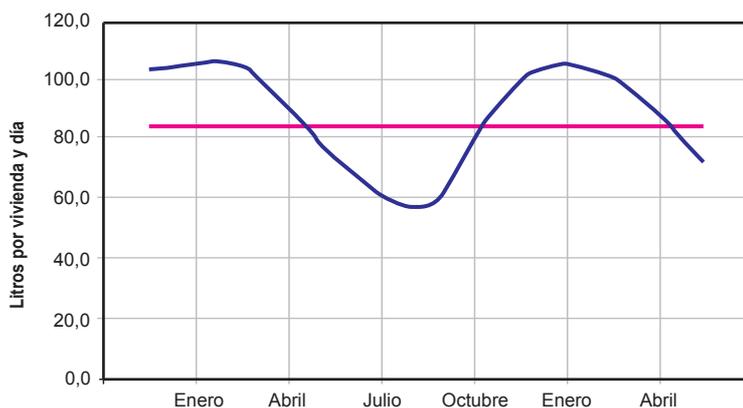
Se puede utilizar este ábaco para el diseño de sistemas de agua caliente sanitaria, puesto que es necesario estimar de partida cuál va a ser el consumo de agua caliente a la hora de dimensionar el sistema que la produzca.

Por ejemplo, si se quiere dimensionar un sistema de precalentamiento de agua caliente sanitaria mediante captadores solares térmicos con una demanda 180 litros diarios por vivienda se estará desatendiendo tan solo al 4,5 % de la población, produciéndose un alto excedente de energía para la mayor parte de habitantes del edificio. Para el 95,4 % de población, el sistema estará sobredimensionado, con los inconvenientes que esto puede acarrear, sobretodo si además se tiene en cuenta que en periodo estival el consumo todavía es menor que el medio anual.

Si se toma como valor de demanda el consumo medio diario de agua obtenido, 85,3 l/vivienda día, se tiene que más de la mitad, el 58,2 %, de las viviendas tienen un consumo menor:

Si se representan los consumos medios estacionales se tiene la curva de evolución del consumo medio diario para los distintos meses del año. Evidentemente esta curva solamente tiene valor orientativo, puesto que se ha construido uniendo los consumos medios puntuales asignados a un trimestre. Esto quiere decir que por ejemplo en agosto será probable que se espere un consumo menor que el que da el ábaco, dado que es el mes de vacaciones por excelencia, siendo el resto del trimestre mayor:

En la figura 4.6 se observa la evolución anual del consumo medio diario de agua caliente.



**Figura 4.6**  
Consumo medio estacional diario por vivienda de ACS. (Fuente: Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza y Viterria Energy Service).

## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart



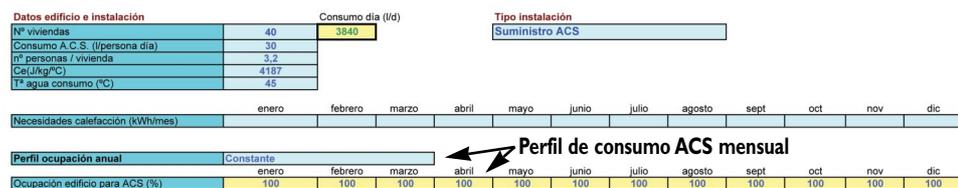
Si se diseña con el valor medio de consumo por vivienda se ha de tener en cuenta que en verano el consumo es un 31 % menor y en invierno un 24 % mayor. Se tiene, por tanto, una diferencia bastante importante, 47 l/vivienda día, entre estos dos valores extremos.

Estos datos pueden permitir a los diseñadores de captadores solares térmicos estimar la demanda real que se tiene en una muestra de edificios bastante extensa (2.200 viviendas).

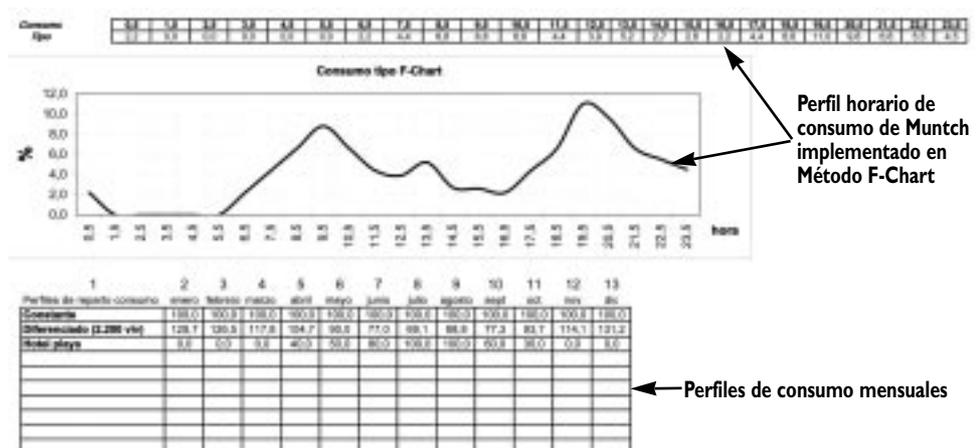
Como conclusión a los resultados mostrados, para diseñar la instalación solar térmica de un edificio tipo bloque se podría estimar un consumo medio anual por vivienda de 85,3 l/vivienda, que se modificaría dependiendo del mes en que se estuviera. Para todos los días de la semana se podría considerar un consumo por familia uniforme y un reparto diario horario del consumo similar al de Muntch.

