



1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

La energía es un elemento vital en el desarrollo económico de un país. La política energética de la Unión Europea se basa en la seguridad del abastecimiento, la competitividad económica y la protección del medio ambiente. La UE, que depende casi totalmente de la importación de petróleo, gas y carbón, está muy condicionada por el cumplimiento del protocolo de Kioto.

Los combustibles fósiles se consumen a una velocidad 100.000 veces mayor que el tiempo requerido para producirse. El gasto energético convencional se traduce en emisiones contaminantes que causan el efecto invernadero, al que se quiere poner freno con el Protocolo de Kioto y con el desarrollo de las energías alternativas.

Las energías renovables son inagotables y respetuosas con el medio ambiente, no producen residuos ni generan emisiones de CO₂. Son fuentes de energía renovables la energía hidráulica, la energía eólica, la biomasa, los biocarburantes, la solar (fotovoltaica, térmica y termoeléctrica), la geotérmica y la energía de las olas y mareas. Las energías renovables en general y la energía solar térmica en particular, representan una apuesta por fuentes de energías descentralizadas, generadoras de empleo y que utilizan tecnologías simples y de fácil acceso.

El Sol nos regala su energía en forma de luz y calor. Hoy, una tecnología establecida, eficiente y no contaminante nos permite utilizarlo para iluminar y calentar nuestras casas y negocios reduciendo los consumos energéticos para la producción de agua caliente sanitaria, la calefacción, el calentamiento de piscinas y la climatización. Su utilización se justifica no sólo en el ahorro energético y la rentabilidad del usuario, sino que además contribuye al bien común: la mejora de la calidad del aire de las ciudades y del país; la rentabilidad macroeconómica por el uso de recursos propios, la generación de riqueza interna y de empleos, y la reducción de la dependencia energética externa.

España es uno de los países de la Unión Europea con mayores recursos energéticos, en cuanto a radiación solar recibida. Concretamente en Andalucía recibimos una cantidad de radiación media de 5 KWh/(m²·día), como podemos ver en la Figura 1.1 del Instituto Nacional de Meteorología, a partir de las isolíneas de radiación solar global anual sobre una superficie horizontal.

Aunque la radiación solar disponible, 5 kWh/(m²·día), no es totalmente aprovechable, ya que hay que multiplicarla por el rendimiento del captador solar y del resto de equipos del sistema, España es capaz de obtener un 70% de la energía requerida para producir agua caliente en todos los hogares con una pequeña parte de esta radiación.

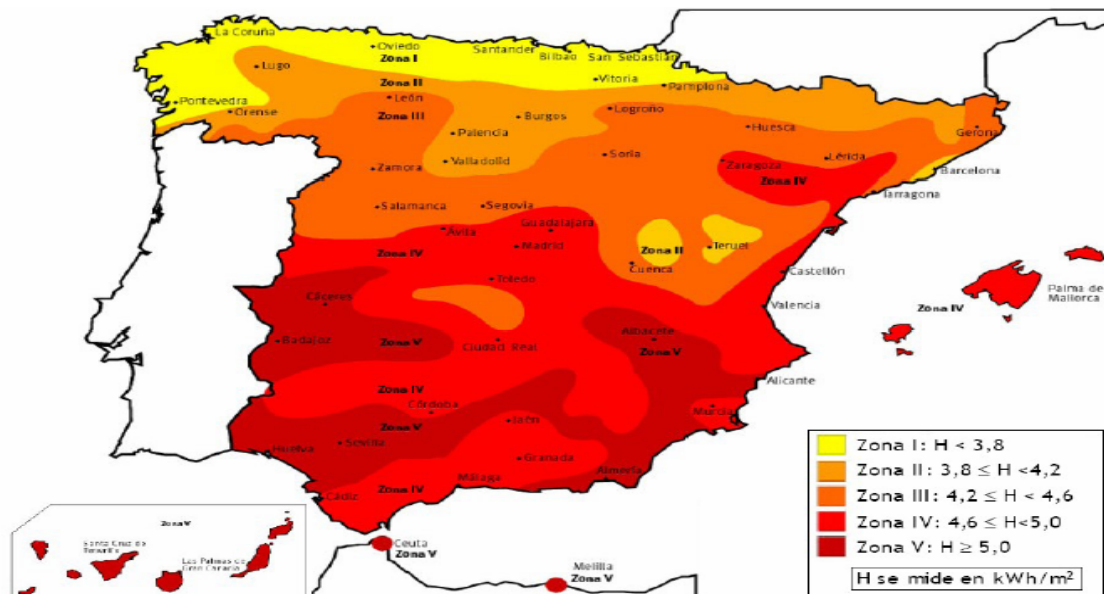


Figura 1.1 Valor medio anual de la radiación solar global diaria en superficie horizontal en España

1.2. ESTADO ACTUAL DE LA ENERGÉTICA EN ESPAÑA

Los consumos en climatización (calefacción y aire acondicionado), agua caliente sanitaria e iluminación representan más de las tres cuartas partes del consumo energético de la vivienda, concretamente, el 76,4% de los consumos totales del año 2002.

El porcentaje de estos consumos sobre la demanda del sector servicios es del orden del 70% aproximadamente; el 40% del total de los consumos de energía del sector terciario corresponden al uso de energía no eléctrica para usos térmicos; el 9%, al uso de la electricidad para usos térmicos y el 21%, al aire acondicionado. El 30% restante de la demanda energética del sector terciario corresponde a usos específicos de la electricidad (iluminación y equipos –motores en ascensores, equipos de refrigeración, en un 25%) y alumbrado público (aproximadamente, el 5% del total de los consumos energéticos del sector terciario).

La demanda energética de los hogares españoles se está incrementando por encima de la de otros sectores consumidores: mientras que la tasa interanual de crecimiento de los consumos residenciales desde el año 2000 se eleva al 8,6%, la relativa al crecimiento de los consumos industriales asciende al 3,6%, la de los consumos asociados al transporte al 4% y la de los consumos del sector terciario al 9,0%.

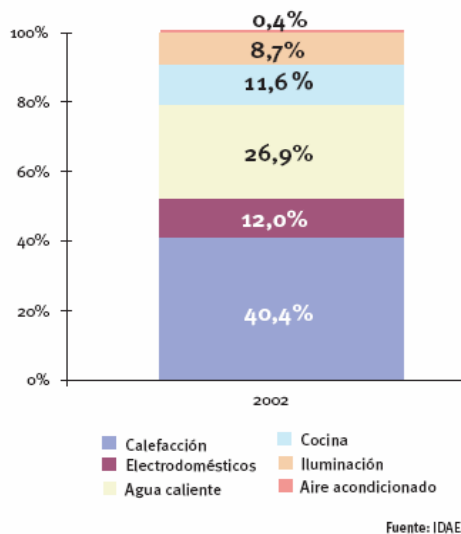


Figura 1.2 Distribución del consumo de energía de los hogares en vivienda (2002)

Los consumos de energía por hogar han aumentado un 11,2%, en media anual, desde el año 2000, especialmente como resultado del espectacular crecimiento del indicador en el año 2002: del 17,8%.

Dentro del sector *Edificación*, se incluyen los consumos de las instalaciones fijas de los edificios de uso residencial y terciario. Los consumos de energía final de este último sector (sector terciario o de servicios) representan alrededor del 8% del total de los consumos finales en España. El sector al que se denomina *Usos Diversos* absorbe más de una cuarta parte del total de la energía final consumida, correspondiendo a los usos residenciales el mayor porcentaje de consumo, frente al sector terciario, la agricultura y pesca.

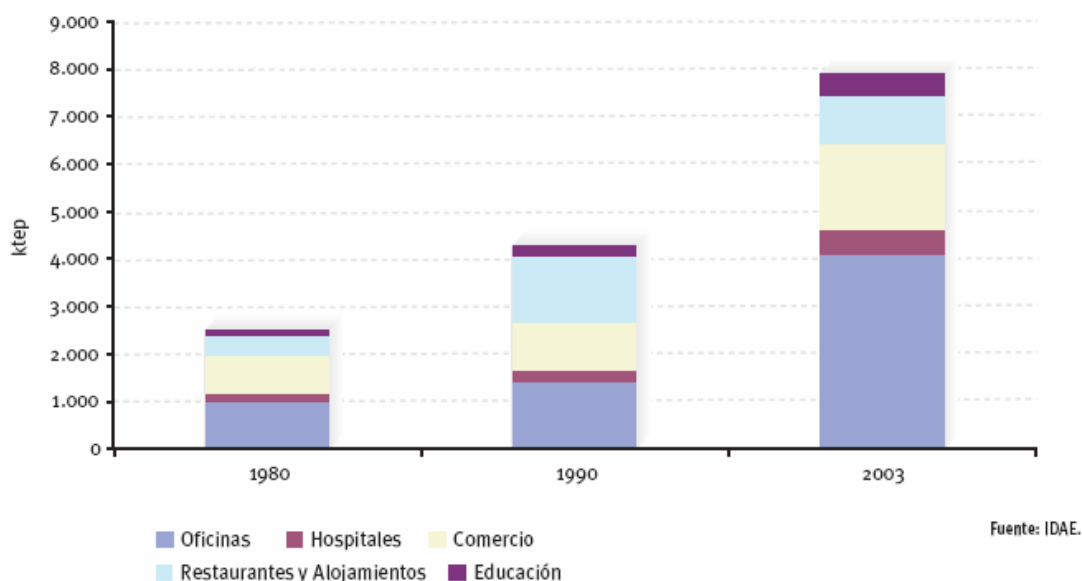
Analizando el estado actual de España y las tendencias al incremento de las demandas, con la implantación de instalaciones de producción de agua caliente mediante sistemas solares térmicos para la producción de agua caliente, dentro del sector vivienda y el sector restaurante y alojamientos, constituyen un descenso importante de la dependencia de fuentes convencionales para producir la energía demandada.

1.3. SITUACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

España asumió en su momento el objetivo fijado por la Unión Europea de que los recursos renovables alcanzasen como mínimo un 12 % del total de la demanda energética en el año 2010. Este compromiso político fue incluido en la Ley 54/1997, de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico y confirmado en posteriores planificaciones, en particular en el propio Plan de Fomento de las Energías Renovables en España (PFER

2000-2010), en la Planificación de los Sectores de Electricidad y Gas 2002-2011 y en la reciente Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 (E4).

Las perspectivas del mercado de captadores solares térmicos en nuestro país son excelentes. El Plan de Fomento de las Energía Renovables cifra como objetivo para el 2010 la instalación de 4.500.000 m² de captadores solares adicionales, lo cual representa un volumen de negocio superior a los 1.800 millones de euros en 10 años.



Nota: Las estadísticas sobre consumo de energía final proceden del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio; excluidos consumos no energéticos.

Figura 1.3 Consumo del sector servicio por sectores (1980 – 2003)

La situación que muestra España en cuanto a aprovechamiento de la Energía Solar térmica es bastante baja (a finales de 2003 la superficie instalada era de 342.400 m² según el IDAE). Si comparamos con países como Alemania o Grecia, que están a la cabeza, nuestro país se sitúa en el 7º puesto. Se observa sin embargo un crecimiento bastante acusado; del año 2001 al 2004 se ha incrementado en un 177%.

Los principales mecanismos que explican este despertar solar están ligados tanto al crecimiento del interés social por la protección del medio ambiente, como a una actitud mucho más activa por parte de las Administraciones (Ayuntamientos, Comunidades Autónomas y Administración Central), que han abierto líneas de subvenciones mucho más generosas y que están introduciendo elementos y obligatoriedad solar dentro de las regulaciones de su competencia.

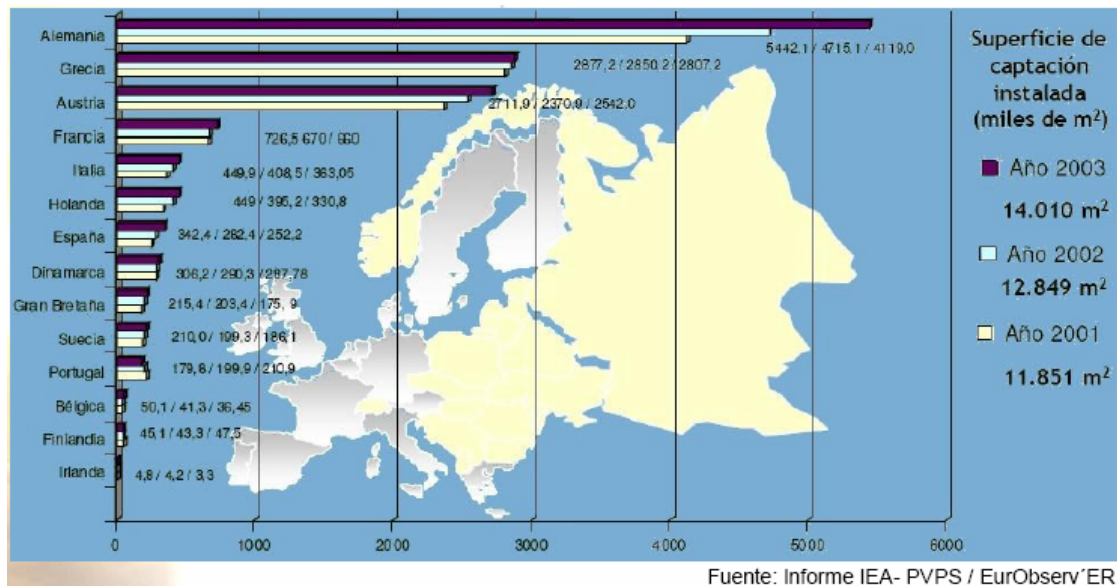


Figura 1.4 Superficie instalada de captadores en Europa

Las ordenanzas solares muestran una preocupación especial por garantizar la calidad de las instalaciones solares y su correcto mantenimiento, se promueve la eficiencia energética de los captadores solares y se muestra especial interés en que la Integración Arquitectónica de la instalación sea adecuada. Con las ordenanzas solares, los usos afectados son prácticamente todos los edificios de nueva construcción o aquellos a los que se les somete a una reforma sustancial; las únicas excepciones van ligadas a la imposibilidad física de aprovechar el sol o a elementos de protección del patrimonio Histórico Artístico.

En cuanto a la situación dentro de España de Andalucía, a finales del 2004 tenía instalados 213.239 m² de captadores solares térmicos, constituyendo la primera Comunidad Autónoma que más superficie tiene instalada. Esto supone el 30,44% de toda la superficie instalada en todo el Estado.

Si bien estamos todavía bastante lejos de alcanzar los objetivos fijados por la Unión Europea en la Directiva 2001/77/CE que marca que para el año 2010, las energías renovables deberían suponer el 12% de toda la energía consumida en España.

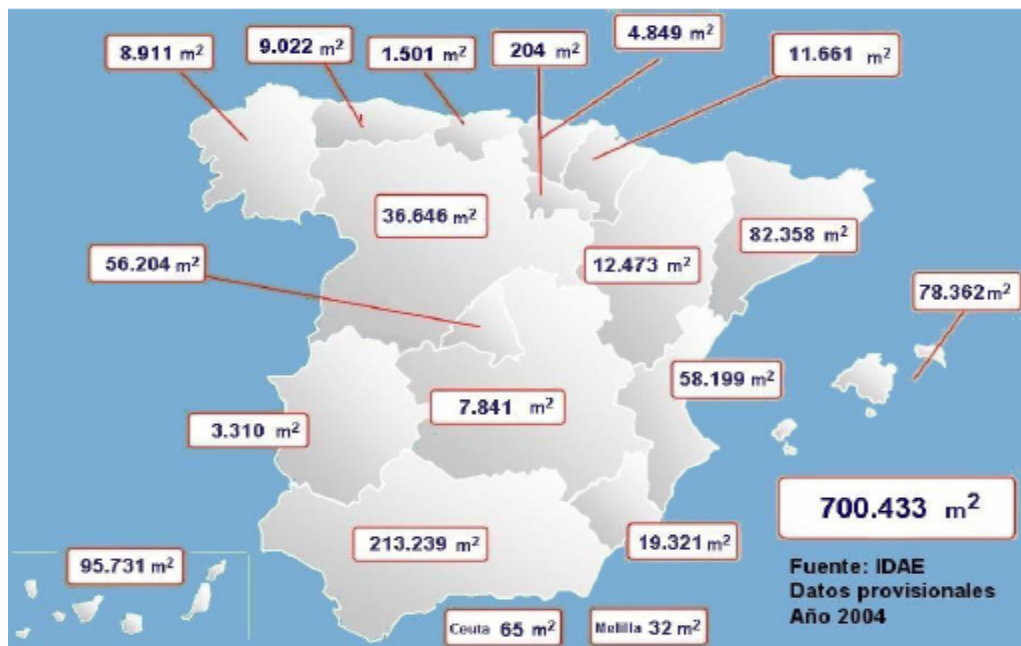


Figura 1.5 Superficie de captadores instalados en España por Comunidades Autónomas

1.4. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS SOLARES

Los sistemas solares se pueden clasificar en dos grupos:

Sistemas solares Activos: Son aquellos sistemas solares térmicos, que utilizan la radiación solar para calentar un fluido (agua, aceite o mezcla de agua y anticongelante), que se conduce al punto de consumo mediante un sistema de transporte que generalmente consume energía.

Sistemas solares Pasivos. Son aquellos sistemas solares térmicos, en los cuales se utiliza la energía proveniente del Sol y un adecuado diseño del edificio. Son capaces de limitar al máximo las necesidades energéticas del edificio, en las diferentes épocas del año, mediante el aprovechamiento racional de la energía solar en época de invierno y el aislamiento y la evacuación del calor en época de verano.

Dentro de una primera clasificación de este tipo de sistemas solares térmicos activos, se pueden clasificar en función del nivel de temperaturas de funcionamiento:

Alta temperatura: Estamos hablando de centrales termosolares, con temperaturas superiores a los 300°C.



Media temperatura: En este tipo de sistemas, el rango de temperatura máximo que podemos encontrarnos, está entorno a los 250 °C y los 300°C. Están asociados a procesos industriales.

Baja temperatura: El rango de temperatura de funcionamiento, se encuentra por debajo de los 100°C. Este tipo de instalaciones se localizan en edificios de viviendas y del sector terciario, como hoteles y oficinas.

Las instalaciones solares térmicas de baja temperatura, se usan principalmente para calentar agua u otros fluidos mediante captadores solares planos.

1.5. APLICACIONES DE LOS SISTEMAS SOLARES ACTIVOS

Las aplicaciones de energía solar tienen que estar guiadas por los siguientes principios:

El sistema solar debe ser un elemento más de las instalaciones térmicas de los edificios y, en ese sentido, debe trabajar en sintonía con el resto de los equipos de confort térmico, buscando soluciones globales de ahorro energético y protección del medio ambiente.

El sistema solar debe integrarse armónicamente con las soluciones arquitectónicas adoptadas en el edificio.

Un correcto mantenimiento es básico para garantizar que el sistema solar funcione adecuadamente durante muchos años ahorrando el consumo de combustibles fósiles y evitando sus emisiones contaminantes.

Las aplicaciones más comunes de los sistemas solares térmicos son las siguientes:

Producción de agua caliente sanitaria (A.C.S.). Se trata de calentar el agua que utilizamos para el uso doméstico: ducharnos o bañarnos, grifos de fregaderos, etc. Se consiguen aportes de entre un 70% y el 100% de la energía necesaria.

Climatización de piscinas. La energía solar también es útil para la climatización del agua de las piscinas para poder utilizarlas fuera del periodo estival. Ya sea para piscinas cubiertas como para descubiertas, la energía solar suele ser la forma más rentable de climatizarlas.

Calefacción. Se puede utilizar el agua calentada para que circule por el sistema de calefacción durante el invierno. Aunque las horas de sol son menos en invierno, la energía solar supone entre un 30 % y un 50% de la energía requerida para el sistema de calefacción. Dentro del uso de sistema solares térmicos activos para la calefacción, son más rentables aquellos sistemas que necesitan menor temperatura y tengan menor consumo. Para calefacción podemos distinguir los siguientes tipos:

- Radiador: La temperatura necesaria está entorno a los 90°C.
- Convectores: Funcionan con temperaturas entorno a los 70°C



- Fan coils: El rango de temperatura está entorno a los 50°C
- Calefacción por suelo radiante: El rango de trabajo está entre los 30 – 35°C.

Refrigeración. Utilizando sistemas de absorción o adsorción

Agua caliente para usos industriales. En la actualidad, la gran mayoría de las empresas utilizan calderas con combustibles fósiles para producir agua caliente o vapor. Los sistemas solares térmicos, se utilizan para precalentar el agua a la entrada de éstas, cuando no se factible utilizar un economizador, o para sustituir a éstas en las horas donde la producción de agua caliente alcance las condiciones de trabajo necesarias para el proceso productivo.

De todos ellos el más extendido es el de producción de A.C.S.

1.6. ARGUMENTOS A FAVOR DE LAS INSTALACIONES SOLARES TÉRMICAS

Dado que las instalaciones solares suministran energía sin emisión alguna de gases que provocan efecto invernadero, sus propietarios contribuyen activamente a la prevención del cambio climático.

Las instalaciones solares, con una vida útil media de 20 años, son una prueba de una tecnología de confianza y de alto nivel.

Los propietarios de las instalaciones solares evitan costes adicionales por el aumento de los precios de la energía y las ecotasas; de esta manera logran alcanzar cierta independencia económica.

El factor económico principal surge de la apreciable inversión inicial en la instalación solar. Sin embargo, los costes se pueden calcular con exactitud y con muchos años de antelación. En cambio, los costes del combustible para las instalaciones de calentamiento convencional varían considerablemente y no se pueden calcular con un período considerablemente y no se pueden calcular con un período de antelación de 20 años. Por consiguiente, una instalación solar representa una inversión segura.

Las instalaciones solares requieren un mantenimiento mínimo y consumen una pequeña cantidad de energía eléctrica auxiliar.

Los propietarios de las instalaciones solares se benefician a menudo de las ventajas relativas a los impuestos y de las subvenciones gubernamentales.

Las instalaciones solares mejoran la imagen de una edificación.

En los edificios con instalaciones solares para uso de calefacción, no se evitan los costes de ésta.



Las instalaciones solares utilizan una fuente de energía prácticamente inagotable. Su utilización contribuye a la conservación de los recursos de energía convencional y garantiza al país una mayor independencia, tanto económica como política.

La adquisición y aplicación de las instalaciones solares asegura y fomenta conocimientos y experiencias sobre esta moderna tecnología en el país donde se utilizan, estableciendo una base sólida para el desarrollo económico positivo y abriendo nuevos mercados tanto a nivel nacional como internacional.

Gracias a la continua expansión de la energía solar térmica, se han creado puestos de trabajo adicional en la industria y en muchos oficios auxiliares.

1.7. OBJETIVOS DEL PROYECTO

Dada la importancia que tiene la implantación de los sistemas solares térmicos en Andalucía, por su potencial energético y por sus beneficios ambientales, en este proyecto se va a realizar un estudio de diferentes configuraciones.

En un primer lugar, para cada una de las instalaciones descritas en capítulo 2, se simula en cada una de las capitales de provincia de Andalucía el comportamiento de la instalación solar. Los rangos de áreas de captadores y volúmenes de acumulación van a estar definidos por las especificaciones del programa PROSOL. Este plan, nos facilita unas inecuaciones donde se relaciona al área de captación y el volumen de acumulación en función de la demanda que se disponga. Para cada caso se toman los puntos medios de estas inecuaciones, obteniendo unas relaciones entre las áreas y los volúmenes de acumulación con la demanda de cada instalación. Con estos ratios, se obtendrá la evolución de la fracción solar y del rendimiento del captador para cada una de las provincias en función de los tres tipos de instalaciones. Con ello podemos comparar el funcionamiento de cada instalación en cada una de las provincias. Las simulaciones se realizan para un perfil horario fijo.

En segundo lugar, los métodos tradicionales de cálculo, para el cálculo de la demanda toman una estimación del consumo medio diario, sin tener en cuenta la distribución del consumo a lo largo del día. Mediante el uso del programa TRANSOL, se puede introducir el porcentaje del consumo total diario en función del régimen horario y del día de la semana en el cual nos encontremos. Tomando una provincia de referencia, en este caso Sevilla, se variará el perfil horario de un tipo de configuración, en este caso será el correspondiente a una instalación multifamiliar descentralizada.

En tercer lugar, tomando de nuevo la provincia de Sevilla como referencia, se analizará la evolución de la fracción solar y del rendimiento del captador, en función de la variación del área de captación. Para ello, se tomarán los valores del área de tal manera que abarquen todos los valores posibles que impone las especificaciones de PROSOL.



En cuarto lugar, para las áreas de las instalaciones anteriores, se comparan los resultados obtenidos con los obtenidos mediante el método tradicional del F-chart, y así ver la diferencia existente entre ambos métodos de cálculo.

En último lugar, dentro del RITE, se especifica el espesor mínimo que deben tener los acumuladores. El programa TRANSOL, nos da la posibilidad de realizar simulaciones, teniendo en cuenta los espesores de aislamiento. Para ello, se verá como varía la fracción solar y el rendimiento del captador, desde el espesor mínimo marcado por el RITE hasta llegar al doble de éste.

1.8. RESUMEN

En el capítulo segundo, se realiza una descripción general de las instalaciones de A.C.S., donde se indicará los subsistemas que engloba y cada uno de los componentes que éstas constan. A continuación se verán las configuraciones que instalaciones solares. Por último en este capítulo, resaltarán los parámetros necesarios para definir una instalación.

En el capítulo tercero, se explicarán los distintos métodos existentes para el cálculo de las instalaciones, distinguiendo entre los métodos clásicos y los métodos basados en las simulaciones. Se explicará el funcionamiento del programa TRANSOL, utilizado en este proyecto.

En el capítulo cuarto, se estudian detalladamente las instalaciones que se van a simular, especificándose los parámetros de los equipos que las componen, características de las localidades y disposición de los captadores.

En el capítulo quinto, se expondrán los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas como objetivos de este proyecto, que se han descrito en el apartado anterior.

Por último, ha de señalarse que la realización de este proyecto tiene fines académicos, como es la de servir de Proyecto Fin de Carrera de la titulación de Ingeniero Industrial.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES DE A.C.S.

2.1. INTRODUCCIÓN

La producción de A.C.S. en edificios de viviendas y en el sector terciario, mediante la utilización de energía solar puede realizarse siguiendo múltiples esquemas de principio. No obstante, en todos ellos pueden identificarse las siguientes partes esenciales, tal como indica la Figura 2.1 Esquema de funcionamiento

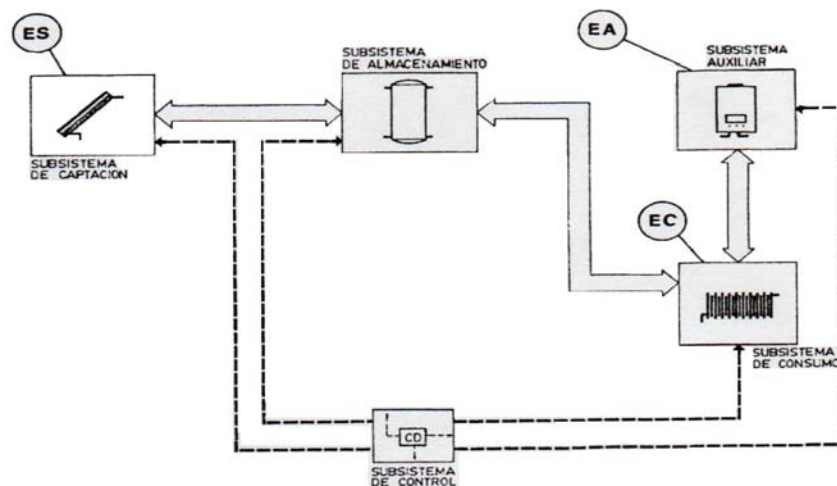


Figura 2.1 Esquema de funcionamiento

Subsistema de captación. Está compuesto de captadores solares. Éstos reciben la energía del Sol y la transmite al fluido caloportador que lo transporta hasta los elementos de intercambio o de acumulación, dependiendo de la instalación.

Subsistema de acumulación. Debido a la existencia de un desfase horario entre la producción de A.C.S. y el consumo, es necesario un dispositivo encargado de acumular la energía captada. Se suele realizar en depósitos horizontales o verticales, siendo preferentemente usados éstos últimos porque favorecen la estratificación del agua.

Subsistema auxiliar. Debido a que la energía solar no puede cubrir el 100% de la demanda de los consumidores, es necesario un sistema que sea capaz de absorber esa carencia de energía. Los sistemas auxiliares, pueden ser mediante una caldera de gas, por salto de temperatura o mediante un sistema eléctrico.

Subsistema de control. Compuesto por todos los elementos de control y regulación, tales como termostatos, presostatos, etc. Está encargado de controlar el sistema.

Subsistema de consumo. Concebimos este subsistema como las unidades terminales de consumo.

2.2. COMPONENTES DE UNA INSTALACIÓN SOLAR

Independientemente de la configuración elegida para cada edificio, todas las instalaciones se caracterizan por estar compuestas por los siguientes elementos:

Captador solar
Intercambiador de calor
Depósito de acumulación
Circuito hidráulico
Elementos de control y seguridad

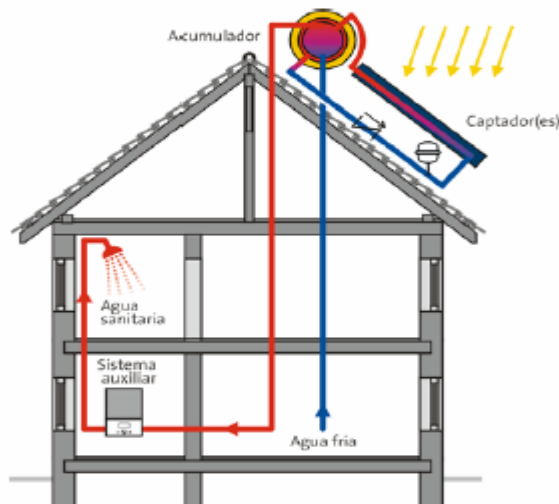


Figura 2.2 Elementos de una instalación solar

2.2.1. Captadores Solares

El captador representa la fuerza motriz de la instalación. Un captador tiene como objetivo transformar la radiación solar incidente en energía térmica mediante el aumento de temperatura del fluido que circula a través del mismo, transfiriéndose el calor generado a través del circuito primario que en la mayoría de los casos se almacena en un acumulador. Según se vaya necesitando, la energía pasa desde el acumulador al circuito de consumo.



Todos los diseños tienen el objetivo común de convertir con el mayor rendimiento posible la radiación solar en calor, para después suministrar eficientemente éste al consumo. Los diseños de los captadores varían considerablemente en cuanto a calidad, rendimiento, construcción y coste.

Las características generales que debe reunir un captador solar térmico son:

Resistente a las condiciones exteriores (ambientes marinos, polvo nieve, granizo, etc.)
Resistencia a temperaturas altas y bajas
Estable y duradero
Fácil de montar
Eficiente conversión de energía

Estas características son las que se exigen en las normativas vigentes y las correspondientes certificaciones exigidas en los programas de fomento.

Un captador solar térmico, está formado por los siguientes elementos:

Placa absorbedora. Es la parte del dispositivo donde se produce la conversión de la radiación en energía interna del fluido en el interior de la placa absorbedora. Normalmente construida de metal cubierta de pintura o tratamiento negro que tenga una alta absorptividad a la radiación solar. Mejor aún si tiene, al mismo tiempo, una baja emisividad en longitudes de onda larga. En este último caso es lo que se llama una superficie selectiva.

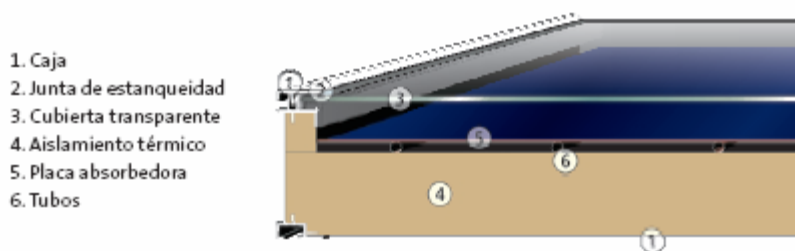


Figura 2.3 Elementos de un captador solar plano

Cubierta transparente. Es otro elemento de importancia en un captador solar térmico. Se encarga de producir el efecto invernadero sobre la placa absorbedora, dejando pasar en su mayor parte (alta transmitancia) la radiación solar incidente e impidiendo la salida (baja transmitancia) de la radiación infrarroja producida en la placa absorbedora.

Aislamiento térmico. Sirve para disminuir las pérdidas térmicas por la cara posterior y los laterales del captador.



Carcasa. Es la caja que contiene a todos los elementos del captador y sirve para protegerlo del exterior. Existe una gran variedad de tipos y materiales.

Junta de la cubierta transparente. Es un material elástico cuya función principal es mantener la estanqueidad del captador impidiendo la entrada de agua cuando hay lluvia.

2.2.1.1. Tipos de captadores

En el pasado, para fabricar captadores, a veces se solían pintar en negro radiadores comunes de placa plana, los cuales se protegían con una cubierta transparente y se instalaban en el tejado. Actualmente, los captadores llevan una o varias protecciones transparentes de vidrio, llevan un aislamiento posterior para disminuir pérdidas y están montados en un marco de aluminio, que disminuye su peso.

Captador plano estándar

Es el tipo de captador más extendido en el mercado de A.C.S. de España, entorno al 95%. Cabe mencionar las siguientes ventajas.

Estructura robusta y sencilla

Suficientemente contrastado desde un punto de vista técnico

Relación favorable entre el precio y el rendimiento

Atractivo desde un punto de vista estético, debido a las superficies planas



Figura 2.4 Captador solar plano



Los captadores se diferencian por su forma, el recubrimiento de los absorbentes, el diseño hidráulico interno, el valor de pérdida de carga, la forma de las conexiones, el espesor y calidad del aislamiento, la carcasa, la cubierta transparente, etc.

Captadores de tubos de vacío

Este tipo de captador está diseñado para reducir las pérdidas térmicas por conducción y convección entre el absorbente y la cubierta de vidrio, eliminando en los tubos de vacío el aire. El grado de vacío desempeña un papel fundamental para la disminución de las pérdidas térmicas. Este tipo de captadores de tubos de vacío, son capaces de alcanzar temperaturas considerablemente superiores a las de los captadores planos. Se debe tener en cuenta que las conexiones y el aislamiento que lleven instalados debe ser capaz de soportar temperaturas entorno a los 160°C.

Las ventajas que presentan los tubos de vacío son:

Pueden alcanzar temperaturas de trabajo superiores a las de los captadores planos. De este modo pueden suministrar calor para procesos industriales y para climatización solar con mayores rendimientos

Pérdidas térmicas reducidas en comparación con los captadores planos, debido a un mejor aislamiento térmico.



Figura 2.5 Captadores de tubo de vacío

Los inconvenientes que presenta son los siguientes:

Temperaturas de estancamiento elevadas y altas cargas térmicas de todos los materiales cercanos al campo de captadores, así como del fluido de trabajo. En caso de estancamiento, la revaporización es mayor que con captadores planos.



Costes superiores de la energía solar útil obtenida a un nivel de temperaturas de trabajo medio, debido a que el mayor rendimiento se presenta únicamente a temperaturas de trabajo superiores.

Existen diferentes tipos de captadores de tubos de vacío:

Tubos de vacío de flujo directo. El fluido fluye directamente a través del absorbedor dentro de los tubos de vacío. Debido a la transferencia directa se logra un rendimiento elevado. Tiene la posibilidad de girar para poder conseguir una mejor alineación con respecto al Sol. Su montaje puede realizarse sobre cubiertas planas, consiguiendo una mayor integración arquitectónica.

Tubos de vacío del tipo tubo de calor (“heatpipe”). El absorbedor metálico está conectado a un tubo de calor, el cual contiene una cantidad muy pequeña de agua u otro fluido. Este fluido se evapora en un vacío parcial, sube en forma de vapor, se condensa en el condensador y regresa en forma líquida al interior del tubo. En el condensador el calor se transfiere al fluido de trabajo del circuito primario. Este tipo sistema requiere una inclinación mínima del captador.

Tubos de vacío tipo “Sydney” y captadores tipo CPC. El tubo de vacío tipo “Sydney” fue concebido como un tubo de vidrio de doble pared, cuyo fin es evitar posibles pérdidas de vacío a través de la conexión entre el metal y el vidrio que se produce en otros diseños de tubos de vacío. La superficie absorbidora se halla directamente sobre el tubo interior de vidrio. Es necesario un reflector para aprovechar el área de aquél que no se alcanza por el Sol.

Estos reflectores se utilizan al mismo tiempo como concentradores, y la unidad completa del captador se comercializa bajo el nombre CPC (Captador de concentración cilindro – parabólico compuesto). La eficacia de los reflectores situados fuera del tubo de vidrio puede disminuir con el tiempo debido a la influencia de la intemperie. Tienen un bajo precio, con lo cual se han establecido en el mercado en pequeñas instalaciones, a pesar del rendimiento inferior comparado con otros tipos de tubos de vacío.

2.2.1.2. Definiciones de las áreas de un captador

Con el objetivo de calcular la energía solar útil específica (kWh/m^2) del captador, se debe definir cuales son las áreas de referencia expuestas a la radiación. Se diferencia los siguientes términos relativos a la superficie del mismo:

Área total, A_G : Es el área máxima proyectada por el captador completo, excluyendo cualquier medio de soporte y acoplamiento de los tubos.

Área de apretura, A_a : Área proyectada máxima a través de la cual penetra la radiación solar sin concentrar en el captador. Por lo general, coincide con el área de la cubierta transparente visible.



Área del absorbedor, A_A : Área máxima de la proyección del absorbedor. No incluye ninguna parte del absorbedor que no es alcanzada por la radiación solar cuando su dirección es perpendicular al plano de proyección que define el área del absorbedor. También denominada área útil del captador.

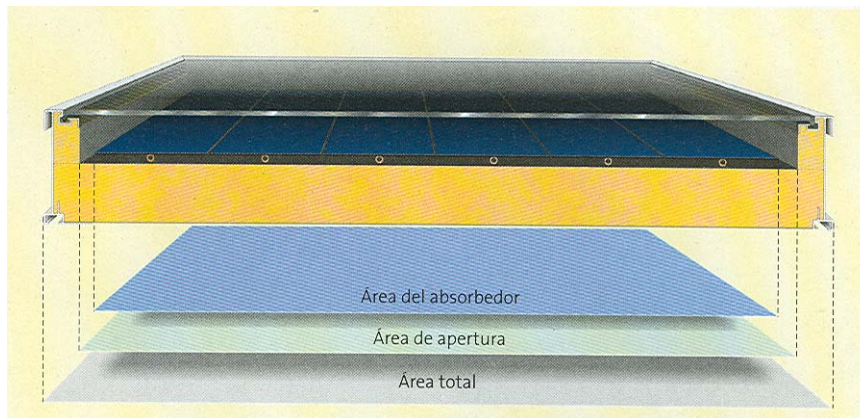


Figura 2.6 Áreas de un captador plano

2.2.1.3. Ecuaciones Características

Las ecuaciones que definen un captador solar, son la energía captada por éste. La energía captada por el captador es la energía incidente sobre éste menos las pérdidas que se tengan sobre él. Con esta ecuación evaluamos la energía útil capaz de captar este dispositivo.

$$\text{Energía_Captada} = Q_u = \text{Energía_Incidente} - \text{Pérdidas} \quad (2-1)$$

donde:

$$\text{Energía_Incidente} = Q_{\text{incidente}} = I(\tau\alpha)A \quad (2-2)$$

$$\text{Pérdidas} = Q_{\text{pérdidas}} = U_L A (\bar{T}_p - T_a) \quad (2-3)$$

siendo,

I = Radiación incidente

A = Área del captador

τ = Transmisividad de la cubierta

α = Absortividad del absorbedor

U_L = Coeficiente global de pérdidas

T_a = Temperatura ambiente



T_p = Temperatura media de la placa

La energía captada por el captador se puede definir de la siguiente forma:

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_S - T_E) \quad (2-4)$$

donde:

$\dot{m}$: Caudal de fluido que circula por el captador

C_p : Calor específico del fluido caloportador

T_S : Temperatura de salida del fluido

T_E : Temperatura de entrada al captador

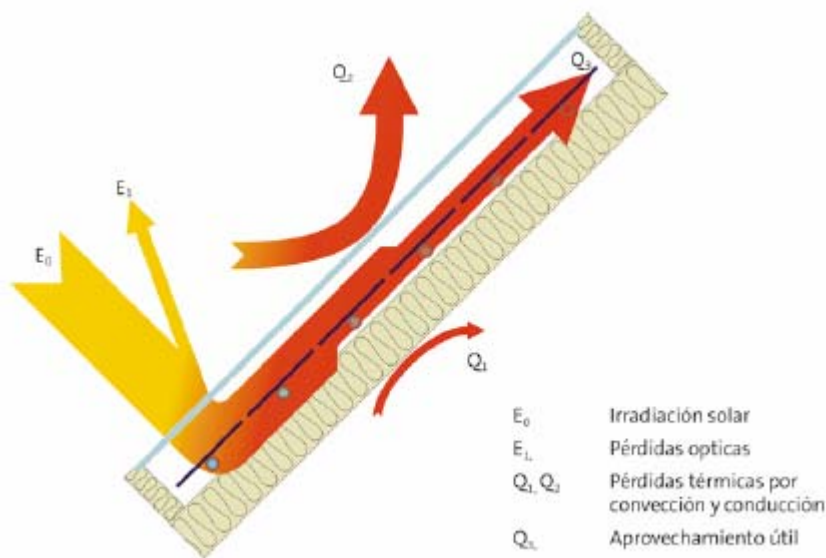


Figura 2.7 Fundamento de la captación solar térmica

Debido a la dificultad de calcular la temperatura media de la placa, se utiliza el concepto del factor de evacuación del calor o eficacia del captador. Este coeficiente se obtiene al dividir la energía captada por el captador en las condiciones reales por la energía captada por el captador si todo el colector se encuentra a la temperatura de entrada del fluido caloportador. Se define de la siguiente forma:

$$F_R = \frac{Q_u}{I(\tau\alpha)A - U_L A(T_e - T_a)} \quad (2-5)$$

Quedando la ecuación de la energía captada del captador:



$$Q_u = I \cdot F_R \cdot (\tau \alpha) \cdot A - F_R \cdot U_L \cdot A \cdot (T_e - T_a) \quad (2-6)$$

El valor del factor de evacuación del calor es menor de la unidad, debido a que la energía captada por el captador si todo el captador se encuentra a la temperatura de entrada es mayor que la energía real captada.