El perfil de ocupación anual, figura 4.7, permite adaptar las variaciones del consumo medio diario para los diferentes meses. Un valor de por ejemplo 120% indicaría que el consumo en ese mes es un 20% superior a la media, no que el edificio esté ocupado con un 120% de personas.

**Figura 4.7**  
Elección del tipo de perfil de consumo mensual de ACS realizado en la hoja "Datos y resultados". Se pueden incluir nuevos perfiles o modificar los existentes en la hoja "Perfiles consumo".



**Figura 4.8**  
Definición de perfiles de consumo mensuales de la hoja "Perfiles consumo". Se pueden incluir o modificar en la tabla los perfiles de consumo mensual para ajustarlos a la ocupación previsible del edificio.





## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart

Para otros tipos de edificios, el IDAE recomienda realizar las estimaciones de la tabla 4.1.

TIPO DE USO	LITROS/DÍA	
Viviendas unifamiliares	40	por persona
Viviendas multifamiliares	30	por persona
Hospitales y clínicas	80	por cama
Hoteles ****	100	por cama
Hoteles ***	80	por cama
Hoteles/Hostales **	60	por cama
Camping	60	por emplazamiento
Hostales/Pensiones *	50	por cama
Residencias (ancianos, estudiantes, etc.)	80	por cama
Vestuarios/Duchas colectivas	20	por servicio
Escuelas	5	por alumno
Cuarteles	30	por persona
Fábricas y talleres	20	por persona
Oficinas	5	por persona
Gimnasios	30 a 40	por usuario
Lavanderías	5 a 7	por kilo de ropa
Restaurantes	8 a 15	por comida
Cafeterías	2	por almuerzo

### 4.4. DATOS DEL CAMPO SOLAR

Una vez fijada la demanda de ACS y/o calefacción, para diseñar la instalación hay que elegir el modelo y el número de captadores con los que se obtendrá un cierto grado de cubrimiento.

- **“Nº captadores”**. Es el parámetro más importante de diseño. Variando este valor se puede ajustar el área de captación total para satisfacer un grado de cubrimiento de la demanda determinado.
- **“Modelo captador”**. Permite seleccionar un modelo de captador de los incluidos en la hoja “BD Colector”. Al elegirlo se rellena de forma automática los datos del captador; área, parámetro óptico y coeficiente de pérdidas.
- **“Área de captadores (m²)”**. Es el área total de captación que tiene la instalación solar. Se obtiene como resultado de multiplicar el número de captadores por el área de cada uno.

Perfil ocupación anual	Constante	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept	oct	nov	dic
Ocupación edificio para ACS (%)		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Datos característicos captadores		Área colectores(m²)											
Nº captadores	24	49,9											
Modelo captador	VIEMANN VITOSOL 100-2,5												
Área de captador (m²)	2,50												
a	0,83												
b(W/m² K)	3,68												
<b>RESUMEN RESULTADOS INSTALACIÓN DE CAPTADORES SOLARES TÉRMICOS</b>													
Energía anual cubierta por captadores (kWh/año)	44.148	(kWh/año)											
Energía no cubierta por captadores (kWh/año)	14.104	(kWh/año)											
Porcentaje cubierto por los captadores	75,8%												
Rendimiento medio de los captadores	48%												

Datos captadores (número, modelo y área total)

**Figura 4.9**  
Datos de los captadores solares térmicos elegidos en la hoja 'Datos y resultados'.

## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart



En la hoja "BD colector" se incluye un listado de captadores solares que son seleccionables desde la hoja "Datos y resultados". La base de datos se puede aumentar o modificar, siempre que no se rebase un número de captadores que no sobrepase los límites en los que existe cuadrícula de la hoja "BD colectores".

En la base de datos de colectores se solicitan los datos que caracterizan al captador, como son el área de cada captador, el parámetro óptico (a) y el coeficiente de pérdidas (b). El resto de datos son valores informativos para el usuario. La figura 4.10 incluye una imagen del aspecto de la base de datos de colectores.