2.2.1.4. Rendimiento de un captador

El rendimiento de un captador solar térmico se define como el cociente entre la energía térmica útil extraída por el fluido de trabajo y la irradiación solar incidente sobre éste.

$$\eta = \frac{\text{Energía captada}}{\text{Energía incidente}} = \frac{Q_u}{I \cdot A} \quad (2-7)$$

donde:

Q_u = Potencia térmica útil generada (W)
 I = Irradiancia incidente sobre el captador (W/m²)
 A = Área de referencia del captador (m²)

El valor de la energía captada, depende de las pérdidas ópticas y térmicas del captador. La potencia térmica útil generada se calcula a partir de la irradiancia disponible sobre el absorbedor, restándole las pérdidas térmicas por conducción, convección y radiación.

$$Q_u = A \cdot I_{abs} - Q_t \quad (2-8)$$

donde:

A = Área de referencia del captador
 I_{abs} = Irradiancia disponible en el absorbedor (W/m²)
 Q_t = Pérdidas térmicas (W)

La irradiancia disponible en el absorbedor se obtiene mediante la expresión:

$$I_{abs} = I \cdot \tau \cdot \alpha \quad (2-9)$$

donde:

I = Irradiancia incidente sobre el captador
 τ = Transmisividad de la cubierta
 α = Absortividad del absorbedor

Las pérdidas térmicas dependen de la diferencia de temperaturas entre el absorbedor y el ambiente ($\Delta T = T_{abs} - T_{amb}$). Cuando las temperaturas en el absorbedor son bajas esta



relación es prácticamente es lineal y se expresa a partir del coeficiente lineal de pérdidas térmicas k_1 ($\text{W/m}^2 \text{ K}$).

$$Q_t = k_1 \cdot \Delta T \cdot A \quad (2-10)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación:

$$\eta = \frac{(I \cdot \tau \cdot \alpha \cdot A) - k_1 \cdot \Delta T \cdot A}{I \cdot A} \quad (2-11)$$

$$\eta = \eta_0 - \left(\frac{k_1 \cdot \Delta T}{I} \right) \quad (2-12)$$

Al aumentar la temperatura en el absorbedor aumenta el error cometido utilizando para el cálculo de las pérdidas térmicas una expresión lineal. Para temperaturas altas en el absorbedor, al aumentar las pérdidas térmicas por radiación, se utiliza una expresión cuadrática para calcular las pérdidas térmicas globales. En este caso la expresión de la curva de rendimiento del captador sería:

$$\eta = \eta_0 - \left(\frac{k_1 \cdot \Delta T}{I} \right) - \left(\frac{k_2 \cdot \Delta T^2}{I} \right) \quad (2-13)$$

donde:

K_1 = Coeficiente lineal de pérdidas térmicas ($\text{W/m}^2 \text{ K}$)

K_2 = Coeficiente cuadrático de pérdidas térmicas ($\text{W/m}^2 \text{ K}^2$)

Haciendo $k = k_1 + k_2 \cdot \Delta T$, la expresión del rendimiento del captador queda:

$$\eta = \eta_0 - \left(\frac{k \cdot \Delta T}{I} \right) \quad (2-14)$$

donde

K = Coeficiente global de pérdidas térmicas ($\text{W/ (m}^2 \cdot \text{K)}$)

η_0 = Factor óptico

2.2.1.5.Capacidad térmica

La capacidad térmica, C , del captador es una medida de inercia térmica, de la rapidez de respuesta del captador durante el calentamiento y el enfriamiento.



2.2.1.6. Temperatura de estancamiento

Es la temperatura máxima que se obtiene en el captador, cuando se alcanza el equilibrio entre la energía incidente y las pérdidas térmicas, al estar expuesto el captador a una irradiación constante de 1.000 W/m^2 y a una temperatura ambiente de 30°C , sin que circule fluido por éste.

2.2.2. Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor sirven para transferir la energía térmica entre diferentes fluidos, que se mantiene separados entre sí. Se utilizan en instalaciones donde se debe transferir el calor de la mezcla de agua y anticongelante del circuito primario al agua caliente sanitaria o al agua proveniente del acumulador de inercia. Deben cumplir los siguientes requisitos:

Resistentes a los fluidos de trabajo utilizados.

Compatibles con otros materiales presentes en el circuito

Resistentes a las temperaturas mínimas y máximas que se pueden generar en el sistema.

Buenas propiedades de conductividad térmica y de transferencia de calor.

Pequeña diferencia de temperatura a través de las paredes intercambiadores.

Poca pérdida de carga.

Se suelen instalar intercambiadores de acero inoxidable o de cobre.

A su vez, los intercambiadores de calor pueden ser interiores y exteriores. Los intercambiadores interiores, se encuentran dentro del depósito de acumulación en forma de serpentín. Se suelen utilizar para instalaciones pequeñas, hasta unos 10 m^2 de captadores. Los intercambiadores exteriores son usados para instalaciones mayores, donde la superficie de captación es superior a 10 m^2 . Los hay de dos tipos:

Intercambiador tubular. Tiene poca pérdida de carga pero tiene baja potencia específica de transmisión. Se suelen emplear en piscinas (Figura 2.8).

Intercambiador de placas. Tienen una alta potencia específica de transmisión, un coste bajo y son de pequeño tamaño. Tienen una elevada pérdida de carga, teniendo posibilidades de ensuciamiento, que hace disminuir su efectividad (Figura 2.9).

2.2.3. Acumuladores de Agua

Los acumuladores se encargan de almacenar la energía térmica generada por los captadores. Cumplen la función de volante de inercia, que permite independizar el suministro de calor solar del consumo, puesto que el perfil temporal de la entrada de energía no suele corresponderse con el consumo energético. El periodo de tiempo de

acumulación varía entre unas pocas horas, días o en caso de acumulador estacional, hasta meses. Depende de la aplicación y de la fracción solar deseada.

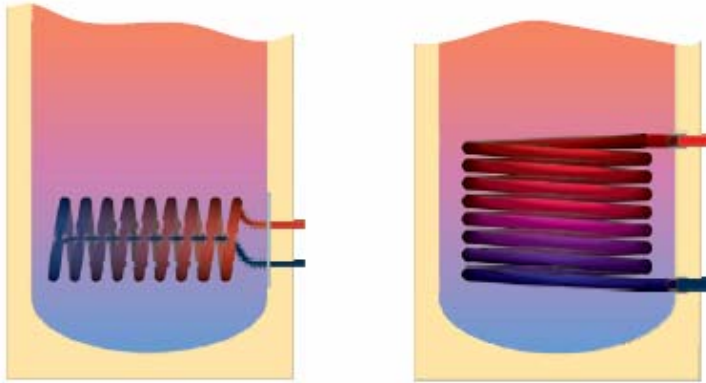


Figura 2.8 Intercambiador tubular

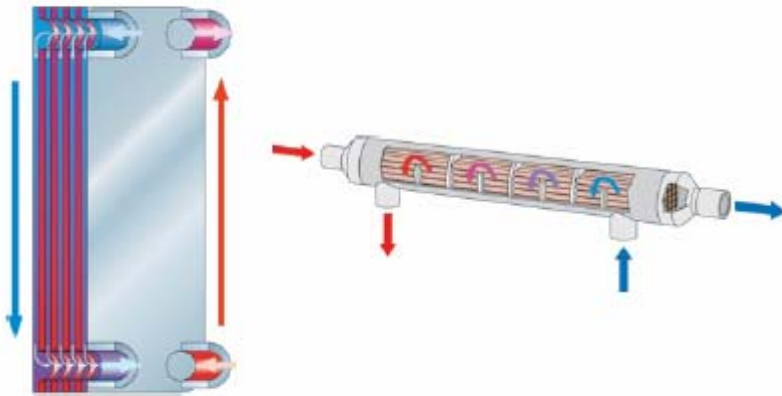


Figura 2.9 Intercambiador de calor externo

El objetivo que se persigue es acumular la energía solar disponible de la mejor forma durante períodos de escasa demanda, para después poder suministrar esa energía de la manera más eficaz cuando se necesite.

Los requisitos que se exigen de un acumulador son los siguientes:

- Alto calor específico del medio de acumulación
- Pérdidas térmicas bajas
- Buena estratificación de temperaturas en el acumulador
- Larga durabilidad
- Bajo costes y fácil disponibilidad del medio de acumulación

Adecuadas propiedades medioambientales

Debe ser capaz de soportar las presiones y temperaturas de trabajo previstas.

Debido a su alto calor específico, no ser contaminante para el medio ambiente y a su disponibilidad, se elige por regla general agua normal como medio de acumulación.

2.2.3.1. Tipos de acumuladores

Acumuladores de agua caliente sanitaria.

Los acumuladores de agua caliente sanitaria deben cumplir las normas de higiene exigidas para el almacenamiento de agua potable. El acumulador debe ser resistente a la corrosión, dada la presencia de oxígeno en el agua potable.

Los modelos de acumuladores de agua caliente sanitaria empleados se aprecian en la Figura 2.10. Estos acumuladores pueden ser directos o indirectos.

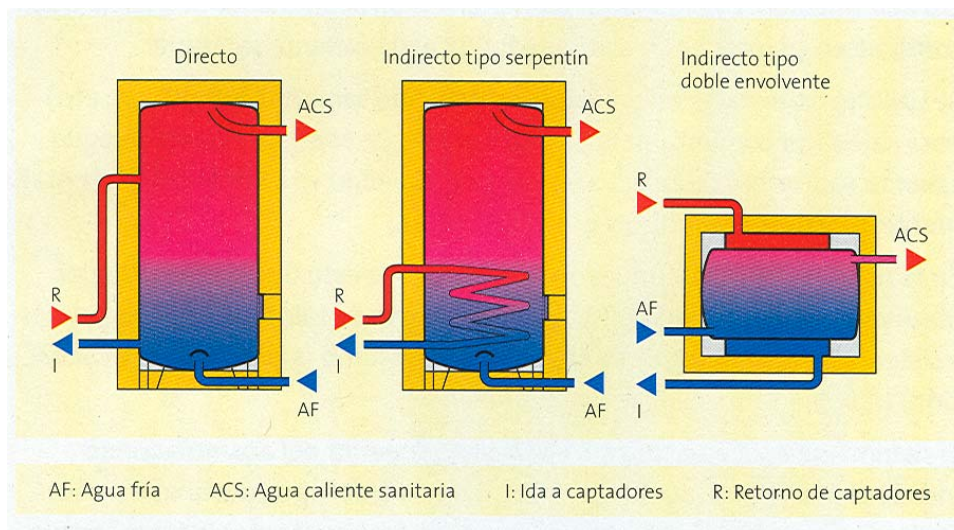


Figura 2.10 Acumuladores solares

Los acumuladores directos disponen de dos bocas de conexión para el circuito solar y de dos bocas adicionales para las tuberías de entrada y salida del circuito de consumo de agua caliente.

Los acumuladores indirectos (también denominados interacumuladores) incluyen un intercambiador, bien en forma de serpentín o de tipo doble envoltente, conectado directamente con el circuito solar de manera que el fluido que circula a través de captadores solares no se mezcla con el agua potable del circuito de consumo.

Las presiones de funcionamiento habituales de ambos tipos de acumuladores suelen estar comprendidos entre cuatro y seis bares.



Acumuladores de inercia

Los acumuladores de inercia se utilizan en grandes sistemas solares destinados al calentamiento de agua sanitaria o al apoyo de la calefacción. Al requerir estos sistemas grandes volúmenes de agua, se suele separar el medio de acumulación del agua sanitaria, por motivos de higiene.

La presión de trabajo suele ser más baja que en los acumuladores de agua caliente sanitaria. Al contener agua no potable se relajan los requisitos exigidos al material del acumulador, resultando el coste de los acumuladores de inercia inferior al de los acumuladores de agua caliente sanitaria.

Acumuladores combinados

Los acumuladores combinados consisten en un acumulador de inercia que contiene en su interior un acumulador de agua caliente sanitaria. Se utilizan en instalaciones solares de reducido tamaño, para satisfacer conjuntamente las demandas de energía térmica de agua caliente sanitaria y de calefacción.

2.2.3.2. Aislamiento térmico del acumulador

Las pérdidas térmicas en un acumulador solar pueden ser significativas si presenta defectos en el aislamiento, llegando a disminuir considerablemente el rendimiento de una instalación solar. Por ello se debe tener en cuenta los siguientes requisitos:

Pequeña relación entre superficie y volumen

Aislamiento estrechamente unido a la superficie exterior del acumulador

Aislamiento completo del acumulador, inclusive en su superficie superior e inferior

Buen aislamiento de todas las conexiones de tuberías, vainas, etc.

La tubería debe llevarse al interior del acumulador desde la parte inferior o el lateral.

Evitar pérdidas térmicas a causa de circulación por convección natural dentro de las tuberías de conexión.

2.2.4. Circuito hidráulico

El circuito hidráulico de una instalación solar está constituido **por** el conjunto de tuberías, bombas, válvulas y accesorios que se encargan de conectar los principales componentes de la instalación solar entre sí.

El circuito primario corresponde al formado por los captadores solares y las tuberías que los unen en el que el fluido de trabajo recoge la energía térmica en los captadores solares y la transfiere al acumulador directamente o a través de un intercambiador de calor.



2.2.4.1.Tuberías

Para la selección del material utilizado en las tuberías se han de considerar los siguientes aspectos:

- Compatibilidad con el tipo de fluido empleado
- Comportamiento dentro de los rangos de presiones
- Temperaturas de trabajos
- Resistencia frente a la corrosión
- Estabilidad respecto a tensiones mecánicas y térmicas
- Facilidad de instalación
- Durabilidad

Las tuberías que contienen agua caliente destinada a consumo humano han de ser de cobre, de acero inoxidable o de material plástica de calidad alimentaria.

En caso de transportar otros fluidos utilizados en las instalaciones solares se emplea normalmente cobre, acero inoxidable o acero negro.

2.2.4.2.Aislamiento

Las tuberías se han de aislar adecuadamente para reducir las pérdidas térmicas a través de las mismas. Entre las propiedades que se han de solicitar al material aislante seleccionado destacan:

- Bajo coeficiente de conductividad térmica
- Adecuado comportamiento dentro del rango de temperaturas de trabajo y frente al fuego
- Buena resistencia al envejecimiento, putrefacción y otros materiales
- Estar constituido por materiales libres de elementos nocivos para el medioambiente
- Facilidad de montaje
- Bajo coste

El material debe ser capaz de soportar temperaturas elevadas, especialmente en el circuito primario. En el caso de instalaciones en el exterior, también debe ser capaz de soportar la radiación ultravioleta, humedad y corrosión por agentes externos.

Los materiales habitualmente empleados son las espumas elastoméricas, las cuales se emplean para el aislamiento de intercambiadores exterior.

2.2.4.3.Bomba de circulación

Una bomba de circulación es el dispositivo electromecánico encargado de hacer circular el fluido de trabajo a través del circuito hidráulico. Es uno de los componentes principales del circuito hidráulico de una instalación solar de circulación forzada.

Los parámetros fundamentales a considerar en el proceso de selección de la bomba a emplear en una instalación son el caudal de circulación y la diferencia de presiones que ha de superar.

2.2.4.4. Vaso de expansión

El vaso de expansión se utiliza para absorber las dilataciones y contracción que experimente el fluido contenido en un circuito cerrado con las variaciones de temperatura. Mediante la utilización de este elemento se evita la pérdida de fluido que tendría lugar al activarse la válvula de seguridad al alcanzarse presiones elevadas en el circuito durante los periodos de alta radiación solar. En este caso sería necesario rellenar el circuito para mantenerlo presurizado, aumentando de esta forma tanto el coste como la probabilidad de creación de bolsas de aire.

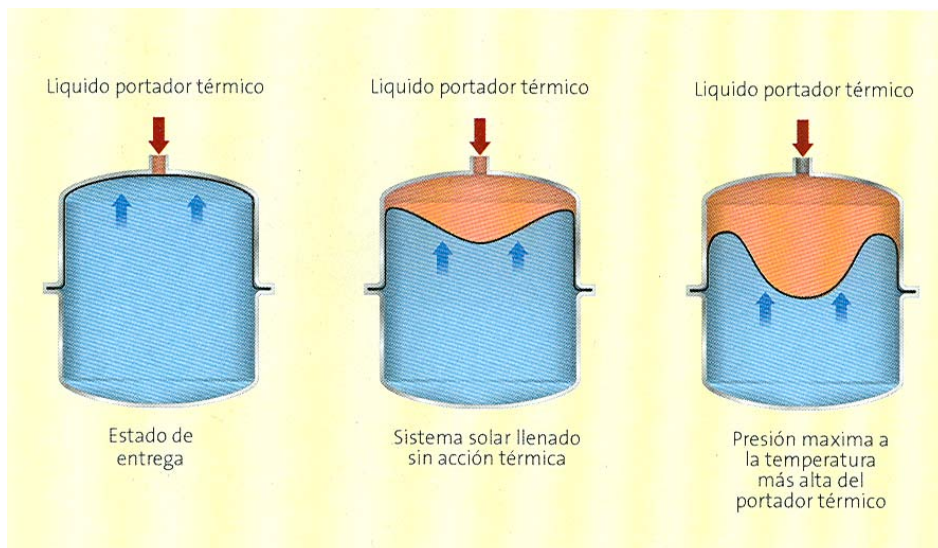


Figura 2.11 Vasos de expansión

Se diferencia entre vasos abiertos y cerrados atendiendo a que el fluido contenido en el circuito esté en comunicación directa con la atmósfera o no. En las instalaciones solares habitualmente se emplean vasos de expansión cerrados que consisten en depósitos metálicos divididos en el interior en dos partes a través de una membrana elástica impermeable. Cada una de las partes contiene un fluido diferente: aire o gas inerte a la presión de trabajo, situado por debajo de la membrana y el fluido de trabajo o líquido caloportador térmico, situado por encima de la membrana, que penetra en el vaso de expansión al aumentar su temperatura y presión.

2.2.4.5. Sistema de purga, llenado y vaciado



Sistema de purga

En una instalación solar es el dispositivo o conjunto de elemento que se encarga de extraer el aire contenido en el circuito solar tanto durante el proceso e llenado como durante el funcionamiento habitual de la instalación.

Los sistemas de purga deben ser resistentes a temperaturas elevadas ya que en los puntos más altos de la instalación pueden llegar a estar expuestos a temperaturas en torno a 150° C. también han de trabajar correctamente con fluidos anticongelantes recomendándose el empleo de componentes metálicos que se comporten adecuadamente y tengan mayor durabilidad. Se recomienda que los purgadores de aire sean los siguientes materiales:

Cuerpo y tapa de fundición de hierro o de latón
Mecanismo de acero inoxidable
Flotador y asiento de acero inoxidable
Obturador de goma sintética

Los sistemas de purga pueden ser manuales o automáticos.

Sistema de llenado

Cualquier circuito de una instalación ha de incorporar un sistema de llenado que permita la entrada del fluido de trabajo y mantener presurizado el circuito en caso de que se produzcan fugas de fluido. El sistema de llenado de una instalación puede ser manual o automático.

Para facilitar la salida al exterior del posible aire acumulado se recomienda realizar el llenado del circuito por la parte inferior del mismo.

Sistema de vaciado

Para facilitar el vaciado total o parcial de una instalación solar normalmente se instalan en los puntos más bajos tuberías de drenaje a través de las cuales se puede realizar el vaciado mediante la apretura de una válvula de corte colocada en esta tubería.

2.3. CONFIGURACIONES DE INSTALACIONES SOLARES DE A.C.S.

El esquema de una instalación solar de A.C.S. viene definidas en principio por el tipo de edificio, el uso del mismo y sus características constructivas.

2.3.1. Sistemas por termosifón



En los sistemas por termosifón la circulación en el circuito primario solar se efectúa por convección natural, debido a las diferencias de densidad entre el fluido de trabajo caliente y el frío. El fluido en el captador asciende a medida que se calienta a consecuencia de la radiación solar. Al alcanzar el acumulador colocado por encima del captador, transfiere su calor y vuelve enfriado hacia el captador, tras descender por las tuberías de retorno. Funcionan sin bombas o controles. Por ello, requieren un diseño y montaje muy cuidadoso que minimice las pérdidas de carga.