**Figura 4.10**  
Base de datos de captadores solares térmicos.

DENOMINACIÓN	Parámetro óptico	Coefficiente de pérdidas ( $W/m^2 K$ )	Coefficiente 2º perd ( $W/m^2 K^2$ )	Área útil ( $m^2$ )	Precio aprox.
CALPAK CA2051C	0,74	7,76		2,00	
CHROMAGEN CR-100S	0,80	4,00		1,90	479,5 €
CHROMAGEN CR-10S	0,80	4,00		2,17	517,5 €
CHROMAGEN CR-12S	0,80	4,00		2,56	576,4 €
ERUOTEKAN NORDSOL 1	0,81	4,10	0,030	2,00	
BERSOL AM2122X	0,79	4,28		2,81	
BERSOL AM2152N	0,79	4,28		2,11	
BERSOL CPC12	0,83	1,00	0,002	2,00	
BERSOL CPC16	0,83	1,00	0,002	3,00	
BERSOL CPC8	0,83	1,00	0,002	1,00	
INMOSOLAR IS-PRO 2H	0,80	3,56	0,014	2,00	
ISOFOTON ISONOX	0,75	4,15		2,03	528,7 €
KAYSUN CO 2000 EC	0,72	4,25		1,90	510,0 €
LKN 90 L	0,79	7,90		1,70	
MADE 4000E	0,87	5,38		2,13	460,0 €
ROCA P8	0,80	3,91	0,014	1,78	
ROTH PLANO	0,82	3,47	0,010	2,33	
ROTH VACIO	0,85	1,02	0,012	1,10	
TERMICOL 10S	0,82	8,20		2,09	
TERMICOL 10S S	0,89	4,40		2,09	
TERMICOL 130 S	0,89	4,30		2,60	
VIEMANN VITOSOL 100-1,7	0,81	3,78	0,013	1,70	500,0 €
VIEMANN VITOSOL 100-2,5	0,83	3,68	0,011	2,50	520,0 €
VIEMANN VITOSOL 200-D20 (vacío)	0,85	1,71	0,009	2,14	
VIEMANN VITOSOL 300-H30 (vacío)	0,85	1,28	0,009	3,21	

Base de datos de captadores. Permite la introducción de nuevos captadores o la modificación de los existentes. Sólo se puede incluir datos hasta el límite con cuadrícula.

### 4.5. DATOS DE ACUMULACIÓN Y EFICIENCIA DE INTERCAMBIO

Hay una serie de datos complementarios relacionados con la eficiencia del intercambio energético, y que son las variables:

- **“cte. Abs-trans”**. Este parámetro indica la eficiencia del intercambio entre la placa absorbente del captador y el fluido caloportador, teniendo en cuenta las variaciones del ángulo de incidencia del sol con la placa absorbente a lo largo del día y el no ser instantáneo el proceso de transferencia térmica. Se recomienda utilizar 0,96.
- **“cte. intercambiador”**. Representa la eficiencia de la transferencia de energía entre el primario, compuesto por el fluido caloportador, y el depósito de acumulación. En depósitos individuales o de doble envolvente la constante vale 1,0, y cuando se utilizan intercambiadores de placas su eficiencia es superior a 0,95.
- **“Litros en depósito / m<sup>2</sup> captador”**. Es la relación de acumulación en el depósito frente a la superficie de captación. Para usos normales se recomienda utilizar valores comprendidos entre 50 a 70 l de acumulación/m<sup>2</sup> captador.



## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart

- **“Volumen acumulación (I)”**. Es el volumen total de ACS que deben tener los depósitos solares de la instalación. Su valor se obtiene de multiplicar el área total de captación por los “Litros en depósito / m<sup>2</sup> captador”.

### Datos Método F-Chart

cte. Abs-trans.	0,96
cte. Intercambiador	0,95
litros en depósito / m <sup>2</sup> captador	64

Datos eficiencia intercambio

### Volumen acumulación (I)

3840
------

Volumen depósito solar

**Figura 4.11**

Introducción de datos del depósito solar y de la eficiencia de intercambio térmica entre primario y secundario.

## 5 Resultados

Una vez introducidos los datos de la demanda, del campo solar y del volumen de acumulación se obtiene como resultado el grado de cobertura de la demanda energética producida con la instalación solar térmica.

En las instalaciones habituales el grado de cobertura debe situarse próximo al 60%, resultando este valor el óptimo económico con relación al coste de las instalaciones y de la energía a día de hoy. No es de extrañar por tanto que las Ordenanzas Solares Térmicas que han surgido en diferentes municipios de España fijen el 60% como resultado a cubrir de la demanda.

En la figura 5.1 se muestran los resultados energéticos que facilita la hoja “Datos y resultados”. El dato principal con el que se diseña una instalación solar es el grado de cubrimiento de la demanda por la instalación solar (“Porcentaje cubierto por los captadores”).

abril	mayo	junio	julio	agosto	sept	oct	nov	dic
-------	------	-------	-------	--------	------	-----	-----	-----

100	100	100	100	100	100	100	100	100
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

RESUMEN RESULTADOS INSTALACIÓN DE CAPTADORES SOLARES TÉRMICOS		
Energía anual cubierta por captadores (kWh/año)	44.148	(kWh/año)
Energía no cubierta por captadores (kWh/año)	14.104	(kWh/año)
Porcentaje cubierto por los captadores	75,8%	← Resultados energéticos. Grado de cobertura de la demanda
Rendimiento medio de los captadores	48%	

**Figura 5.1**

Los resultados energéticos incluyen la energía cubierta por los captadores, la que se debe suministrar mediante fuentes auxiliares, el grado de cubrimiento de la demanda y el rendimiento medio de los captadores (de toda la energía anual que reciben los captadores suelen aprovechar entorno al 50%).

Si se quiere incrementar el grado de cobertura se debe aumentar el área de captación instalando un mayor número de captadores, mientras que para reducirlo se puede disminuir. Siempre es recomendable que el número de colectores de la instalación permita hacer grupos de igual número de captadores.

## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart



Una vez prediseñada la instalación hay que verificar que se cumplen los apartados del RITE en cuanto a la relación de captadores respecto al número de viviendas (sólo en uso residencial) y la limitación del volumen de acumulación. Existen dos opciones de diseño referidas al cumplimiento de la normativa. Si se elige consumo diferenciado en verano se deberá reajustar el diseño para cumplir los valores normativos.

Si la aplicación indica un incumplimiento de la relación de área captadora se deberá modificar el número de colectores hasta que se sitúe en la horquilla que permite el RITE. De igual modo, si no se cumple la relación de volumen de acumulación habrá que modificar los "Litros en depósito / m<sup>2</sup> captador" hasta que la hoja de cálculo "Datos y resultados" dé por bueno los valores y no salgan mensajes de incumplimiento de la normativa. La figura 5.2 muestra la comprobación que se realiza en la hoja "Datos y resultados".

**Figura 5.2**  
Comprobación cumplimiento de los apartados del RITE que afectan a las instalaciones solares en la hoja "Datos y resultados".

COMPROBACION NORMATIVA RITE (ITE 10.1.3.2)			
Diseñar con consumo medio en meses de verano		NO	
1) Relación área captadora	1,25	< 1,56	< 2
<b>CUMPLE NORMATIVA AREA CAPTADORA</b>			
2) Relación volumen acumulación	3072	< 3840	< 3840
<b>CUMPLE NORMATIVA VOLUMEN ACUMULACION</b>			

Cuando se modifique la normativa actual de Instalaciones Térmicas dejará de ser válida la comprobación de la normativa que se realiza, debiendo guiarse el diseñador por el grado de cobertura anual de la demanda.

La hoja "Datos y resultados" incluye el análisis de la rentabilidad económica con diferentes hipótesis de cálculo en función del tipo de instalación con la que se compare y del precio del combustible. Para realizar este estudio se parte de un coste de la instalación solar por metro cuadrado de captador. Como valor indicativo se puede utilizar en edificios con instalaciones auxiliares centralizadas un coste medio de 450 €/m<sup>2</sup> captador.

**Figura 5.3**  
Coste de la instalación por unidad de superficie captadora en la hoja "Datos y resultados".

Datos característicos captadores		Área colectores(m <sup>2</sup> )
Nº captadores	24	60,0
Modelo captador	VIEMANN VITOSOL 100-2,5	
Área de captador (m <sup>2</sup> )	2,50	
a	0,83	
b(W/m <sup>2</sup> K)	3,68	
Coste instalación (€/m <sup>2</sup> captador)	450	← Coste instalación (euros/m <sup>2</sup> captación)

En la hoja se realizan tres cálculos de rentabilidad económica. El primer caso es la comparación con el edificio dotado de calderas individuales de gas, el segundo es un cálculo libre de comparación y el último se realiza con una instalación individual totalmente eléctrica.

En la figura 5.4 se muestra un ejemplo con coste de la instalación solar térmica de 27.000 €, teniéndose para el caso primero un precio del combustible (IVA incluido) de 0,038 €/kWh con un rendimiento de las calderas de un 85%, obteniéndose como resultado un periodo de recuperación de la inversión de 14,9 años, con un ahorro anual de combustible propiciado por la instalación solar de 1.818 €/año.



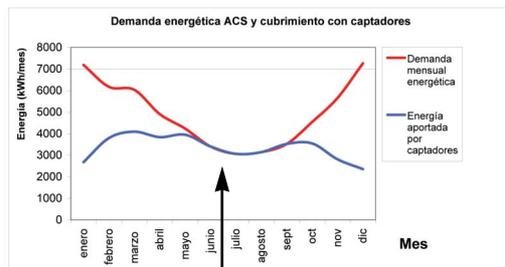
## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart

ANÁLISIS ECONÓMICO DE RENTABILIDAD				
Coste instalación colectores (€)=				27.000
Rendimiento sistema auxiliar (%)	85%	Precio combustible (€/kWh)	13,5	Ahorro anual (€/año)
	70%		6,6	
	100%		6,5	
Periodo Recuperación inversión (años)				1.996
				4.099
				4.178

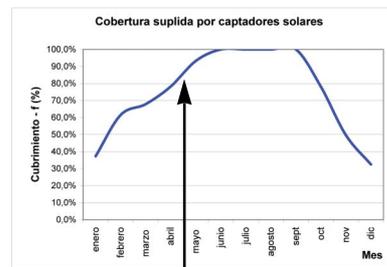
**Figura 5.4**  
Análisis de la rentabilidad económica incluida en la hoja "Datos y resultados".

Los resultados mensuales de la demanda energética y de la energía producida por los captadores se muestran en la figura 5.5.

RESULTADOS MENSUALES DE APROVECHAMIENTO													
(kWh/mes)	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept	oct	nov	dic	ANUAL
Demanda mensual energética	7185	6171	6033	4910	4237	3406	3061	3144	3523	4540	5696	7264	59131
Energía aportada por captadores	2680	3798	4063	3839	3950	3406	3061	3144	3523	3547	2809	2357	40207
Cobertura necesidades (f)	37,3%	61,5%	67,8%	78,2%	93,2%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	78,1%	49,7%	32,4%	68,0%



**Evolución anual demanda y aporte a la demanda por captadores**



**Evolución anual del grado de cobertura demanda captadores**

**Figura 5.5**  
Presentación de la demanda energética y la producción facilitada por la instalación solar térmica. La figura de la derecha muestra el grado de cubrimiento mensual de la demanda mediante el aporte solar. Estos resultados se han incluido en la hoja "Datos y resultados".