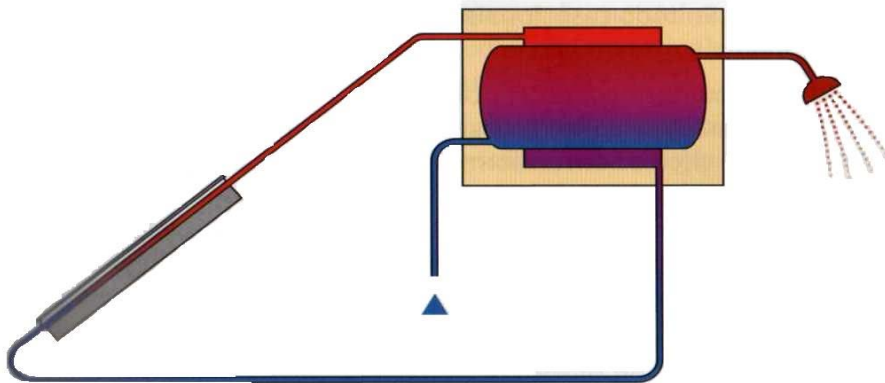


Figura 2.12 Sistema Termosifón

Este sencillo principio es el más apropiado para utilizar en países situados en zonas climáticas cálidas. El acumulador suele situarse en el exterior, pudiendo tomar varias posibles emplazamientos.

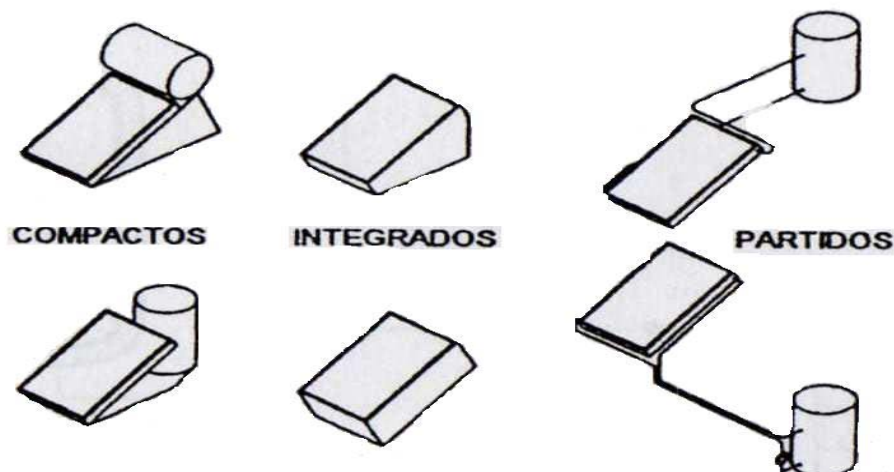


Figura 2.13 Situación de los captadores - depósitos



Hay que distinguir entre sistemas directos, en los que el agua sanitaria circula directamente a través del captador y los sistemas indirectos con un circuito primario cerrado.

Se tratan de sistemas prefabricados que suelen suministrar en una unidad completa que consta de uno o dos captadores, un acumulador y los accesorios correspondientes, con lo cual tienen un coste menor que otros equipos. Ellos directamente se regulan, en función de la radiación incidente. No se permite controlar la temperatura máxima en captadores. Debido que durante la noche, las temperaturas bajan, puede llegar a producirse un flujo invertido, teniendo que colocar válvulas antirretorno que lo impidan, a pesar de introducir pérdidas de carga.

Los sistemas por termosifón se utilizan sobre todo en instalaciones solares pequeñas.

2.3.2. Instalación de A.C.S. de circulación forzada

En los sistemas de circulación forzada, existe una bomba que impulsa el agua a través de los captadores. Las bombas se activan en función de la temperatura que dispongamos en los acumuladores, con lo cual estos sistemas llevan un sistema de regulación, que hace que tengamos un control preciso del sistema. En función de la temperatura del depósito y de los captadores, el sistema de bombas entrará en funcionamiento. Al tener una bomba, se impide que se produzca flujo invertido. Debido a que no es necesario tener ubicados los acumuladores muy próximos a los captadores, se tiene una mejor integración arquitectónica del sistema. Por el contrario, este tipo de instalaciones tiene un mayor coste de montaje, funcionamiento y de mantenimiento. Se distinguen diferentes configuraciones, en función del tamaño de la instalación.

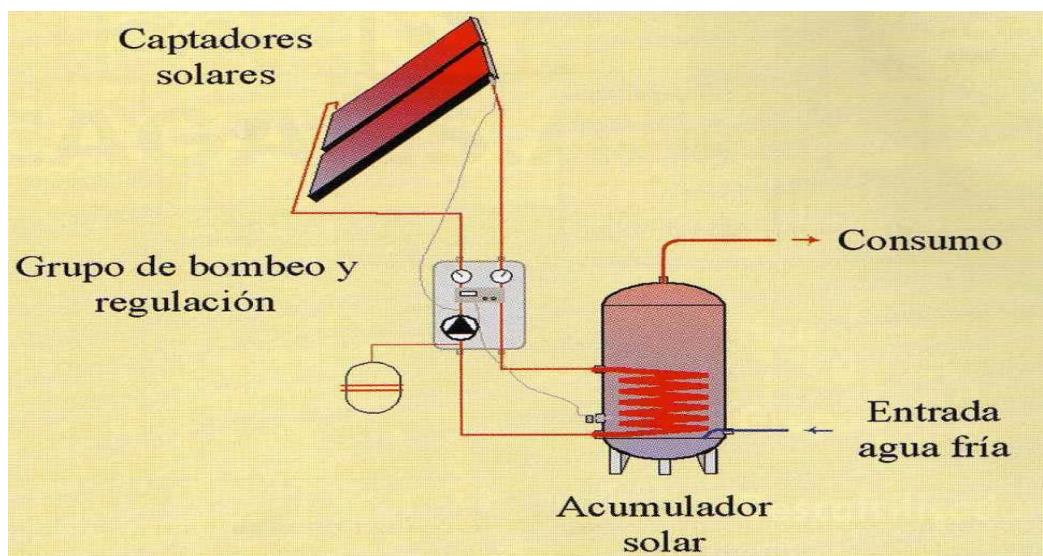


Figura 2.14 Instalación de A.C.S. de circulación forzada



2.3.2.1. Instalación de A.C.S. pequeñas de circulación forzada

Se consideran instalaciones pequeñas, aquellas que dan cabida a una o dos casas, con un área de captación de hasta aproximadamente 10 m² y un volumen máximo de acumulador de 400 litros.

2.3.2.2. Instalación de A.C.S. medianas y grandes de circulación forzada

Las instalaciones provistas de un campo de captadores de más de 10 m² y hasta 50 m² se definen como instalaciones solares medianas. Suelen montarse en edificios residenciales plurifamiliares, así como otros edificios del sector terciario, donde el consumo diario supera los 500 litros. Los sistemas donde su área de captación es superior a 50 m², se consideran instalaciones grandes.

En estos sistemas, se separa el acumulador solar del acumulador del sistema de calentamiento convencional. A medida que aumenta el tamaño del sistema, el sistema de intercambio de calor interno, se reemplaza por los intercambiadores externos. El acumulador del sistema convencional se coloca detrás del acumulador solar, con lo cual se puede seguir utilizando sin ninguna modificación alguna.

En el caso de que el calor producido por el sistema solar no sea suficiente, se efectúa un calentamiento por medio del sistema convencional, debiéndose tener en cuenta la mayor longitud de tuberías necesarias hasta la sala donde se encuentre ubicado el sistema de producción de energía térmica convencional.

2.3.3. Instalaciones de A.C.S. con acumuladores de inercia

Este tipo de configuraciones se instala cuando se ha de limitar el volumen de agua sanitaria y se ha de reducir el uso de energía convencional para la desinfección térmica. Los acumuladores de inercia se llenan normalmente de agua de calefacción.

En los sistemas con acumulador de inercia, el calor obtenido en los captadores se transfiere primero hacia el mismo a través del intercambiador de calor del circuito primario, el llamado intercambiador de carga. Posteriormente, la energía se transfiere al agua sanitaria a través de un segundo intercambiador, denominado de descarga, hacia el consumo.

Para el conexionado del acumulador de inercia con el sistema de agua caliente, existen varias posibilidades de descarga.

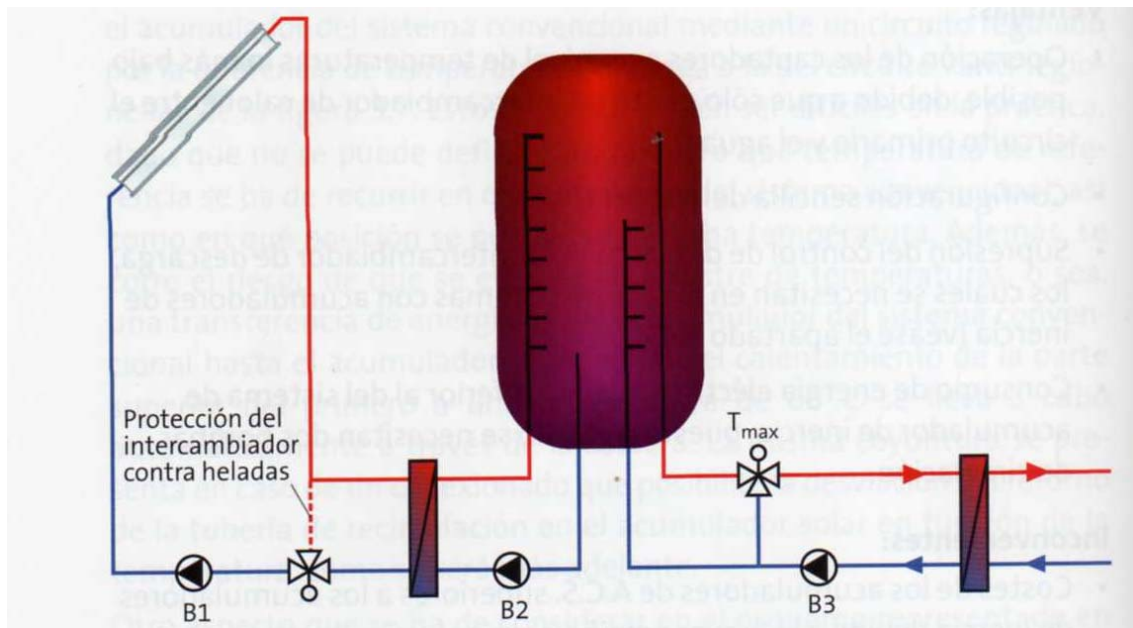


Figura 2.15 Sistema con acumulador de inercia (sin sistema convencional)

2.3.3.1. Descarga del acumulador de inercia mediante calentamiento instantáneo

Este tipo de diseño es sencillo y económico. Las pérdidas térmicas sólo se producen en el acumulador de A.C.S. del sistema convencional.

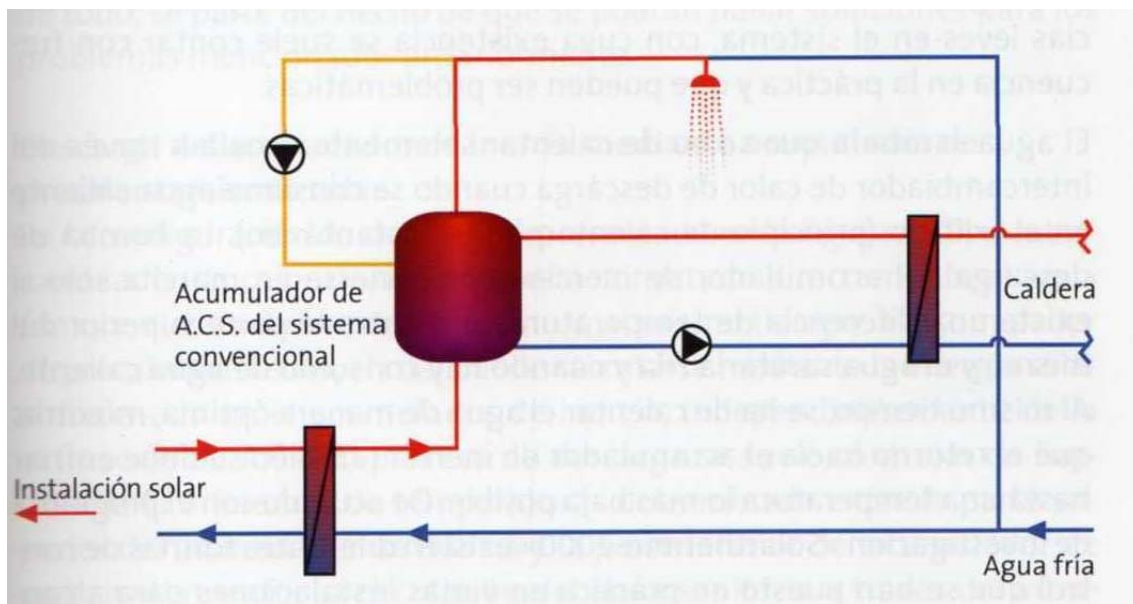


Figura 2.16 Sistema de acumulador de inercia con descarga instantánea



El agua caliente solo circula a través del intercambiador de calor de descarga cuando se consume agua caliente. La bomba de descarga del acumulador de inercia debe ponerse en marcha sólo si existe una diferencia de temperaturas útil entre la parte superior del mismo y el agua sanitaria fría y cuando hay consumo de agua caliente.

El elemento crítico para que esta configuración funcione correctamente es que la bomba de descarga del acumulador solar sea capaz de seguir la punta de consumo. Si su caudal no es suficiente, no se puede extraer todo el calor solar necesario para precalentar el agua fría de la red, pero si su caudal es excesivo, se penalizará el rendimiento solar, ya que se destruirá la estratificación térmica en el acumulador solar, produciéndose su homogeneización térmica, con el consiguiente aumento de la temperatura de trabajo de los captadores osares. Lo ideal es trabajar con bombas de caudal variable, con seguimiento de los caudales del consumo de A.C.S.

2.3.3.2.Descarga del acumulador de inercia mediante acumulador de precalentamiento solar

En esta configuración, el intercambiador de calor de descarga está conectado directamente al agua fría que circula durante el consumo y al acumulador de precalentamiento, el cual puede calentarse mediante la energía solar almacenada en el acumulador de inercia, independientemente de la extracción de A.C.S. El proceso de descarga se suele controlar en función de la diferencia de temperaturas entre la parte superior del acumulador de inercia y la parte inferior del acumulador de precalentamiento.

La circulación del agua sanitaria a través del intercambiador de descarga y la transferencia de energía, se efectúa por medio de la bomba colocada entre el intercambiador y el acumulador de precalentamiento. Con el uso de la bomba adicional se garantiza, una definición clara del caudal que circula en el lado del agua sanitaria del intercambiador de calor de descarga.

2.3.3.3.Descarga del acumulador de inercia mediante acumulador bivalente

La configuración del sistema anterior puede modificarse combinando el acumulador de precalentamiento solar y el acumulador del sistema convencional en un solo tanque.

Esta configuración permite un ligero incremento del aprovechamiento de la energía solar a fin de superar las pérdidas de recirculación, en vista de que el nivel de temperaturas solar también llega hasta la parte convencional del acumulador, cuando no se extrae agua caliente.

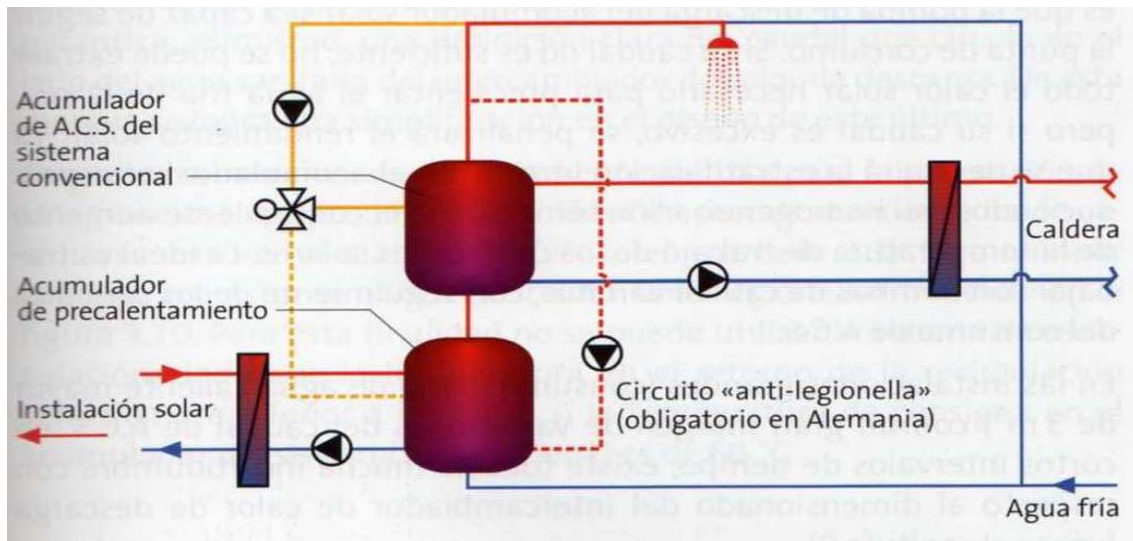


Figura 2.17 Acumulador de inercia mediante acumulador de precalentamiento solar

El empleo de un acumulador bivalente supone que ni las tuberías de recirculación ni el sistema de calentamiento convencional causen perturbaciones en la estratificación térmica en el acumulador. Resulta ventajoso emplear un acumulador particularmente alto y estrecho. Los caudales de recirculación y calentamiento convencional se han de mantener en un nivel lo más bajo posible. Se aconseja que las redes de circulación se operen con la máxima diferencia de temperaturas admisible entre impulsión y retorno.

Dado que en los sistemas de calentamiento convencional la tubería de retorno a la caldera suele estar conectada a la parte inferior del acumulador, esta configuración con acumulador bivalente de precalentamiento y de calentamiento convencional casi nunca es apropiada para re-equipamientos, sino más bien para instalaciones nuevas.

2.3.4. Configuración par viviendas multifamiliares

En el diseño de las instalaciones solares térmicas para viviendas multifamiliares se ha de tener en cuenta la distribución de los distintos pisos o apartamentos en los cuales está definido el edificio de viviendas.

Por motivos económicos, de eficiencia y de estética no se suele optar por la construcción de pequeñas instalaciones solares individuales, de modo que el diseño típico consta de un campo solar y un sistema de distribución comunitario, mientras que la acumulación puede realizarse, bien centralizada o bien de forma individual. El tipo de configuración elegida, va a condicionar la forma o el tipo de equipo de apoyo que vaya a tener el conjunto de viviendas.

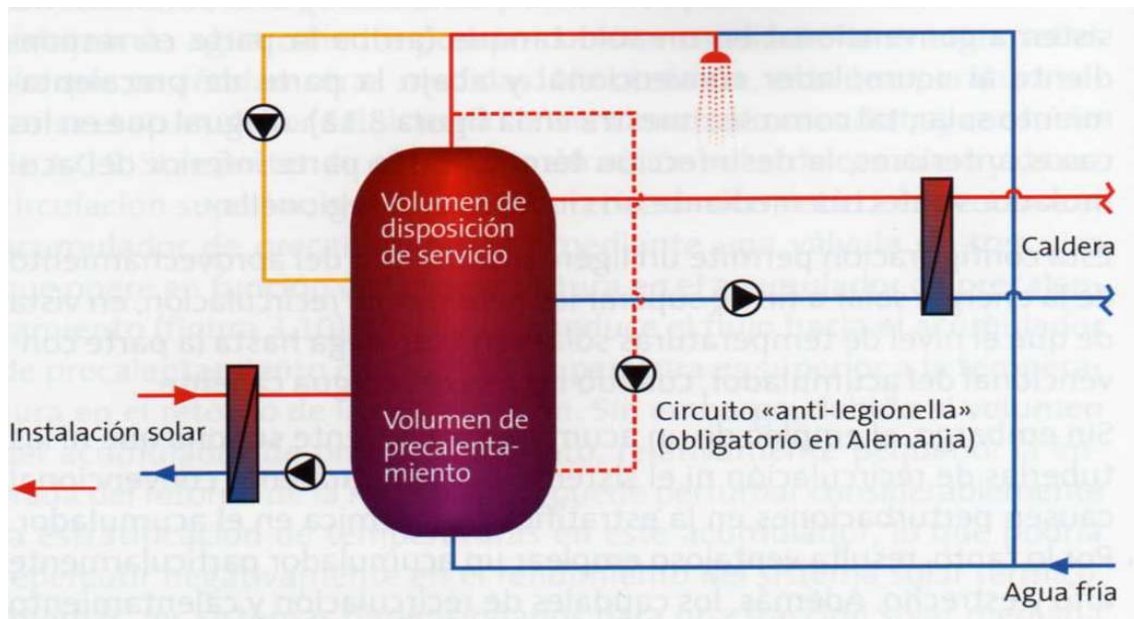


Figura 2.18 Descarga del acumulador de inercia mediante acumulador bivalente

2.3.4.1.A.C.S. Centralizado

En esta configuración, existe un campo solar, que calienta el fluido caloportador. Posteriormente se transfiere la energía a un acumulador central mediante los intercambiadores, externos o internos. Desde este depósito central se distribuye a cada una de las viviendas mediante una red de distribución que se encuentra circulando en permanentemente en circuito de recirculación, a fin de logra que la temperatura disponible a la entrada de cada vivienda sea la máxima posible.

En cada una de las viviendas, se dispone de un sistema convencional para suplir la energía que no sea capaz de suministrar el sistema solar debido a poca incidencia solar.