La aplicación no determina el sombreado sobre los captadores por obstáculos externos o propios, pero se permite calcular la radiación incidente por unidad de superficie con otras herramientas e introducirlo en la hoja "Datos y resultados".

Si se tiene un sombreado externo producido por un perfil de horizonte se puede emplear la aplicación "Cálculos\_Radiación\_Solar\_Horarios" e incorporar la radiación incidente a la hoja "Datos y resultados". Con la aplicación "Radiación\_Solar\_Horaria\_en\_Ventanas\_y\_Captadores" se puede obtener el sombreado producido entre los captadores y llevar de igual modo la radiación minorada.

En la figura 5.6 se indica dónde se deben llevar los datos de radiación incidente considerando el sombreado, calculando el Método F-Chart con esta minoración energética.

Centro Integrado de FP Superior de Energías Renovables

© Miguel Ángel Hernández Cruz 2004

**Cálculo de instalaciones solares térmicas en edificios**

**Método F-Chart**

**Gobierno de Navarra**  
Departamento de Educación

---

Localización: NAVARRA - Pamplona      Latitud (°): 42,8

Datos de la superficie captadora: Orientación= 0      Inclinación= 50      albedo= 0,2

(0=sur; 90=este; -90= oeste)      (0=horizontal; 90=vertical)      (0,1=mar; 0,2=terreno normal; 0,4=pradera; 0,9=nieve)

Datos clima	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept	oct	nov	dic
Rsd G Hor (Wh/m² día)	1691	2444	3056	4031	5149	6233	6595	6028	4910	3079	1995	1364
Tª ambiente (°C)	5,1	6,5	8,7	10,2	14,0	17,6	20,7	20,9	18,1	13,6	8,6	6,1
Tª med máximas (°C)	8,9	11,1	14,0	15,5	19,5	23,9	27,6	27,8	24,4	18,7	12,8	9,7
Tª med mínimas (°C)	1,2	1,9	3,3	4,9	8,2	11,2	13,7	14,0	11,7	8,4	4,3	2,4
Tª ambiente durante horas de sol (°C)	7,2	9,1	11,8	13,1	17,2	21,1	24,5	24,7	21,6	16,4	10,9	8,1
Tª agua en red (°C)	6	6	8	10	11	12	13	12	11	10	8	5
Horas de sol	9,3	10,4	11,7	13,3	14,4	15,0	14,7	13,7	12,2	10,7	9,6	9,0

Radiación sobre captador	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept	oct	nov	dic
Rad. incidente captador (Wh/m² día)	2640	3486	4212	4375	4697	5147	5599	5593	5006	3912	2973	2333

Datos edificio e instalación	Consumo día (l/d)		Tipo instalación
Nº viviendas	40	3840	Suministro ACS
Consumo A.C.S. (l/persona día)	30		
Nº personas / vivienda	3,2		
Cel.(l/kg°C)	4187		
Tª agua consumo (°C)	45		

Introducción datos radiación incidente con sombreado

**Figura 5.6**  
Inclusión de radiación incidente sobre superficie de captación para tener en cuenta el sombreado determinado con otras aplicaciones.



## 6 Método de cálculo F-Chart

El principal motor de la aplicación es el cálculo de la radiación solar horaria que permite estimar la energía que incide en los captadores. En el cálculo de la radiación solar se han aplicado los modelos de Gopinathan K. K. y Soler A. (1995) y las correlaciones de transformación de la radiación media horaria de la radiación de Liu B. Y. H. (1960) y Collares-Pereira M. (1979). Estos modelos se han implementado en las hojas ocultas "1" a "12".

En cuanto al método de cálculo de instalaciones solares térmicas se ha utilizado el análisis medio mensual del Método F-Chart desarrollado por Klein S. A., Duffie J. A. y Beckman W. A., que a continuación se describe.

Para el dimensionado de las instalaciones de energía solar térmica se sugiere el método simplificado de las curvas  $f$  (F-Chart) que permite realizar el cálculo de la cobertura de un sistema solar, siendo ampliamente aceptado como un proceso de cálculo suficientemente exacto para largas estimaciones, no debiendo aplicarse para estimaciones de tipo semanal o diario.

Para desarrollarlo se utilizan datos mensuales medios meteorológicos, siendo válido para determinar el factor de cobertura solar en instalaciones térmicas de todo tipo de edificios.

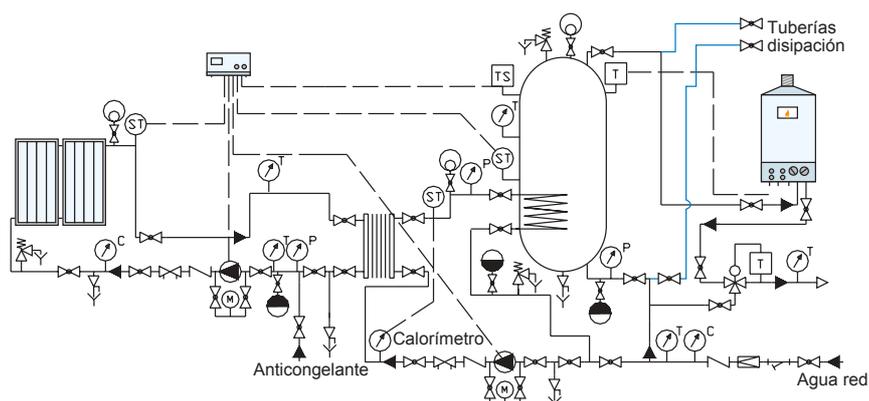
Su aplicación sistemática consiste en identificar las variables adimensionales del sistema de captación solar y utilizar la simulación para dimensionar las correlaciones entre estas variables y el rendimiento medio del sistema para un dilatado periodo de tiempo.

El Método F-Chart fue desarrollado en 1976 por los profesores Duffie y Beckman, que correlacionaron cientos de resultados de simulaciones numéricas y experimentales obtenidos con métodos de cálculo dinámico, como podría ser TRNSYS. El Método F-Chart fue desarrollado para tres sistemas básicos: sistemas de calefacción (aire o agua) y sistemas de agua caliente sanitaria.

Este método proporciona una estimación del porcentaje de energía que es suministrado por la instalación solar del total de las necesidades energéticas. La variable principal de la que dependerá el grado de cobertura es el área colectora. Las variables secundarias serán el tipo de colector; la capacidad de almacenamiento, los caudales de fluido, el tamaño de los intercambiadores...

La configuración básica de un sistema de agua caliente sanitaria mediante captadores solares se muestra en la figura 6.1.

**Figura 6.1**  
Instalación típica de producción de ACS con acumulador y sistema auxiliar.





## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart

En la figura 6.1 se muestra una instalación típica de producción de ACS con transferencia mediante un intercambiador de calor al tanque de precalentamiento, desde allí pasa a consumo aportando energía auxiliar la caldera en caso de que no se alcanzara la temperatura de consumo por la instalación de colectores. Una válvula de mezcla mantendrá la temperatura adecuada antes de la utilización del agua si se sobrepasa la temperatura máxima de consumo final. Los cambios en la configuración de este sistema no van a afectar de manera significativa a su funcionamiento.

Para sistemas con la configuración mostrada en la figura 6.1, el grado de cobertura de las necesidades energéticas mensuales sería:

$$f = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{nec}}} = \frac{Q_{\text{nec}} - Q_{\text{aux}}}{Q_{\text{nec}}} \quad [6.1]$$

Para calcular  $Q_{\text{útil}}$  a través del rendimiento instantáneo, hay que conocer en cada momento la radiación incidente, temperatura ambiente y las necesidades energéticas, lo que dificulta la simulación del sistema.

Sin embargo, el Método F-Chart obtiene el grado de cobertura mediante los parámetros adimensionales X e Y sin tener que recurrir a determinar el rendimiento del captador en cada instante. El grado de cobertura se puede obtener a través de la ecuación siguiente:

$$f = 1,029 \times Y - 0,065 \times X - 0,245 \times Y^2 + 0,0018 \times X^2 + 0,0215 \times Y^3 \quad [6.2]$$

La secuencia que se puede seguir en el cálculo es la siguiente:

- Determinación de la carga energética para el calentamiento de agua destinada a la producción de ACS o calefacción.
- Cálculo de la radiación solar incidente en la superficie inclinada del captador o captadores.
- Cálculo del parámetro X.
- Cálculo del parámetro Y.
- Obtención de la cobertura solar mensual.
- Cálculo de la cobertura solar anual.

### 6.1. CÁLCULO DE LAS NECESIDADES ENERGÉTICAS

Cuando se diseña una instalación de colectores solares es fundamental una precisa determinación de las necesidades energéticas para las que se está dimensionando el sistema. Aunque se consiga un diseño correcto de la instalación, si se ha partido, por ejemplo, de una estimación errónea del consumo de agua caliente, el grado de cobertura será distinto al previsto.

Por tanto, se debe recopilar toda la información que sea posible relativa a los niveles de consumo de agua caliente. En caso de no poseer ningún dato se puede recurrir a la información facilitada por el IDAE.

No sólo son importantes los valores absolutos, sino que también serán importantes las distribuciones de esos consumos, sobretudo en situaciones atípicas. A igualdad de consumos, la distribución de estos influirá en los volúmenes de acumulación a instalar. Se colocará mayores volúmenes si el consumo es estacional. De esta forma se almacenará energía en periodos de bajo consumo para periodos de mayor consumo.

## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart



El consumo de ACS será función de los hábitos de cada consumidor en particular y entran en juego factores socio-culturales que habrá que tener presentes. En los casos normales se puede considerar más o menos distribuido a lo largo del día, con picos en la mañana y la noche. La correlación del método F-Chart está obtenida para el perfil de consumo de la figura 4.4.

La energía mensual necesaria para calentar el agua desde la temperatura a la que la suministra la red hasta la de consumo, se determina mediante la siguiente expresión:

$$Q_a = C_e \times C \times (t_{ac} - t_r) \times n \quad [6.3]$$

- $Q_a$ : Demanda energética mensual de calentamiento ACS (J/mes).
- $C$ : Consumo diario de ACS (l/d).
- $C_e$ : Calor específico. Para agua: 4.187 J/kg °C.
- $t_{ac}$ : Temperatura del agua caliente de acumulación (°C).
- $t_r$ : Temperatura del agua de red (°C).
- $n$ : Número de días.