Para evitar incrustaciones calcáreas en los intercambiadores y demás accesorios, puede resultar necesario limitar la temperatura en el acumulador solar a 60°C, si el agua de la red local no presenta un contenido de cal muy reducido, o bien se ha proceder a su descalcificación. Si se permiten temperaturas más elevadas en el acumulador solar, se limitará la temperatura del A.C.S. de consumo mediante la mezcla con agua fría a través de una válvula termostática, bien a la salida del acumulador central o bien en cada vivienda.

Al diseñar el circuito de distribución se han de tener en cuenta los coeficientes de simultaneidad de los consumos en las viviendas. El caudal de recirculación debe ser tal que la energía aportada a la red de distribución sea suficiente para compensar las pérdidas térmicas de la misma.

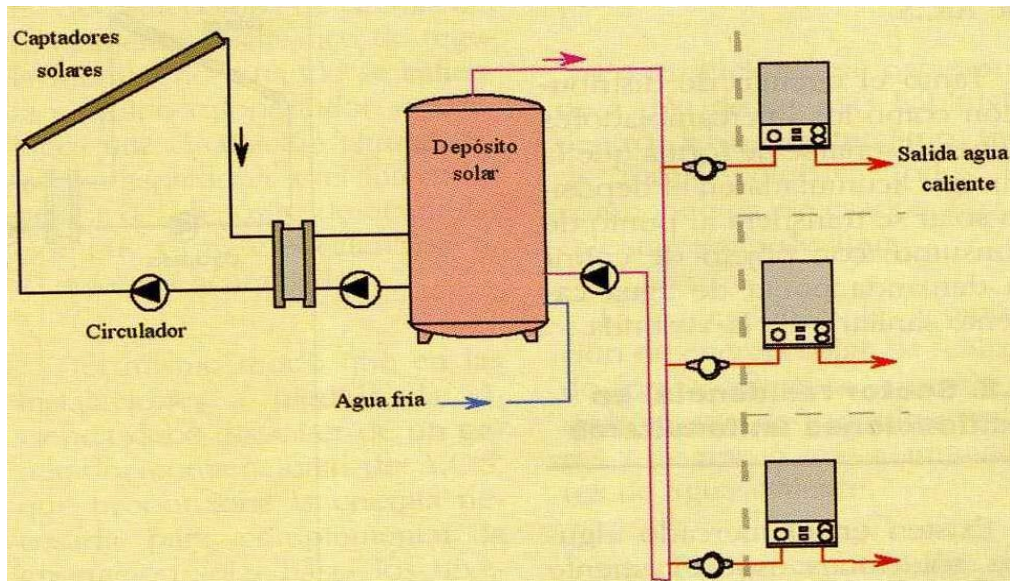


Figura 2.19 Sistema Centralizado con apoyo individual

2.3.4.2. Acumulador Solar Centralizado e intercambiador de calor en cada vivienda

En este tipo de configuración, se dispone de un campo solar, donde un fluido caloportador transfiere la energía captada a un acumulador central mediante un intercambiador central. Desde este acumulador, se distribuye una red de distribución que lleva a cada una de las viviendas, donde encontramos en cada una de estas un intercambiador, donde es transferida la energía a cada una de las viviendas, donde es almacenado en un depósito individual. La red de distribución está en continuo recirculación, para mantener la red a la temperatura máxima posible.

Al realizarse el diseño del circuito de distribución se ha de tener en cuenta los coeficientes de simultaneidad de los consumos en las viviendas.

Este diseño presenta las ventajas, de que ya no tenemos que limitar las temperaturas en el depósito solar por precaución para que no se produzca incrustaciones calcáreas en los depósitos y demás equipos auxiliares, ni colocar dispositivos de descalcificación. Además en la red de distribución y por los captadores, no es necesario que circule agua, pudiendo hacerlo cualquier otro fluido caloportador. La separación de los circuitos hace que este sistema sea intrínsecamente seguro contra la legionelosis, facilitándose el mantenimiento, no se precisa cortar o desviar el suministro de A.C.S. en todas las viviendas. Dado que el acumulador solar puede contener otro fluido, que no sea agua sanitaria, se puede utilizar como material del mismo otro de menor coste que el acero inoxidable.

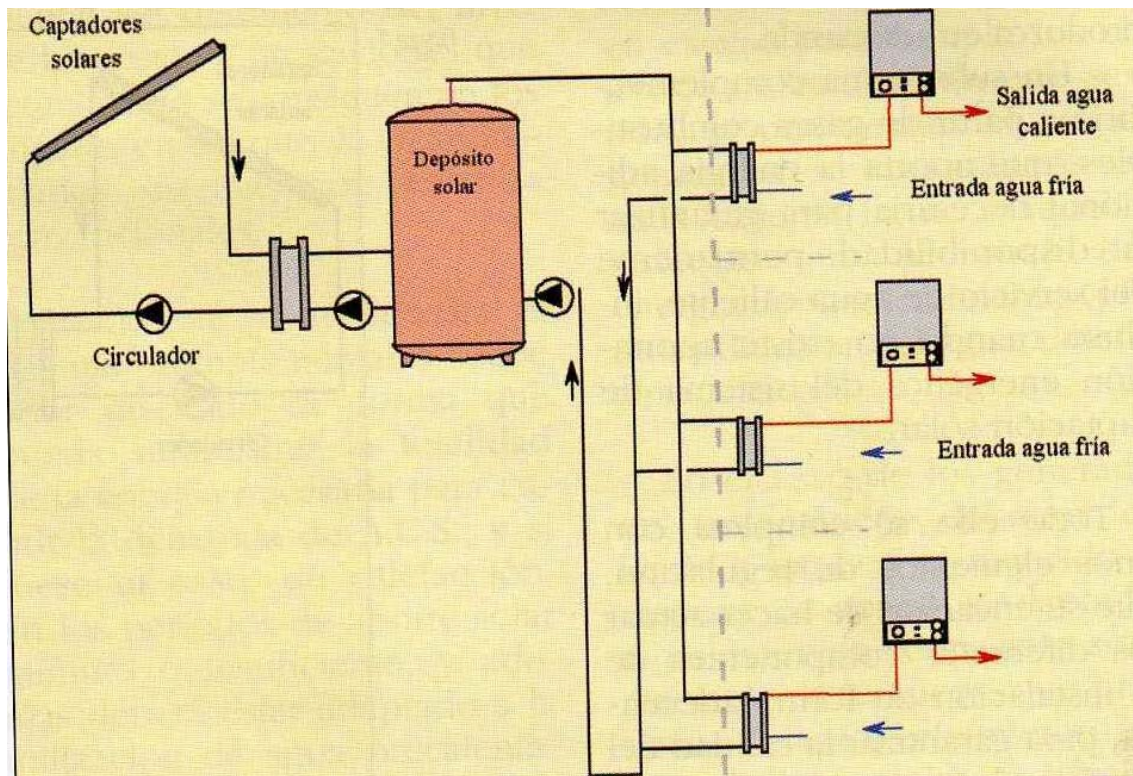


Figura 2.20 Sistema Solar con acumulador central e intercambiador individual en cada vivienda

Por otro lado, este sistema es más costoso, debido a que en cada una de las viviendas se ha de colocar un intercambiador, teniendo bastante importancia el diseño de estos para que cumpla con los requisitos.

2.3.4.3. Configuración con acumulador individual en cada vivienda

La variante consiste en disponer de un acumulador individual en cada vivienda. Este tipo de configuración se elige cuando se presentan problemas de espacio para ubicar un acumulador central o cuando se entienda que el usuario final va a valorar favorablemente el tener un acumulador en su propia vivienda.

El calor generado por el campo de captadores se transfiere mediante un intercambiador de placas al circuito de distribución, por el cual llega hasta los acumuladores de placas al circuito de distribución, por el cual llega hasta los acumuladores distribuidos. Los diámetros de las tuberías de la red de distribución no deben ser demasiados grandes, ya que no se ha de diseñar considerando las puntas de consumo, sino la potencia térmica solar que se ha de transferir.

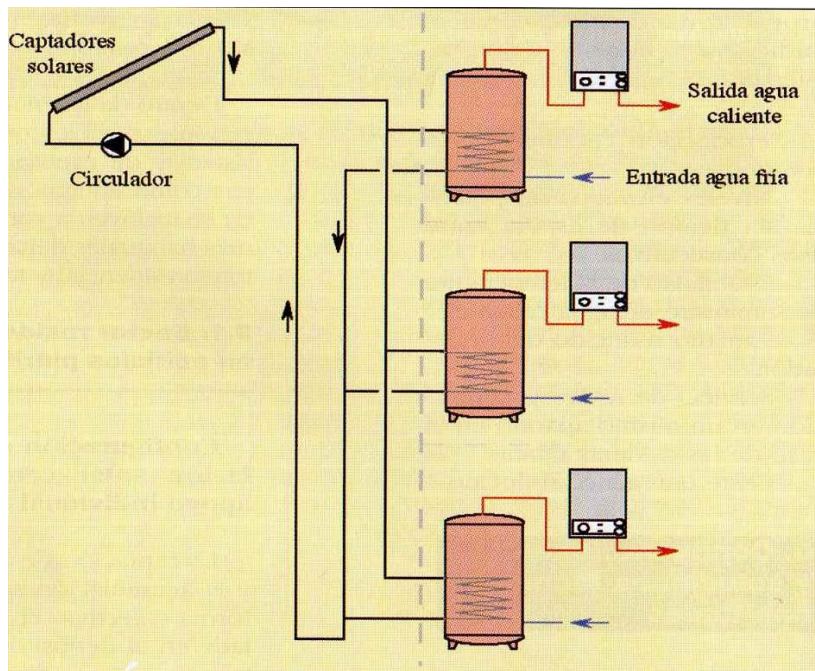


Figura 2.21 Configuración con acumuladores individuales en cada vivienda

Este tipo de configuración resulta algo más cara que las descritas anteriormente, debido a que en los acumuladores individuales, las pérdidas resultan más elevadas, lo que hay que tomar en consideración.

Esta configuración, ofrece una seguridad frente a la legionelosis y bastante facilidad de manteniendo.

2.4. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS INSTALACIONES SOLARES TÉRMICAS

Existen una serie de variables que nos son útiles para evaluar el dimensionado, el funcionamiento y algunos aspectos económicos de las instalaciones solares térmicas. Para una buena descripción de un correcto estado de una instalación, nos es necesario conocer estas variables.

2.4.1. Carga de consumo específica

El consumo de A.C.S. por persona varía en función del tipo de instalación en la cual nos encontremos. Para efectuar el diseño de una instalación solar, nos es necesario definir un valor que establezca una relación entre el área de captación y el consumo de A.C.S.



Se denomina carga de consumo específica al volumen de agua en litros que se debe calentar en la instalación solar por día y por metro cuadrado de área de captación. Este valor sólo es relevante para sistemas exclusivamente de A.C.S., donde representa una característica esencial para el dimensionado. Cabe notar que con un determinado valor de demanda de agua caliente, la carga de consumo específica disminuye al aumentar el área de captación.

Un valor típico en España está entre los 50 l/(m²día) y 60 l/(m²día). Un valor inferior a 50 l/(m²día) suele poner de manifiesto un sobredimensionamiento.

2.4.2. Rendimiento

La energía solar incidente sobre el captador es el valor de referencia para determinar todos los diferentes rendimientos que se pueden definir para una instalación solar térmica. Al existir varias definiciones del rendimiento, se deberá mencionarse siempre la definición usada en cada caso particular. Deberá indicarse además si es un rendimiento instantáneo o un rendimiento medio de un determinado periodo.

2.4.2.1. Rendimiento del circuito primario

El rendimiento del circuito primario solar representa la relación entre la energía térmica que se transfiere en un periodo de tiempo dado al intercambiador de calor o al acumulador solar a través del circuito primario y la irradiación incidente sobre el campo incidente sobre el campo de captadores en el mismo periodo. No se tienen en cuenta las pérdidas térmicas de las tuberías en el exterior de la interfaz del circuito primario, ni en el acumulador, por lo que suele ser superior al rendimiento del sistema.

$$\eta_{\text{circ. primario}} = \frac{Q_{\text{circ. primario}}}{Q_{\text{rad. solar}}} \quad (2-15)$$

donde:

$\eta_{\text{circ. primario}}$ = Rendimiento del circuito primario

$Q_{\text{circ. primario}}$ = Energía térmica que se transfiere al intercambiador o acumulador a través del circuito primario.

$Q_{\text{rad. solar}}$ = Irradiación incidente

2.4.2.2. Rendimiento del sistema

El rendimiento del sistema es la relación entre la energía térmica que se transfiere en un periodo de tiempo dado al sistema convencional a través del sistema solar térmico



completo, el cual incluye todos los acumuladores e intercambiadores de calor y la irradiación que en el mismo período incide sobre el campo de captadores.

En los sistemas termosifón es casi imposible determinar el rendimiento del circuito primario, ya que el caudal no puede medirse mecánicamente sin influir en la circulación. En este caso, sólo se podrá determinar por medio de un balance de energía: consumo de agua caliente menos energía convencional y las pérdidas térmicas del acumulador.

$$\eta_{sist} = \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{rad.solar}}} \quad (2-16)$$

donde:

η_{sist} = Rendimiento del sistema

$Q_{\text{útil}}$ = Energía térmica útil.

$Q_{\text{rad.solar}}$ = Irradiación incidente

2.4.3. Fracción solar

Se entiende por *fracción solar* o *cobertura solar* a la relación existente entre la energía suministrada por la parte solar de la instalación y la demanda de energía térmica. El valor de la demanda de energía térmica puede referirse a diferentes valores de consumo, de manera que se obtienen como resultado diferentes definiciones para la fracción solar.

2.4.3.1. Fracción solar de consumo

La fracción solar del consumo es el porcentaje de la energía solar en la demanda total de energía requerida para obtener el agua caliente consumida.

Con la fracción solar de consumo se caracteriza adecuadamente una instalación solar sólo para A.C.S., siempre que por razones de diseño o de construcción ésta no sea capaz de contribuir a la cobertura de las pérdidas térmicas de distribución, recirculación, etc., y si no está conectada a la calefacción.

$$FS = \left(\frac{Q_s}{Q_s + Q_{AUX}} \right) \cdot 100 \quad (2-17)$$

donde:

FS = Fracción Solar (%)

Q_s = Aporte de energía solar transferida al consumo (kWh)

Q_{aux} = Aporte de energía convencional (kWh)



La demanda de los usuarios es la suma de la energía solar transferida al consumo más el aporte de energía convencional.

2.4.3.2.Fracción solar de consumo y de recirculación

Se puede denominar fracción solar de consumo y de las pérdidas térmicas de distribución y recirculación, debido a que es posible que la red de distribución de A.C.S. del edificio esté provista de un sistema de recirculación. Es la relación entre la energía suministrada por la instalación solar y la requerida para obtener el agua caliente y cubrir las pérdidas térmicas de distribución. No se incluye la demanda de energía, tanto para la cobertura de las pérdidas térmicas en el acumulador convencional, como para la calefacción.

2.4.3.3.Fracción solar de la demanda de energía total de un sistema de A.C.S.

La fracción solar de la demanda total de la energía de un sistema de agua caliente sanitaria es la relación entre la energía útil cubierta de agua caliente y la demanda de todo el sistema de agua caliente. Debido a que las pérdidas térmicas en el acumulador de A.C.S. convencional son proporcionalmente bajas, la fracción solar total suele hallarse ligeramente por debajo de la fracción solar de consumo y de recirculación.

2.4.3.4.Fracción solar de la demanda de energía total del edificio

La fracción solar de la demanda total de energía es la relación entre la energía suministrada por la instalación solar y la demanda de energía, tanto para A.C.S., como para calefacción, incluidas todas las pérdidas térmicas.

En la Figura 22 se representa la evolución de la demanda de energía y el aporte solar en dos instalaciones. En la figura de la izquierda, apreciamos que es necesario un aporte de energía convencional a lo largo de todo el año. Esta situación es la que nos encontraríamos en una instalación típica.

Sin embargo, en la figura de la derecha se presenta una situación en la que existe un excedente de energía térmica (fundamentalmente durante el periodo estival). Este excedente se produce porque en ese periodo la instalación está sobredimensionada. El sobredimensionamiento puede hacer que tengamos problemas en la instalación por la producción de vapor dentro del circuito, llegando a afectar negativamente a la eficacia y a la durabilidad de la instalación.

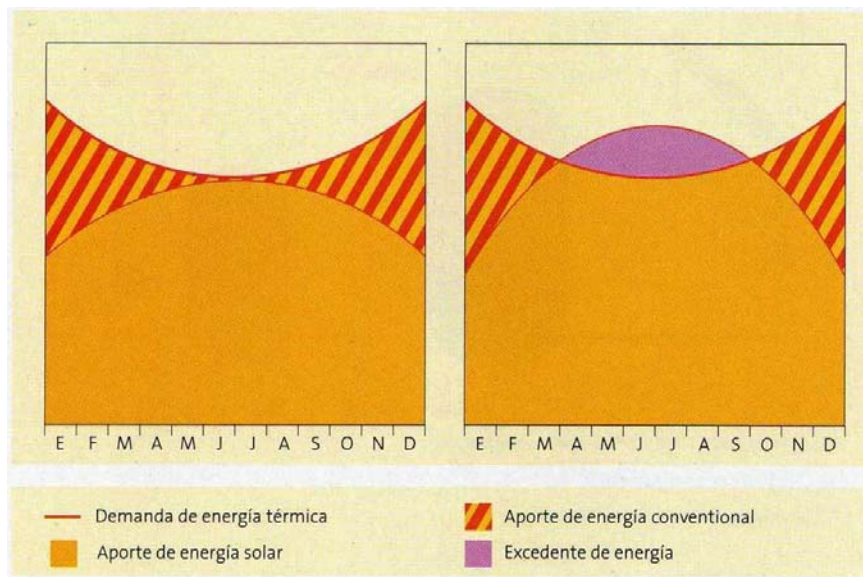


Figura 2.22

2.4.4. Factor de productividad

El factor de productividad describe la relación entre la energía térmica suministrada por la instalación solar y la energía eléctrica utilizada para el sistema de control, las bombas, las válvulas de control, etc., sin tener en cuenta los posibles dispositivos de monitorización. El factor de productividad indica la cantidad de kWh de energía suministrado por kWh de energía eléctrica utilizada en una instalación solar.

$$FP = \frac{Q_{\text{térm}}}{Q_{\text{elect}}} \quad (2-18)$$

donde:

FP = Factor de productividad

$Q_{\text{térm}}$ = Energía térmica suministrada a la instalación

Q_{elec} = Energía eléctrica consumida por la instalación

2.4.5. Coste del calor solar

Los costes del calor solar se cuantifican a partir de la relación entre la anualidad (en euros), que se calcula a partir de los costes de inversión totales de una instalación solar, la vida útil del sistema y el tipo de interés que el capital que se ha de emplear, y el aporte anual de energía solar útil (en kWh / año).



2.5. PREVENCIÓN DE LA LEGIONELOSIS

Las instalaciones solares térmicas calientan el agua sanitaria aprovechando la energía solar. Como se ha comentado anteriormente, la producción del A.C.S. tiene un desfase horario con la demanda de ésta, por ella debe hacerse uso de los acumuladores.

El almacenamiento del agua sanitaria, implica una serie de requisitos de higiene, debido a que existe un riesgo alto de proliferación de bacterias.

Las instalaciones solares térmicas están consideradas como instalaciones con mayor probabilidad de proliferación de la bacteria de la legionella. La legionella es una bacteria ambiental que tiene como hábitat natural el medio acuático. Es capaz de sobrevivir en condiciones ambientales muy variadas, multiplicándose entre 20°C y 45°C, y destruyéndose a 70°C. Su temperatura óptima de crecimiento es 35 – 37°C.

Las temperaturas de 30°C a 50°C suelen presentarse con frecuencia en los acumuladores solares. En este caso, se deben tomarse una serie de medidas, tales como:

Evitar estancamientos de agua, mediante un diseño adecuado de la instalación.
Eliminar o reducir zonas sucias, con un programa apropiado de mantenimiento.
Impedir la multiplicación y supervivencia de la bacteria en la instalación a través de una desinfección continua de la instalación y un control de la temperatura.

Se evitará, en lo posible que la temperatura del agua permanezca en el intervalo entre 20°C y 50°C. Para ello se toman una serie de medidas, tales:

Aislar térmicamente equipos, aparatos y tuberías

Los depósitos situados en el exterior sometidos a calentamiento por radiación solar deberán estar térmicamente aislados.

Realizar la conexión de los depósitos acumuladores en serie

Los depósitos acumuladores tendrán una elevada relación altura/diámetro y serán instalados verticalmente.

Cuando se utilice un sistema de aprovechamiento térmico que disponga de acumulador y no asegure de forma continuada una temperatura próxima a 60°C, se garantizará posteriormente, que se alcance dicha temperatura en otro acumulador final antes de su distribución hacia consumo.

Seleccionar materiales que resistan la acción agresiva de los biocidas en las dosis aplicadas y la acción de la temperatura, a fin de evitar la formación de la corrosión.

Para los depósitos acumuladores son indicados el acero inoxidable y algunos revestimientos protectores del acero común.

Para las tuberías son indicados el cobre, acero inoxidable y algunos materiales plásticos resistentes a la presión y temperatura.