En caso de que la instalación facilite energía para calefactar el edificio, habrá que incluir como demanda añadida a la de ACS el consumo previsto mensual de calefacción del edificio ( $Q_{calef}$ ). Esta energía se obtendrá mediante simulación con una herramienta de cálculo adecuada.

También se debe incluir dentro de las necesidades energéticas las pérdidas que se produzcan en el sistema. Estas se localizarán principalmente en el depósito acumulador y en las tuberías de los circuitos. En definitiva, las necesidades quedarían como:

$$Q_{NEC} = Q_a + Q_{calef} + Q_{perd} \quad [6.4]$$

### 6.2. CÁLCULO DE RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE

Normalmente se va a encontrar datos de radiación mensuales sobre superficie horizontal. Para el cálculo de las variables adimensionales se debe conocer la radiación incidente sobre una superficie con una inclinación y orientación dadas.

En la hoja de cálculo se ha recurrido a usar los modelos de radiación enunciados al comienzo del apartado 6.

### 6.3. CÁLCULO DE X

El parámetro X expresa la relación entre las pérdidas de energía en el captador para una determinada temperatura y la energía necesaria durante un mes:

$$X = \frac{\text{energía\_pérdida\_captador}}{\text{energía\_necesaria\_mensual}} \quad [6.5]$$

La energía perdida por el captador para producción combinada de calefacción y ACS viene dada por la siguiente expresión:

$$E_p = A_c \times F'_R U_L \times (100 - t_a) \times \Delta t \times K_i \quad [6.6]$$



## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart

La energía perdida por el captador para producción sólo de ACS, viene dada por la siguiente expresión:

$$E_p = A_c \times F'_R U_L \times (100 - t_a) \times \Delta t \times K_1 \times K_2 \quad [6.7]$$

- $A_c$ : Superficie del captador ( $m^2$ ).
- $F'_R U_L = F_R U_L (F'_R / F_R)$ .
- $F_R U_L$ : Pendiente de la curva característica del captador (coeficiente global de pérdidas del captador).
- $t_a$ : Temperatura media mensual del ambiente durante las horas de sol.
- $\Delta t$ : Período de tiempo considerado en segundos (s).
- $K_1$ : Factor de corrección por almacenamiento.
- $K_2$ : Factor de corrección para ACS. Relaciona la temperatura mínima del ACS, la del agua de red y la media mensual ambiente.

### 6.4. CÁLCULO DE $F'_R U_L$

El factor de eficiencia global,  $F_R$ , es un factor que se introduce para poder calcular la energía útil de un colector en función de la temperatura del fluido, en lugar de la temperatura de la placa absorbadora, difícil de obtener. La energía útil se determina con la siguiente expresión:

$$Q_u = A_c F_R [(\tau\alpha)H_G - U_L(T_f - T_a)] \quad [6.8]$$

Los valores de  $F_R U_L$  vienen dados por el fabricante del colector y se obtienen en los ensayos que se realizan para su homologación.

En la mayoría de las instalaciones se tiene dos circuitos, uno primario donde se capta la radiación solar y otro secundario donde se extrae el agua de consumo. Esto implica que se debe transferir el calor de uno a otro circuito a través de un intercambiador. Este hecho representa una penalización energética respecto a lo que sería un circuito abierto del que se extrajese directamente agua para el consumo. Esta penalización la recoge el factor  $F'_R/F_R$ , y se define como:

$$\frac{F'_R}{F_R} = \left[ 1 + \left( \frac{A_c \times F_R \times U_L}{(m \times C_p)_c} \right) \times \left( \frac{(m \times C_p)_c}{\epsilon \times (m \times C_p)_{\min}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad [6.9]$$

Si se desconocen las características del intercambiador, se recomienda tomar  $F'_R/F_R = 0.95$ .

- $\epsilon$ : Eficiencia del intercambiador  $\left( \epsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} \right)$

Para un intercambiador a contracorriente, la eficiencia del intercambiador ( $\epsilon$ ) viene dada por:

$$\epsilon = \frac{1 - e^{-NTU(1-C^*)}}{1 - C^* e^{-NTU(1-C^*)}} \quad \text{si } C^* \neq 1 \quad [6.10]$$

$$\epsilon = \frac{NTU}{1 + NTU} \quad \text{si } C^* = 1 \quad [6.11]$$



- NTU: Número de unidades de transferencia y viene dado por:

$$NTU = \frac{(UA)}{(m \times C_p)_{\min}} \quad [6.12]$$

$$C^* = \frac{(m \times C_p)_{\min}}{(m \times C_p)_{\max}} \quad [6.13]$$

### 6.5. CÁLCULO DE $K_1$ Y $K_2$

Existen dos factores que pueden modificar el valor del grado de cobertura anual en un sistema de calentamiento de ACS solar, éstos son:

- La capacidad del sistema de almacenamiento por unidad de superficie colectora instalada.
- La relación de la temperatura mínima de ACS, la del agua de red y la media mensual del ambiente.

#### 6.5.1. Capacidad de almacenamiento ( $K_1$ )

El comportamiento de un sistema de colectores solares para ACS es relativamente insensible a la capacidad de almacenamiento cuando ésta sobrepasa los 50 l/m<sup>2</sup>. La influencia es relativamente pequeña sobre los resultados globales, y cuando los costes de almacenamiento son considerados, se alcanza el óptimo entre los 50 y 100 l/m<sup>2</sup> de superficie colectora.

El método F-Chart ha sido generado considerando una capacidad de almacenamiento de 75 l/m<sup>2</sup> de superficie colectora. Pero permite aumentar el rango de aplicación introduciendo un coeficiente corrector que afecta al parámetro X:

$$K_1 = \left( \frac{\text{kg acumulación}}{75 \times A_c} \right)^{-0,25} \quad 37,5 < \text{kg acumulación/m}^2 \text{ captador} < 300$$

#### 6.5.2. Factor de corrección para ACS ( $K_2$ )

En los cálculos del grado de cobertura con el Método F-Chart, para sistemas sólo de preparación de ACS, se debe incluir un factor de corrección que tenga en cuenta los niveles medios de temperatura de funcionamiento de la instalación. Este nuevo factor viene dado por la siguiente expresión:

$$K_2 = \frac{11,6 + 1,18 \times t_{ac} + 3,86 \times t_r - 2,32 \times t_a}{100 - t_a} \quad [6.14]$$

- $T_{ac}$ : Temperatura de uso de ACS.
- $T_r$ : Temperatura del agua en la red.
- $T_a$ : Temperatura media mensual del ambiente.



## Cálculo de instalaciones solares térmicas. Método F-Chart

### 6.6. CÁLCULO DE Y

El parámetro Y expresa la relación entre la energía absorbida por la placa del captador solar y la energía necesaria total durante un mes.

$$Y = \frac{\text{energía\_absorbida\_captador}}{\text{energía\_necesaria\_mensual}} \quad [6.15]$$

La energía absorbida por el captador viene dada por la siguiente expresión:

$$E_a = A_c \times F'_R(\tau\alpha) \times H_G \times N \quad [6.16]$$

- $A_c$ : Superficie del captador ( $m^2$ ).
- $H_G$ : Radiación diaria media mensual incidente sobre la superficie de captación por unidad de área ( $kJ/m^2$  día).
- $N$ : Número de días al mes.
- $F'_R(\tau\alpha)$ : Factor adimensional, que viene dado por la siguiente expresión:

$$F'_R(\tau\alpha) = F_R(\tau\alpha)_n \times ((\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n) \times (F'_R/F_R) \quad [6.17]$$

- $F_R(\tau\alpha)_n$ : Factor de eficiencia óptica del captador. Corresponde a la ordenada en el origen de la curva característica del captador; obtenida de los ensayos del colector.
- $((\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n)$ : Modificador del ángulo de incidencia. En general se puede tomar como constante:
  - 0,96 (superficie transparente sencilla, caso habitual).
  - 0,94 (superficie transparente doble).

### 6.7. CÁLCULO DEL GRADO DE COBERTURA MENSUAL

Para las instalaciones solares térmicas que funcionan con fluido caloportador, la correlación que indica el grado de cobertura mensual es:

$$f = 1,029 \times Y - 0,065 \times X - 0,245 \times Y^2 + 0,0018 \times X^2 + 0,0215 \times Y^3 \quad [6.18]$$

Para valores de X, Y comprendidos entre:

$$0 < X < 18 \quad 0 < Y < 3$$

La energía útil para cada mes vendrá dada por:

$$Q_{\text{útil}} = f \times Q_{\text{nec}}$$

### 6.8. CÁLCULO DEL GRADO DE COBERTURA ANUAL

El grado de cobertura anual se obtiene mediante la suma de la energía útil aportada y energía necesaria para todos los meses del año:

$$F = \frac{Q_{\text{útil}}^{\text{año}}}{Q_{\text{nec}}^{\text{año}}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{12} Q_{\text{nec},i}} \sum_{i=1}^{12} f_i \times Q_{\text{nec},i} \quad [6.19]$$



### 6.9. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO F-CHART

Hay que tener en cuenta que se han realizado una serie de suposiciones para desarrollar la correlación que calcula el grado de cobertura.

- **Primera.** Se supone una temperatura única del agua en los depósitos acumuladores, no considerándose el fenómeno de estratificación. Esto provoca estimaciones de  $f$  conservadoras, ya que sobreestima la temperatura de entrada al colector.
- **Segunda.** Considera simétrico el día respecto el mediodía, no considerando útil la energía que tiene el agua por encima de la temperatura de consumo.
- **Tercera.** Considera que los sistemas están bien contruidos, con una distribución del flujo uniforme. En sistemas de agua el caudal de fluido considerado en el colector es de  $0,015 \text{ l/s m}^2$ . Prácticamente es aplicable a caudales diferentes ya que su incidencia en el rendimiento es despreciable.

Para validar el Método F-Chart, Duffie y Beckman usaron tres procedimientos. El primero fue la comparación con simulaciones detalladas de múltiples localidades, simulaciones que ya habían sido comprobadas con medidas experimentales. El segundo método de comprobación se hizo con medidas experimentales en laboratorio y el tercero con medidas de sistemas en operación real.

Los resultados anuales obtenidos, generalmente fueron satisfactorios, produciéndose discrepancias inferiores al 3%, y en los peores casos del 11%. Los grados de cobertura mensuales no se ajustaban tan exactamente, por lo que el Método F-Chart sólo debería usarse para simulaciones anuales.