3. MÉTODOS DE CÁLCULO

3.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una gran variedad de programas comerciales de simulación que permiten dimensionar instalaciones solares. La gran mayoría de los programas de cálculos no requieren un gran conocimiento de las instalaciones por parte del usuario y suelen aportar resultados adecuados para el nivel de detalle requerido y los datos de entrada aportados al programa. Cuando se necesitan resultados más aproximados completos se emplean programas de simulación detallados que normalmente requieren mayor cantidad de datos de entrada y un nivel notable de conocimientos técnicos por parte del usuario.

Existen múltiples programas utilizados para calcular y/o simular instalaciones solares térmicas. La mayoría de estos programas pueden utilizarse también para simular el comportamiento de instalaciones de calentamiento de piscinas, calefacción, refrigeración, etc. De acuerdo al tipo de cálculo que realizan se clasifican básicamente en **MÉTODOS DE CÁLCULOS SIMPLIFICADOS** y **PROGRAMAS DE SIMULACIÓN**.

Los programas de simulación a su vez, pueden ser de naturaleza modular si simulan componentes antes que sistemas. En los programas modulares se incorporan módulos que controlan la unión de los diferentes componentes así como el trasvase de información entre componentes. Son programas de uso muy flexible, ya que se pueden componer cualquier instalación siempre que se disponga del módulo correspondiente a cada uno de los componentes de la misma. La versatilidad del programa se consigue a costa de un mayor nivel de complejidad a la hora de definir los parámetros de entrada del sistema.

El modelo matemático empleado influye en la fiabilidad, flexibilidad, objeto de aplicación, esfuerzo computacional y tiempo de cálculo del programa. Al pasar de los métodos de cálculo simplificados a los programas de simulación aumentan todos los parámetros anteriores y dentro de estos últimos, al pasar de programas de simulación no modulares a modulares sucede lo mismo. Al mismo tiempo, a medida que un programa es más flexible también aumentan los requisitos solicitados al usuario.

3.2. PROGRAMAS DE SIMULACIÓN

Las simulaciones son experimentos numéricos y pueden facilitar los mismos resultados que los experimentos físicos. Existen las ventajas de la rapidez de cálculo y el menor costo, suministrando suficiente información para analizar el efecto de las variables en el diseño de sistemas solares.



Los sistemas solares se caracterizan por la transitoriedad de algunos fenómenos físicos determinantes, como son la radiación solar, la temperatura o el consumo. Debido a esto, un cálculo que no contemple la influencia recíproca de la variabilidad de cada una de éstas sobre el funcionamiento del sistema, generará siempre un error. La simulación dinámica contempla esta fenomenología.

Se distingue entre programas no modulares (TRANSOL) y modulares (TRNSYS). En ambos casos se simula el comportamiento de una instalación a partir de los modelos matemáticos establecidos para cada componente. Estos programas permiten realizar evaluaciones en diferentes periodos de tiempo mediante la resolución de las ecuaciones características de los distintos componentes de una instalación solar. Algunos programas disponen de displays que permiten visualizar valores en un determinado instante.

Los programas no modulares disponen de una librería que contiene configuraciones predeterminadas de instalaciones solares térmicas para que el usuario pueda seleccionar la configuración que mejor se adapte a cada caso e introducir los parámetros requeridos. Salvo excepciones no se puede variar la configuración de la instalación ni ampliar la librería disponible con nuevas configuraciones. Estos programas son de fácil manejo para usuarios y se caracterizan por una adecuada presentación.

Los programas modulares permiten realizar análisis dinámicos y simular prácticamente cualquier tipo de configuración y condiciones de operación. Normalmente no son de fácil utilización, necesitando el usuario periodos de adaptación medios o largos para trabajar correctamente con este tipo de programas. Estos programas de simulación, son herramientas poderosas para el diseño de nuevos procesos, cálculo del funcionamiento de éstos y posibles mejoras de los sistemas. Sin embargo hay limitaciones a la hora de simular algunos de los sistemas estudiados.

Hay que tener en cuenta, que los sistemas simulados están basados en suposiciones, que han de estar bien formuladas. Es fácil, que se cometan errores en la programación, tomar constantes erróneas, descuidar factores que podrían tener mayor importancia, etc.

En las simulaciones, se pueden extraer ciertas partes de una instalación, para ver su evolución al ir modificando los parámetros de diseño o al ir modificando sus componentes. En la práctica, este tipo de acciones, es muy difícil llevarlo a cabo, tanto en la realidad como con programas de cálculo simplificado.

Los programas de simulación, requieren una preparación y conocimiento en la materia, que no son necesarios en los métodos de cálculo simplificado.

3.2.1. TRNSYS

La primera versión pública de TRNSYS data del año 1975, desarrollada en el Solar Energy Laboratory (SEL) de la Universidad de Wisconsin-Madison. Es un programa



originalmente desarrollado para el estudio de sistemas con energía solar, aunque en la actualidad es una potente herramienta que permite la resolución transitoria de cualquier tipo de sistema.

TRNSYS es un programa de simulación dinámica para sistemas con una estructura modular. Está especialmente diseñado para la simulación de sistemas solares activos y simulación térmica de edificios. Reconoce un lenguaje de descripción del sistema en el que el usuario especifica los componentes que constituyen el sistema y la manera en la que están interconectados.

TRNSYS es un solver de ecuaciones algebraicas y diferenciales que incorpora una librería con los más comunes sistemas termoenergéticos y diseñado especialmente para simulaciones transitorias. Adopta una estructura modular para la resolución de sistemas de componentes, donde cada uno de los componentes se describe mediante una subrutina que en la nomenclatura que utiliza TRNSYS recibe el nombre de TYPE. Esta técnica modular permite analizar un sistema entero como la suma de componentes o sistemas individuales y la interconexión entre éstos.

Desde un punto de vista práctico, es abordar la resolución de pequeños problemas en vez de un gran problema. Cada Type o subrutina contiene uno o varios modelos de un componente de sistema. Por ejemplo, la subrutina Type 4, es un modelo detallado de depósito de almacenamiento. Especificando los parámetros (valores independientes del tiempo como por ejemplo el volumen del tanque) y las variables de entrada (valores dependientes del tiempo como la temperatura del agua de entrada y el flujo másico), el modelo calcula las variables de salida dependientes del tiempo (como por ejemplo, la temperatura del agua a la salida del tanque o la pérdidas de calor a través de la pared del tanque). Estos valores de salida calculados pueden ser usados como variables de entrada para otros modelos.

La librería standard de TRNSYS incluye la mayoría de componentes encontrados en los sistemas termoenergéticos (desde equipamientos HVAC hasta edificios en forma detallada, desde controladores y sistemas de regulación hasta captadores solares), así como subrutinas de componentes que permiten tratar datos meteorológicos y otras funciones de carácter transitorio. TRNSYS también dispone de subrutinas que permiten el tratamiento y formato de salida a los resultados de las simulaciones.

El usuario debe crear para simular un sistema un fichero de entrada para el ejecutable de TRNSYS que consiste en una descripción de los componentes que constituyen el sistema y sus interconexiones. El ejecutable de TRNSYS resuelve los componentes del sistema e itera para cada instante de tiempo hasta que el sistema de ecuaciones converge de acuerdo con los intervalos de convergencia previamente fijados.

La modularidad del programa permite al usuario tener tantos elementos, (bombas, refrigeradores, captadores solares, etc.), como sea necesario en cualquier configuración. Ya que los modelos de los componentes están escritos en FORTRAN, el usuario puede fácilmente modificarlos y generar nuevos componentes para tecnologías no incluidas en la librería standard.



Existen librerías no standard (creadas por usuarios) disponibles que simulan el comportamiento de otros componentes. Existe una librería de componentes de libre acceso cuyos códigos fuentes los autores ponen al servicio de la comunidad científica. También existen librerías de componentes que comercializan los distribuidores de TRNSYS, desde bombas de calor y sistemas geotérmicos hasta modelos detallados de captadores solares, controladores o piscinas.

TRNSYS no es simple y llanamente un solver de ecuaciones. El paquete completo de TRNSYS incluye además de los códigos fuente de las subrutinas y el programa ejecutable, el entorno TRNSHELL que permite la edición de ficheros e incorpora en un solo programa las acciones necesarias para construir, ejecutar y analizar una simulación TRNSYS. A diferencia de muchas herramientas de simulación presentes en el mercado hoy en día, TRNSYS permite al usuario describir completamente y visualizar todas las interacciones entre componentes del sistema. Mediante una interfase basada en iconos gráficos, el usuario directamente define los componentes de su sistema y los conecta. Mediante esta interfase gráfica tiene la capacidad de definir los parámetros y variables de entrada de cada uno de los componentes del sistema y de crear el fichero de entrada para que el ejecutable TRNSYS pueda realizar la simulación.

Se han desarrollado dos plataformas gráficas para la creación de los esquemas de sistemas. Una plataforma, desarrollada en el Solar Energy Research Center de Suecia, responde al nombre de PRESIM. La otra plataforma, que responde al nombre de IISiBat, ha sido desarrollada en Francia por el Centre Scientifique et Technique du Batiment. Ambas plataformas realizan funciones similares y responden a la necesidad de tener una herramienta visual para la creación de sistemas complejos. La decisión de que interfase gráfica utilizar depende de las preferencias del usuario final ya que ambas utilizan el mismo código fuente e incluyen las mismas utilidades: TRNSED, TRNSHELL, PREBID, BID y la pantalla de visualización de resultados On- line.

3.2.1.1. Esquema de cálculo

El esquema de cálculo puede ser descrito de la forma siguiente: En un tiempo t , el valor de la variable T^p , se calcula en función del valor de la variable en el instante anterior y el valor de la derivada parcial de la variable, referido al instante anterior.

$$T^p = T_0 + \Delta t \cdot \left(\frac{dT}{dt} \right)_0 \quad (3-1)$$

donde:

T^p = Valor predicho de la variable en el tiempo t

T_0 = Valor de la variable en el paso anterior al cálculo

Δt = incremento de tiempo



El pronóstico de las variables, T^p , son usados para determinar valores correctos, T^c , mediante sus derivadas, como función del tiempo, T^p y las ecuaciones algebraicas que definen al modelo.

$$\frac{dT}{dt} = f(t, T^p, \text{soluciones_a algebraicas}) \quad (3-2)$$

El valor correcto de las variables dependientes, T^c , se obtiene mediante la aplicación de una regla trapezoidal,

$$T^c = T_0 + \frac{\Delta t}{2} \left[\left(\frac{dT}{dt} \right)_0 + \frac{dT}{dt} \right] \quad (3-3)$$

si

$$\frac{2(T^c - T^p)}{T^c + T^p} > \varepsilon \quad (3-4)$$

Donde ε es la tolerancia del error. Cuando la tolerancia del error es satisfecha, la solución para el paso dado es completada, mientras si no es satisfecha la tolerancia, el proceso se repite para el paso siguiente.

3.2.2. TRANSOL

Los programas de simulación dinámica de sistemas, como TRNSYS, son productos caros y complejos, debido a su gran flexibilidad y capacidad de modelación. En el desarrollo de TRANSOL se ha procedido a la modelización de los sistemas, generando un programa a nivel de usuario, en el que éste sólo debe introducir los parámetros de su caso particular.

TRANSOL es una herramienta de cálculo potente y de calidad, fácil de comprender y utilizar, destinada al cálculo de sistemas, acercando a los usuarios la fiabilidad y precisión de la simulación dinámica de TRNSYS, a través de una interfase sencilla, simple y amigable, que incorpora los sistemas de producción de ACS más comunes para cada aplicación, contemplando polideportivos, hoteles, viviendas unifamiliares y bloques de viviendas.

TRANSOL incorpora los modelos TRNSYS de cada uno de los sistemas incluidos en el programa, así como la parte del solver matemático necesario para el cálculo de los mismos.

Los datos introducidos por el usuario corresponden a las características del sistema, necesarias para el cálculo.



Al iniciar un nuevo proyecto, el primer paso es la elección del sistema, a escoger de una lista de configuraciones con aplicación predeterminada. Una vez creado el proyecto, se introducen todos los datos necesarios para el cálculo: datos meteorológicos, parámetros de consumo, parámetros del sistema, parámetros de simulación, etc.

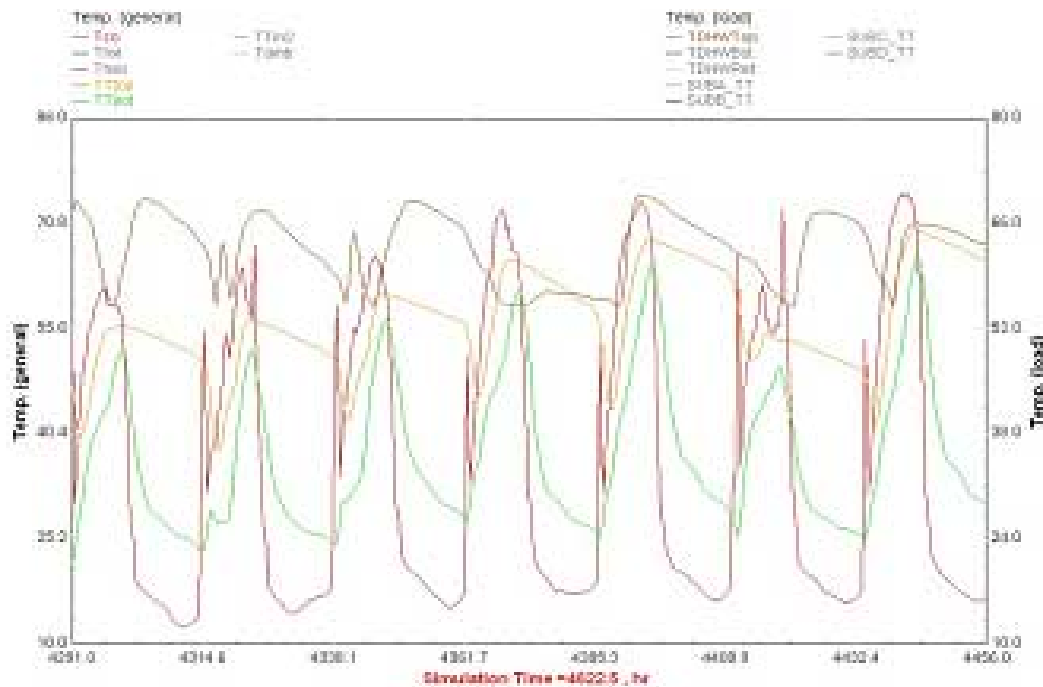


Figura 3.1

Cuándo los datos han sido introducidos y el proyecto salvado, se puede proceder a la simulación del sistema. Al dar la orden de calcular, TRANS L ejecuta TRNSYS con el proyecto preparado por el usuario. Al finalizar la simulación, TRANSOL lee y trata los resultados generados por TRNSYS, que podrá visualizar el usuario.

Para facilitar y orientar al usuario en la entrada de datos, TRANSOL incorpora correlaciones automáticas de la mayor parte de los parámetros. Así, a partir de un mínimo de parámetros iniciales, el resto son sugeridos al usuario, pudiendo éste modificarlos, ajustarlos o aceptarlos.

Así mismo, existen ciertos parámetros internos que se utilizan para el cálculo de estas y otras correlaciones. Algunos de éstos son, también, modificables, hecho que permite personalizar el programa para cada usuario.

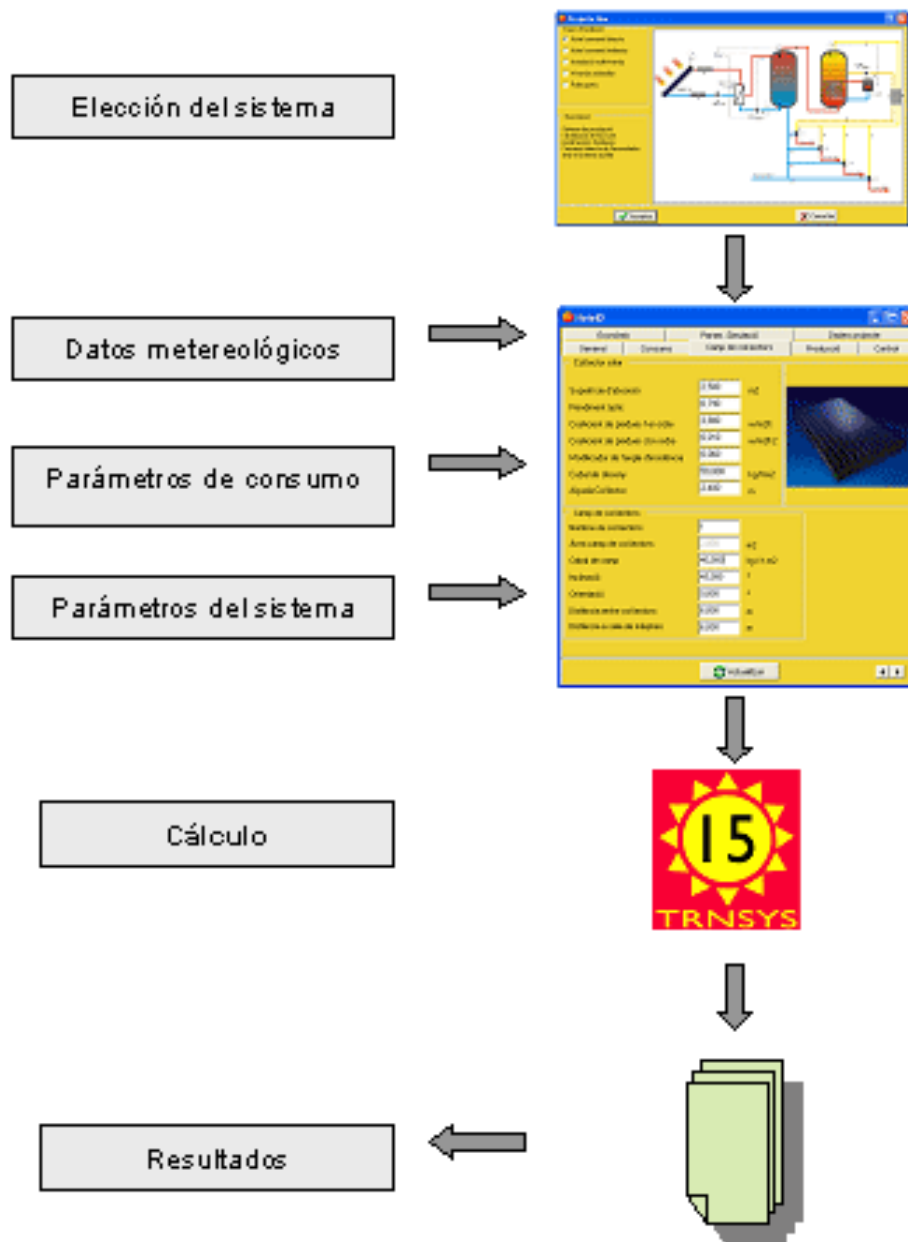


Figura 3.2

TRANSOL también permite tener más de un proyecto abierto a la vez, así como crear copias internas de los mismos.

TRANSOL incorpora una base de datos con los datos meteorológicos de las capitales de provincia del estado español.



Los datos de consumo, en función del tipo de aplicación elegida, se definen en función del número de personas. En el programa se debe introducir el número de personas que van a utilizar la instalación, obteniendo la demanda diaria. El programa da la posibilidad de variar el porcentaje del consumo mensual, porque asume que una instalación no va a tener el mismo consumo a lo largo del año, con ello se deben introducir los porcentajes mensuales en función de la demanda básica.

Dentro de los parámetros del sistema, se debe especificar el área de captadores, especificando el número de captadores de la instalación. El mismo programa tiene definido un captador plano típico. Posteriormente, se pueden modificar los parámetros del captador. Dentro del campo de captadores, se debe definir el caudal que va a circular por los captadores, la inclinación y su orientación. Un dato importante para tener en cuenta posteriormente las pérdidas, son las distancias entre captadores y la distancia a la sala de máquinas, donde van a estar situados los acumuladores, bombas y demás equipos.

Por último, debemos indicar los volúmenes de acumulación solar y centralizada. Ambos acumuladores deben estar aislados, para disminuir al máximo las pérdidas térmicas y evitar quemaduras por contacto. Para finalizar y calcular el ahorro, debemos elegir el sistema auxiliar a instalar y su rendimiento. Los costes de cada tipo de combustibles utilizados son modificables.

El mismo programa, dispone de una pestaña dedicada al control, donde se indican las temperaturas de parada y arranque de las bombas, la temperatura máxima del acumulador y la temperatura de servicio.

Para comenzar el cálculo, se debe introducir el periodo de simulación: fecha de inicio de la simulación, indicando la hora del año y la fecha de finalización. A parte de debe indicar el paso de cálculo.

Una vez guardado todos los cambios, se procede a ejecutar el programa, arrancándose una interfaz de TRNSYS, para realizar los cálculos.

TRANSOL genera archivos de salida tipo txt., que incluyen los valores instantáneos de las variables de mayor interés a lo largo de toda la simulación, así como valores medios y balances energéticos. Genera, también un informe de simulación sobre una hoja Excel. Los resultados (aporte solar, fracción cubierta, fracción solar) se pueden presentar en tablas.

TRANSOL tiene una serie de instalaciones que vienen prefijadas para realizar las simulaciones. Estas instalaciones abarcan distintos tipos de sistemas, teniendo el inconveniente que no se puede modificar la configuración. A continuación, se enumeran las configuraciones que dispone el programa.

3.2.2.1. Sistemas para instalaciones colectivas

Polideportivos:

- Sistema de doble acumulador en serie para servicio a instalaciones deportivas.
- Incluye modelización de sistema solar y auxiliar, así como del sistema de distribución con recirculación.
- Cálculo de pérdidas en primario, acumulación y recirculación
- Perfil de consumo global

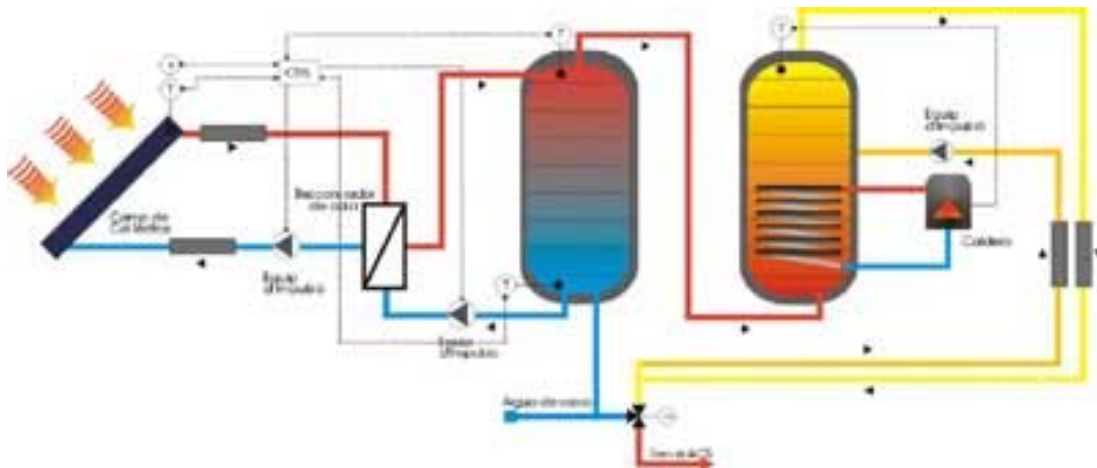


Figura 3.3 Polideportivos

Hoteles. Conexión Directa:

- Sistema de doble acumulador en serie para servicio a instalaciones hoteleras.
- Incluye modelización de sistema solar y auxiliar, así como del sistema de distribución con recirculación.
- Cálculo de pérdidas en primario, acumulación y recirculación
- Perfil de consumo global

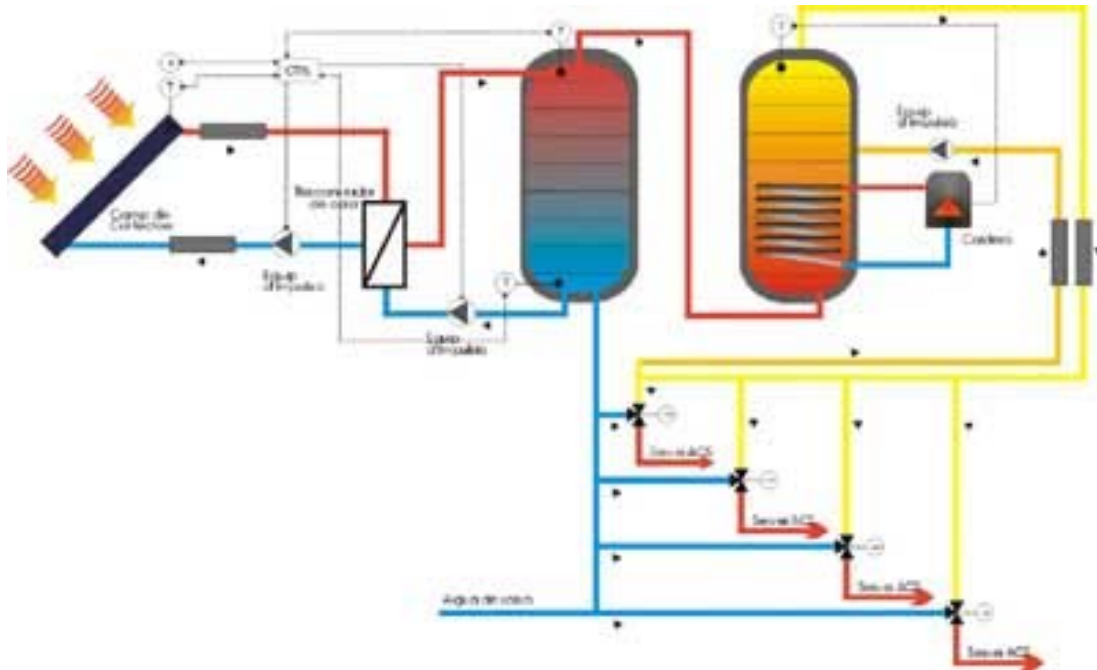


Figura 3.4 Hoteles: Conexión directa

Hoteles. Conexión Indirecta:

- Sistema de doble acumulador en serie, con conexión indirecta entre sistema solar y auxiliar para servicio a instalaciones hoteleras.
- Incluye modelización de sistema solar y auxiliar, así como del sistema de distribución con recirculación.
- Cálculo de pérdidas en primario, acumulación y recirculación
- Perfil de consumo global

3.2.2.2. Sistemas para instalaciones domésticas:

Vivienda unifamiliar:

- Sistema integrado en un único acumulador solar y auxiliar con doble serpentín, para servicio a instalaciones domésticas pequeñas.
- Incluye modelización de sistema solar y auxiliar, así como del sistema de distribución.

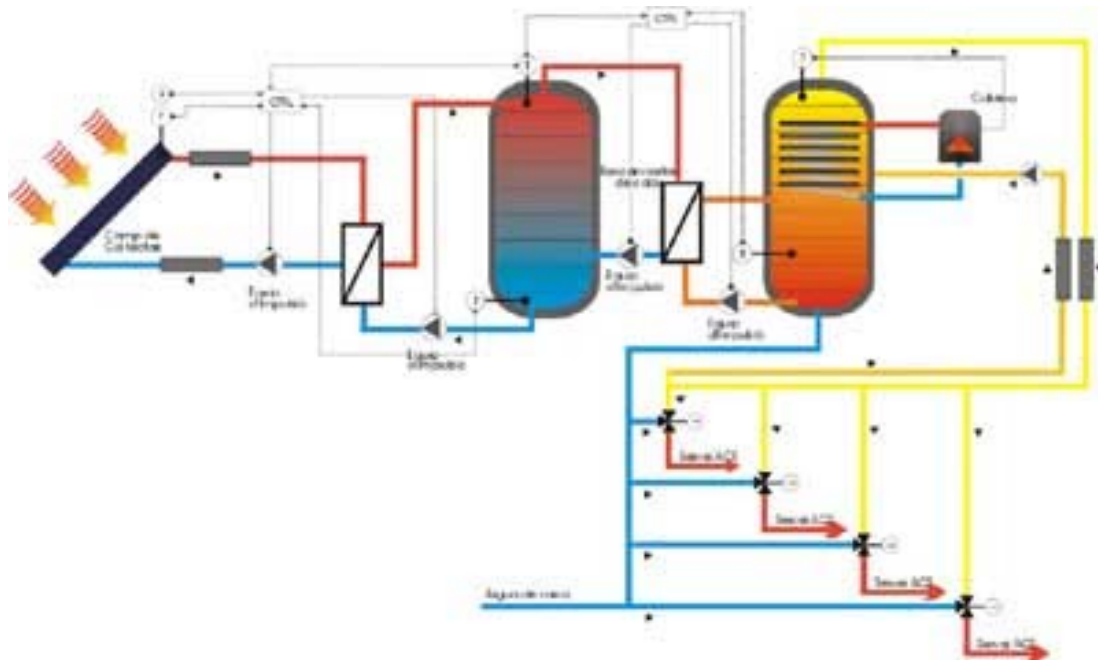


Figura 3.5 Hoteles: Conexión indirecta

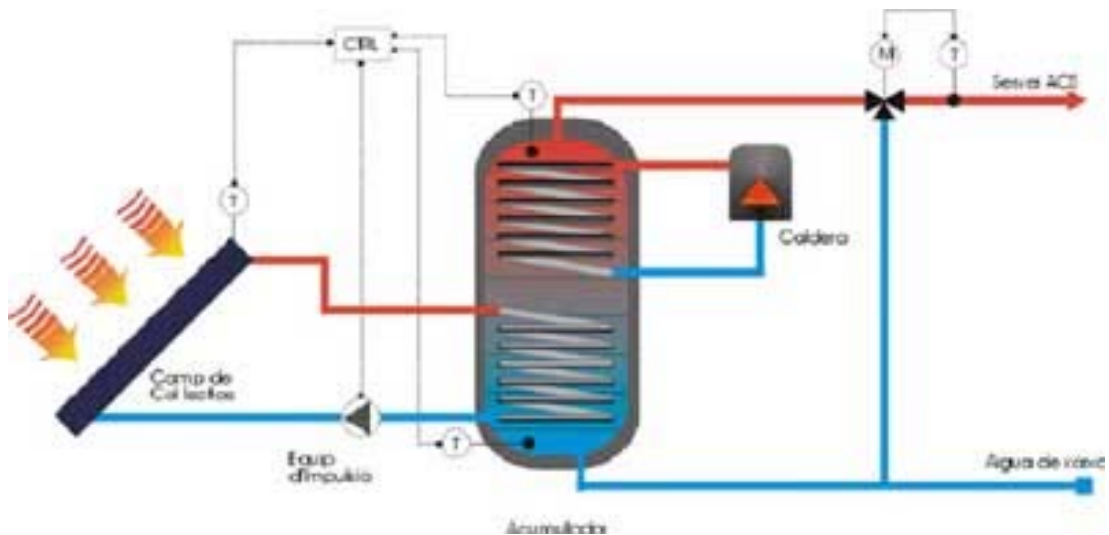


Figura 3.6 Vivienda unifamiliar



Vivienda plurifamiliar:

- Sistema de múltiples acumuladores descentralizados, uno por vivienda, con campo de colectores centralizado, para servicio a múltiples viviendas.
- Incluye modelización de sistema solar y auxiliar, así como del sistema de distribución con recirculación y del control de carga de los acumuladores.
- Múltiples perfiles de consumo.
- Puede incorporar sistema auxiliar en serie o resistencia eléctrica en acumulador.

3.3. MÉTODOS DE CÁLCULOS SIMPLIFICADOS

Son programas simples que consideran condiciones estacionarias invariables y que se utilizan casi exclusivamente para producción de agua caliente sanitaria. Son de utilidad para determinar el comportamiento global de una instalación pero no para analizar el funcionamiento detallado de un determinado componente. A partir del captador solar, de la superficie de captación instalada, de la inclinación y orientación de los captadores, del volumen de acumulación solar y del consumo de agua caliente calculan las producciones energéticas de la instalación, expresando los resultados normalmente con valores diarios medios mensuales. No son de aplicación para estimar el comportamiento de una instalación bajo determinadas condiciones específicas y durante periodos de tiempo más pequeños. En general solamente pueden considerar algunas de las configuraciones de instalaciones solares térmicas utilizadas en la actualidad, de entre este tipo de programas destaca el método de cálculo f-Chart.

3.3.1. Método f-Chart

Es un programa muy extendido y usado en instalaciones solares térmicas destinadas a la producción de agua caliente sanitaria y calefacción. Esta basado en correlaciones obtenidas de múltiples datos experimentales. Aporta normalmente resultados anuales bastantes adecuados. Este método proporciona como resultado final, el rendimiento del sistema térmico solar. De manera que a partir de él, puede estimarse la aportación de energía auxiliar necesaria y realizar el estudio económico de la instalación. Este programa se suele usar para aplicaciones residenciales donde las configuraciones utilizadas no tienen una gran complejidad.

La principal variable de diseño es el área del captador, siendo variables secundarias el tipo de captador, capacidad de almacenamiento, relación de caudales, etc. El método, es una correlación de los resultados de cientos de simulaciones de rendimiento térmico de sistemas solares, donde las condiciones de simulación fueron modificadas dentro de los rangos apropiados de diseño práctico. El resultado de la correlación será **f**, fracción de carga mensual suministrada por energía solar. Este factor se obtendrá como función de

dos parámetros adimensionales. Uno relaciona las pérdidas del colector con la carga que debe combatir y el otro relaciona la energía absorbida con la carga a combatir.

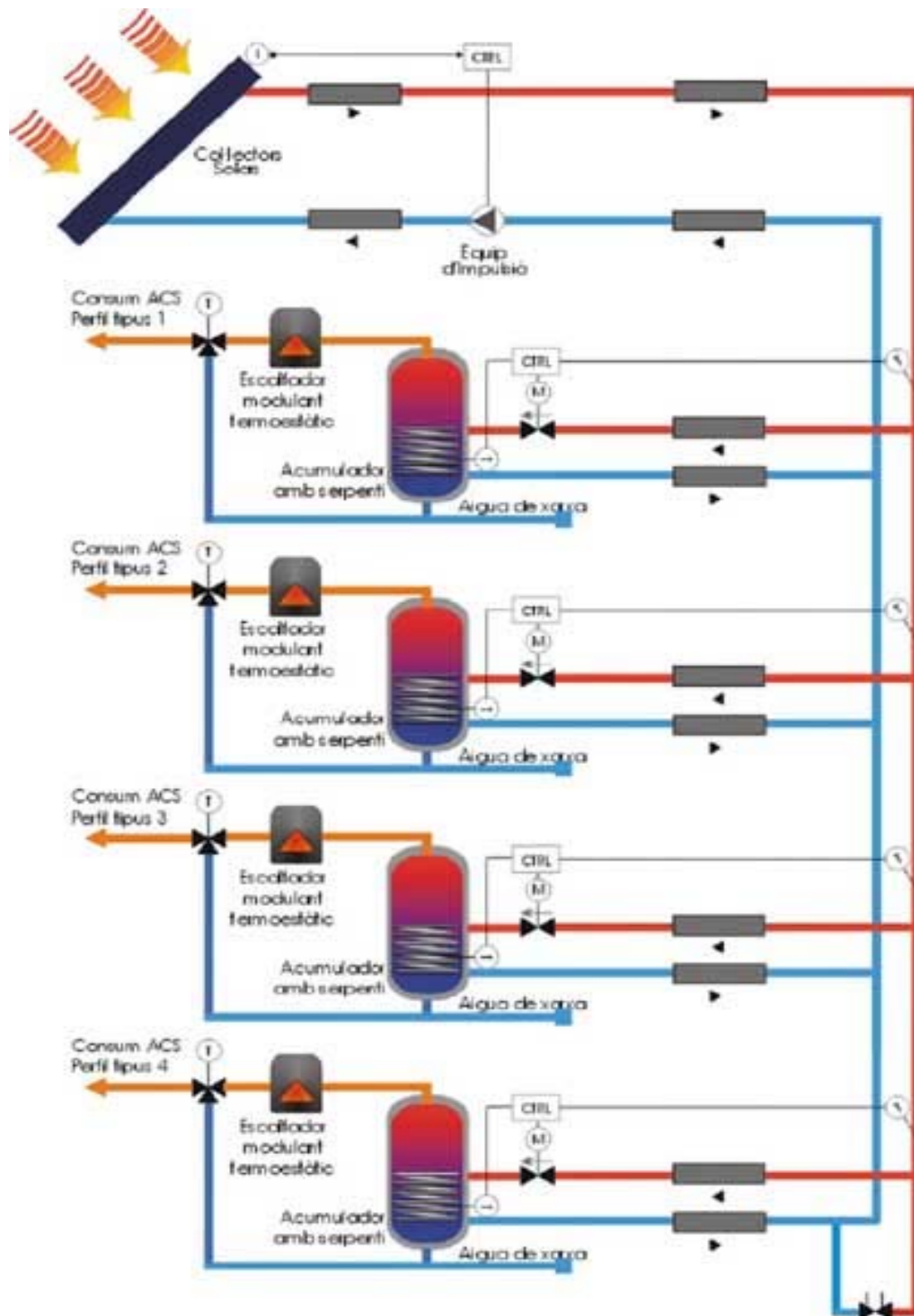


Figura 3.7 Vivienda plurifamiliar



El método de f-chart está basado en datos diarios mensuales; considera sistemas de calefacción y producción de A.C.S., donde la carga de A.C.S. es inferior al 20 % de la carga de calefacción. El método se desarrolla para un sistema base de energía solar, sin intercambiador de calor en el circuito de captación y con una capacidad de acumulación de 75 l/m² de superficie de captación.

Se considera la hipótesis de que las pérdidas en base mensual son despreciables.

$$Q_T + E_{aux} = L + P \cong L \quad (P \ll Q) \quad (3.5)$$

donde:

$Q_T =$	Energía solar útil captada (J/mes)
$E_{aux} =$	Energía auxiliar consumida (J/mes)
$L =$	Demanda térmica (J/mes) (Demanda de calefacción más A.C.S.)
$P =$	Pérdidas en transporte y acumulación
(J/mes)	

Los rangos de los parámetros de diseño usados en sistemas de líquido y aire son:

$$0,6 < (\tau\alpha)_n < 0,9 \quad (3-5)$$

$$5 < F_R' A_C < 120 m^2 \quad (3-6)$$

$$2,1 < U_L < 8,3 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C} \quad (3-7)$$

$$30^\circ < \beta < 90 \quad (3-8)$$

$$83 < (UA)_h < 667 \frac{W}{^\circ C} \quad (3-9)$$

La simulación detallada de estos sistemas ha sido usada para desarrollar la correlación entre las variables adimensionales y f, la fracción mensual de cargas suministrada por energía solar. Los dos grupos adimensionales son:

$$X = \frac{A_C F_R' U_L (T_{ref} - \bar{T}_a) \cdot \Delta t}{L} \quad (3-10)$$



$$Y = \frac{A_C F'_R (\overline{\tau\alpha}) \overline{H}_T N}{L} \quad (3-11)$$

donde:

A_C :	Área del captador (m^2)
F'_R :	Factor de eficiencia colector – intercambiador de calor
U_L :	Coefficiente de pérdidas total ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
Δt :	Número de segundos en un mes
$\overline{T}_a$:	Temperatura media mensual ($^\circ C$)
T_{ref} :	Temperatura de referencia experimental, fijada en $100^\circ C$
L :	Carga mensual total (J)
$\overline{H}_T$:	Media mensual de radiación diaria incidente sobre la superficie del colector por unidad de área (J/m^2)
N :	Número de días del mes
$(\overline{\tau\alpha})$:	Media mensual del producto transmitancia – Absortancia

Las ecuaciones anteriores pueden describirse y quedan de la siguiente manera:

$$X = F_R U_L \cdot \frac{F'_R}{F_R} \cdot (T_{REF} - \overline{T}_a) \cdot \Delta t \cdot \frac{A_C}{L} \quad (3-12)$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \cdot \frac{F'_R}{F_R} \cdot \frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n} \cdot \overline{H}_T \cdot N \cdot \frac{A_C}{L} \quad (3-13)$$

Estos grupos adimensionales, como ya se ha mencionado anteriormente tienen un significado físico:

Y expresa la relación entre la energía absorbida en la superficie de la placa captadora y la carga total durante un mes.

X expresa la relación entre las pérdidas de energía del captador para una temperatura de referencia y la carga de calentamiento durante un mes.

Para sistemas térmicos solares con captadores líquidos, la fracción f de la carga mensual total suministrada por el sistema solar se presenta en forma gráfica, como función de las variables adimensionales X e Y.

La relación que se presenta en forma gráfica puede también expresarse en forma de ecuación:



$$f = 1,029Y - 0,065X - 0,245Y^2 + 0,0018^2 + 0,02315Y^3 \quad (3-14)$$

Para $0 < Y < 3$ y $0 < X < 18$

Para un mes determinado, la contribución solar se obtiene multiplicando fracción f por la carga mensual para ese mes. Conocidas las aportaciones mensuales la fracción anual se obtiene de,

$$F = \frac{\sum f_i L_i}{\sum L_i} \quad (3-15)$$

Si se quisiera determinar el área óptima de colector, deberíamos obtener la fracción anual de carga aportada por energía solar para diferentes áreas de colector.

3.3.1.1.Demanda de A.C.S.

Se define la demanda como el consumo de agua caliente para higiene persona y otros usos como lavado de ropa o vajilla. La cuantificación de la demanda de A.C.S., viene por la ecuación:

$$L_{ACS} = M_{AC} \cdot \rho \cdot Cp \cdot (T_{ac} - T_{af}) \cdot N \quad (3-16)$$

donde:

M_{ac} =	Consumo de agua caliente (l/día)
ρ =	Densidad del agua (1 kg/l)
Cp =	Calor específico del agua (4.190 J/kg °C)
T_{ac} =	Temperatura del agua caliente (°C)
T_{af} =	Temperatura del agua fría (°C)
N =	Número de días del mes (día/mes)

3.3.1.2.Corrección por Almacenamiento

El método f-Chart se desarrolló para una capacidad de almacenamiento de 75l/m². Este método puede utilizarse para estimar el rendimiento de sistemas con otra capacidad de almacenamiento modificando el grupo adimensional X por el factor de corrección de almacenamiento siguiente,

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{M}{75} \right)^{-0,25} \quad (3-17)$$

para $37,5 < M < 300$



donde M es el volumen de almacenamiento en litros de agua por metro cuadrado de superficie captadora.

A continuación se presenta este factor en forma gráfica. En la gráfica se observa como aumenta el rendimiento al aumentar la capacidad de almacenamiento. En este sentido vemos que no se consigue un incremento que pueda llegar a justificar los gastos de incrementar dicha capacidad.



Gráfico 3-1. Rendimiento del sistema frente a capacidad de almacenamiento

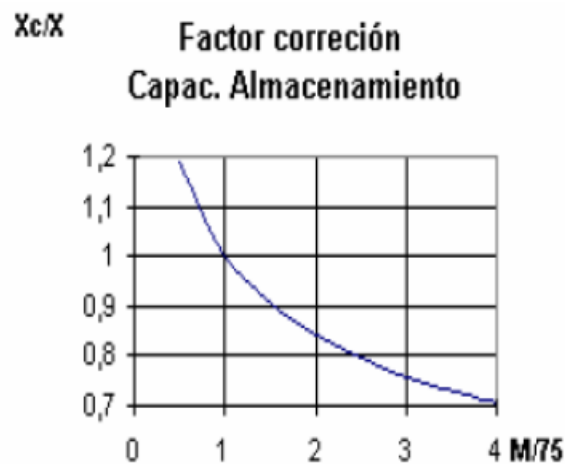


gráfico 3-2. Factor de corrección debido a la capacidad de almacenamiento



3.3.1.3. Corrección por el Intercambiador de Calor

El método de f-chart está desarrollado para un sistema el cual no lleva un intercambiador de calor. Si existe un intercambiador de calor en el circuito primario, se corrigen los grupos adimensionales X e Y a través del factor F_R , en función de la efectividad del intercambiador y de las capacidades caloríficas de los fluidos.

Se define un captador equivalente ($F'_R(\tau\alpha)$, $F'_R U_L$) de una instalación equivalente sin intercambiador de calor en el circuito de captación.

$$\frac{F'_R}{F_R} = \left[1 + \frac{F_R \cdot U_L}{G \cdot C_p} \left(\frac{G C_p}{\varepsilon (M C_p / A)_{\min}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (3-18)$$

$$M_p (kg / s) = G (kg / s \cdot m^2) \cdot A (m^2) \quad (3-19)$$

Donde:

ε_L = Efectividad de un intercambiador de calor agua-aire.

3.3.1.4. Corrección por el Consumo de A.C.S.

El método se ha desarrollado para instalaciones donde la carga de A.C.S. es inferior al 20% de la carga de calefacción. Si este porcentaje es superior se corrige el grupo adimensional X mediante la ecuación:

$$\frac{X_c}{X} = \frac{11,6 + 1,18 \cdot T_{ac} + 3,86 \cdot T_{af} - T_{a_m}}{100 - T_{a_m}} \quad (3-20)$$

donde:

$T_{ac} =$	Temperatura agua caliente (°C)
$T_{af} =$	Temperatura agua fría (°C)
$T_{a_m} =$	Temperatura media mensual exterior (°C)

3.3.1.5. Corrección por conexionado

Por último se considera el efecto producido por la asociación de los captadores. En la conexión en PARALELO todos los colectores funcionan bajo las mismas condiciones, con lo cual la aplicación del método es inmediata.

Cuando se tienen conexiones en SERIE, en cambio, las temperaturas de entrada del fluido varían de un captador a otro. Para poder aplicar el método f-chart habrá que modificar los parámetros del captador y el caudal que recorre la instalación. Así pues, si



existen dos captadores en serie, un simple balance de energía nos proporcionará la relación entre los parámetros de los captadores y los parámetros globales:

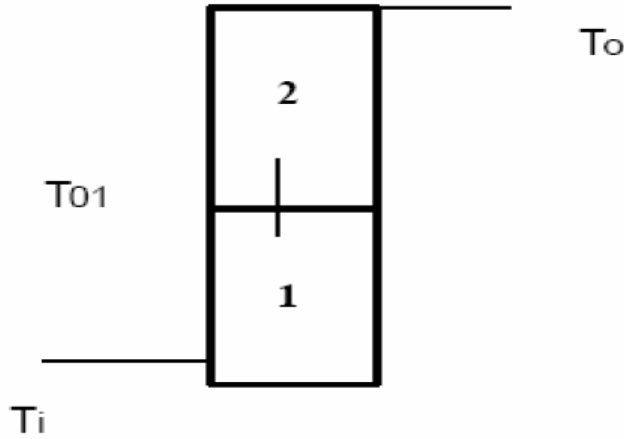


Figura 3.8

El calor útil total transferido será el siguiente:

$$Q_{u,1} + Q_{u,2} = A_1 F_{R1} [(\tau\alpha)_1 I_T - U_{L1} (T_i - T_a)] + A_2 F_{R2} [(\tau\alpha)_2 I_T - U_{L2} (T_{01} - T_a)] \quad (3-21)$$

Planteando un balance de energía en el captador 1 se obtiene la siguiente relación entre las temperaturas:

$$T_{01} = T_i + \frac{Q_{u,1}}{\dot{m} \cdot Cp} \quad (3-22)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene,

$$Q_{u,1+2} = [A_1 F_{R1} (\tau\alpha)_1 \cdot (1 - K) + A_2 F_{R2} (\tau\alpha)_2] I_T - [A_1 F_{R1} U_{L1} (1 - K) + A_2 F_{R2} U_{L2}] (T_i - T_a) \quad (3-23)$$

donde:

$$K = \frac{A_2 F_{R2} U_{L2}}{\dot{m} \cdot Cp} \quad (3-24)$$



Esta ecuación sugiere considerar la asociación de dos captadores en serie como un único captador con unos parámetros que en el caso particular en que ambos colectores sean iguales (el más habitual), toman los siguientes valores:

$$A = A_1 + A_2 = 2 \cdot A_1 \quad (3-25)$$

$$F_R(\tau\alpha) = F_{R1}(\tau\alpha)_1 \cdot \left(1 - \frac{K}{2}\right) \quad (3-26)$$

$$F_R U_L = F_{R1} U_{L1} \cdot \left(1 - \frac{K}{2}\right) \quad (3-27)$$

La generalización a N colectores en serie es inmediata.



4. CARACTERÍSTICAS DE LAS SIMULACIONES

4.1. INTRODUCCIÓN

Dentro de este capítulo, se definen todos los parámetros necesarios para realizar las simulaciones. En primer lugar se resumen las instalaciones a simular, seguido de los equipos que forman parte de las mismas, así como las condiciones climatológicas y de operación.

4.2. INSTALACIONES

Las instalaciones a estudiar, son típicos ejemplos de captación de energía solar y distribución que podemos encontrarnos en las viviendas. Se van a estudiar tres configuraciones de sistemas de captación:

Sistemas Unifamiliares

Sistemas Multifamiliares Centralizados

Sistemas Multifamiliares Descentralizados

En los sistemas multifamiliares, se consideran edificios de diez viviendas, con cuatro personas por vivienda.

4.2.1. Sistema Unifamiliar

Este tipo de sistemas se suelen ubicar en viviendas unifamiliares, donde la demanda de energía térmica no es muy elevada. La superficie de captación es inferior a los 10 m² y dispone de un volumen máximo de acumulación de 400 litros.

La circulación es forzada, con lo cual dispondrá de un sistema de regulación. La transferencia de calor desde el sistema auxiliar se produce en un intercambiador situado en el interior del acumulador.

4.2.2. Sistema multifamiliar centralizado

Este tipo de sistema se da en conjuntos de viviendas. Dispone de un sistema de captación, con un intercambiador externo, donde es transferida la energía solar térmica al acumulador. La instalación lleva dos depósitos, uno donde se acumula la energía solar y otro de descarga de la energía, donde se encuentra ubicado el intercambiador del sistema auxiliar. Desde este último depósito sale la red de tuberías para la distribución en todo el edificio.



Dispone de una red de recirculación, para mantener la temperatura de la red la máxima posible. Se debe tener en cuenta los coeficientes de simultaneidad, contemplados en la norma UNE – EN 94002:2004.

4.2.3. Sistema multifamiliar descentralizado

La configuración de este sistema, es una mezcla de las dos configuraciones anteriores. Se dispone de un único campo de captadores para todas las viviendas, pero el sistema de acumulación es individual en cada vivienda. Se dispone de una red de tuberías que distribuye el fluido caloportador en todas las viviendas. En este caso no se considera el coeficiente de simultaneidad para el cálculo del volumen del depósito.

4.3. PARÁMETROS PARA LA SIMULACIÓN

Dentro del programa de simulación TRANSOL, antes de iniciar una simulación se debe introducir una serie de parámetros de diseño de las instalaciones y equipos. El programa tiene por defecto algunos de éstos introducidos. Estos datos pueden modificarse a través de la interfaz que presenta al arrancar el programa o modificando los parámetros definidos internamente dentro de éste.

Los parámetros por defecto modificables son:

- Parámetros del captador solar por defecto
- Determinación de la demanda de los consumidores
- Perfil anual de la temperatura del agua de red
- Perfil anual de la demanda
- Inclinación y orientación de los captadores

Dentro de los parámetros que no son modificables directamente desde el interfaz se encuentra el *perfil de consumo diario*. TRANSOL lee siempre un único fichero de perfiles de consumo normalizado semanalmente (de forma que el consumo semanal sea el equivalente de multiplicar el consumo de un día por los siete días que tiene una semana, pero no por eso el consumo de un día laborable y un festivo tiene que ser el mismo), para cada tipo de consumo.

4.3.1. Parámetros del captador solar

Los parámetros del captador, se pueden modificar a través de una de las ventanas que posee el programa. Los parámetros que se han tomado para el captador solar, son valores normales de un captador comercial cualquiera, como se pueden apreciar en la Tabla 4-1. Algunos de los parámetros que aparecen en la interfaz son los siguientes.



Parámetros del captador	
Superficie Absorción	1 m ² /captador
$\eta_{\text{ÓPTICO}}$	0,794
Coefficiente pérdidas 1 ^{er} Orden	3,880 W/m ² ·K
Coefficiente pérdidas 2 ^o Orden	0,010 W/m ² ·K ²
Modificador ángulo incidencia	0,09
Caudal de diseño	159 Kg. / h. m ²
Caudal de campo	50 Kg. / h. m ²

Tabla 4-1

Se ha tomado la superficie de absorción de un metro para facilitar la introducción de la superficie de captación necesaria.

4.3.2. Determinación de la demanda

En este proyecto, como se ha dicho anteriormente, se van a comparar los resultados de distintos tipos de configuraciones.

El cálculo de la demanda de energía, se considera, junto a las condiciones climatológicas locales y a la fracción solar deseada, como parámetro básico del dimensionamiento de una instalación. La demanda depende del tipo de instalación. En principio, se define la ocupación de cada una de las instalaciones, para obtener la demanda.

Configuración	Número de Viviendas
Sistema Unifamiliar	1
Sistema Multifamiliar	10

Tabla 4-2

Cada familia está constituida por cuatro miembros. Cada miembro, según la norma UNE- EN 94002:2004, consume diariamente una media de 40 litros por persona en una vivienda. El consumo unitario diario medio de agua caliente sanitaria está asociado a una temperatura de 45°C.



Configuración	Nº de Personas	Consumo unitario (l/persona)	Consumo total (l/día)
V. Unifamiliar	4	40	160
V. Multifamiliar	40	40	1600

Tabla 4-3

En configuraciones multifamiliares centralizadas, el cálculo del consumo total de agua caliente sanitaria considera un factor de centralización que depende del número de viviendas alimentados por la misma instalación solar. Para nuestro caso, el factor de centralización es de 0,95.

Con esto, el consumo total final que disponemos es el representado en la Tabla 4-4.

Configuración	Consumo total (l/día)
V. Unifamiliar	160
V. Multifamiliar centralizado	1520
V. Multifamiliar descentralizado	1600

Tabla 4-4

4.3.3. Perfil anual de la temperatura del agua de red

La temperatura diaria media mensual del agua fría de red, varía en función de la capital de provincia. En la Tabla 4-5 se resume la evolución de la temperatura en función de los meses del año y de las provincias.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Almería	12	12	13	14	16	18	20	20	19	16	13	12
Cádiz	12	12	13	14	16	18	19	20	19	15	11	9
Córdoba	10	11	12	14	16	19	21	21	19	16	12	10
Granada	8	9	10	11	14	16	19	18	17	14	10	9
Huelva	12	12	13	14	16	18	20	20	19	17	14	12
Jaén	9	10	11	13	16	19	21	21	19	15	12	9
Málaga	12	12	13	14	16	18	20	20	19	16	14	12
Sevilla	11	11	13	14	16	19	21	21	20	16	13	11

Tabla 4-5



4.3.4. Perfil anual de la demanda

El perfil anual de la demanda permite tener en cuenta la variación del consumo de agua caliente con el mes.

Un sobredimensionamiento de la instalación para cubrir toda o casi toda de ésta durante los meses de menor radiación solar, nos llevará a disponer de una gran cantidad de agua caliente sanitaria en los meses de verano, llegando a producirse su vaporización, ocasionando deterioros en la instalación. Por ello, se debe llegar a tener conocimiento de la demanda que se va a disponer a lo largo del año.

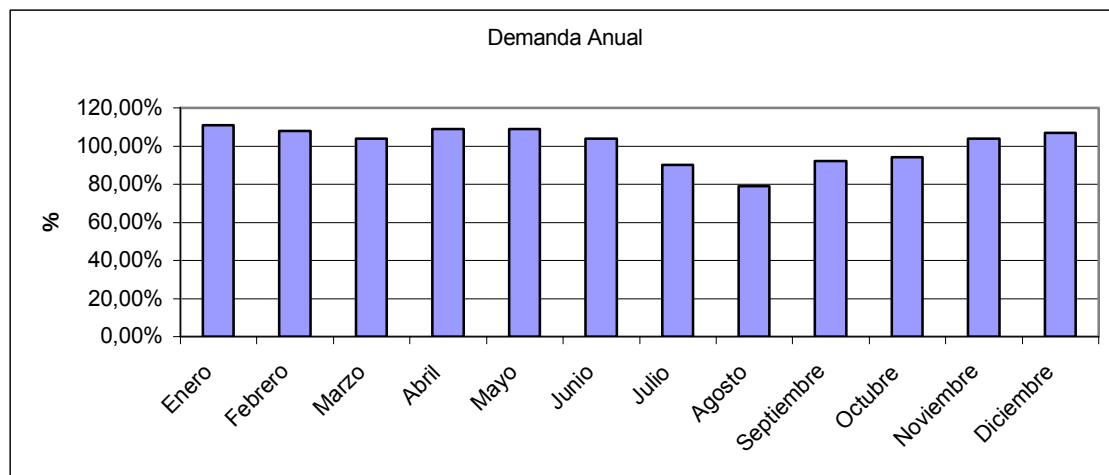


Gráfico 4-1

Tal como se aprecia en el Gráfico 4-1, se aprecia que durante los meses de invierno, menor radiación solar, se produce un aumento de la demanda. Ello viene influenciado por la menor temperatura de agua de red. En los meses de verano, mayor incidencia de radiación solar, apreciamos una disminución de la demanda. A su vez, esto viene influenciado por la mayor temperatura del agua de red y por las exigencias físicas de requerir agua caliente sanitaria.

4.3.5. Inclinación y orientación de los paneles

Para el correcto dimensionamiento de una instalación solar, los captadores solares deben tener una orientación y una inclinación, que haga máxima la captación de la radiación solar, en función del uso estacional de la instalación.

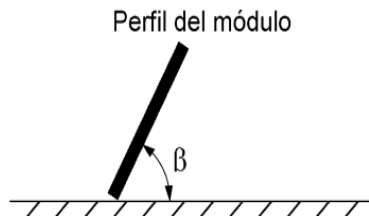


Figura 4.1

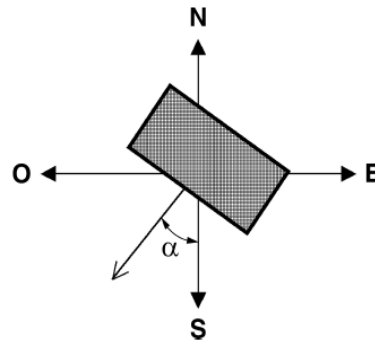


Figura 4.2

Se define:

Ángulo de inclinación β : Ángulo que forma la superficie de los módulos con el plano horizontal (Figura 4.1). Su valor es 0° para módulos horizontales y 90° para verticales.

Ángulo de azimut α : Ángulo entre la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del módulo y el meridiano del lugar (Figura 4.2). Valores típicos son 0° para módulos orientados al sur, -90° para módulos orientados al este y $+90^\circ$ para módulos orientados al oeste.

La orientación de los captadores para cada una de las ciudades donde se van a realizar las simulaciones, corresponde a un ángulo de azimut de 0° , es decir, orientados al sur.

La inclinación de los captadores solares, va a depender de la aplicación.

Para el caso de instalaciones, donde su uso se vaya a dar preferentemente en los meses de verano, se opta por una inclinación de 15° , debido a que la radiación solar incidente en estos meses es mayor.

Para el caso de instalaciones, donde su uso se vaya a dar preferentemente en los meses de invierno, se opta por una inclinación mayor, de 60° , ya que para los meses de invierno, con esta inclinación se favorece la mayor incidencia.

Para una instalación en la cual, su uso se vaya a dar a lo largo de todo el año, se opta por una inclinación igual a la latitud del lugar, porque las radiaciones incidentes son mayores, que en los otros dos casos.

Los casos anteriores se pueden apreciar en la Figura 4.3. La inclinación de 0° , no se suele utilizar debido a que está expuesta a un mayor ensuciamiento.



Para el caso de nuestras simulaciones, como el uso de la instalación es prácticamente el mismo a lo largo del año, se opta por una inclinación de los captadores solares, que coincida con la latitud del lugar.

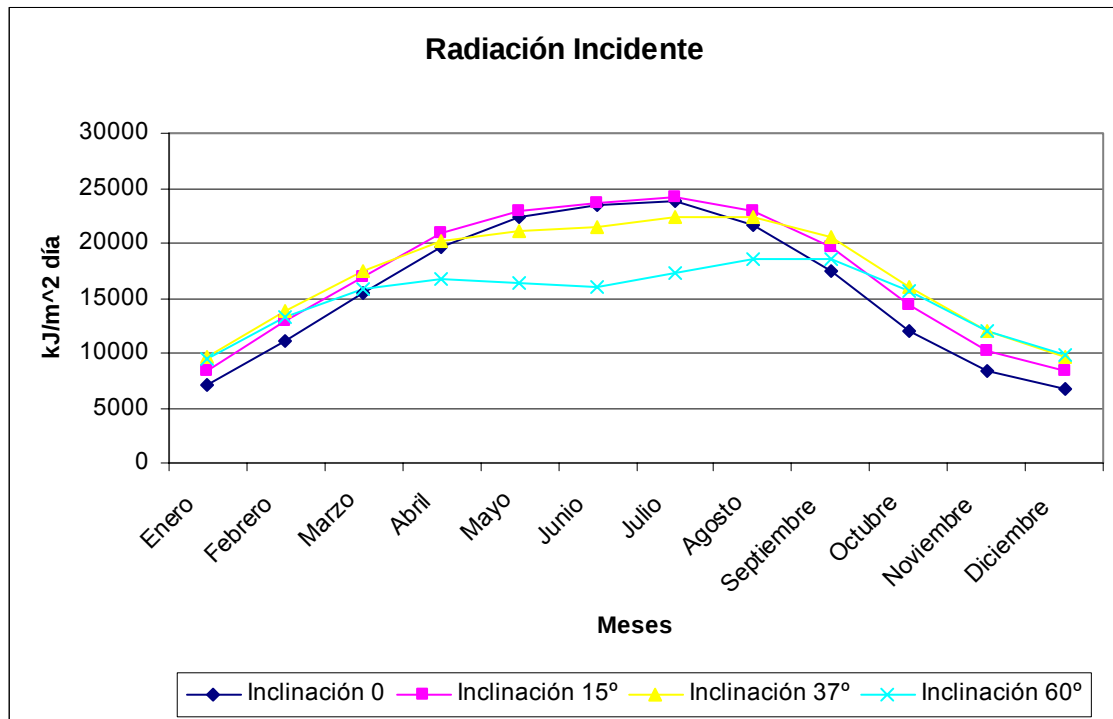


Figura 4.3

Ciudad	Latitud	Inclinación
Almería	36,84°	37°
Cádiz	36,50°	37°
Córdoba	37,84°	38°
Granada	37,19°	37°
Huelva	37,26°	37°
Jaén	37,78°	38°
Málaga	36,67°	37°
Sevilla	37,37°	37°

Tabla 4-6

4.3.6. Perfil diario de consumo de la demanda



El consumo a lo largo del día en una vivienda, está distribuido en unos periodos concretos del día, debiendo distinguir que porcentaje del consumo diario se produce a lo largo del día. El mismo programa, permite realizar una distinción del consumo que se puede dar en un día laborable y en un día festivo o fin de semana. Por ello, disponemos de dos casos distintos, tal como aparecen en los Gráfico 4-2 y Gráfico 4-3.

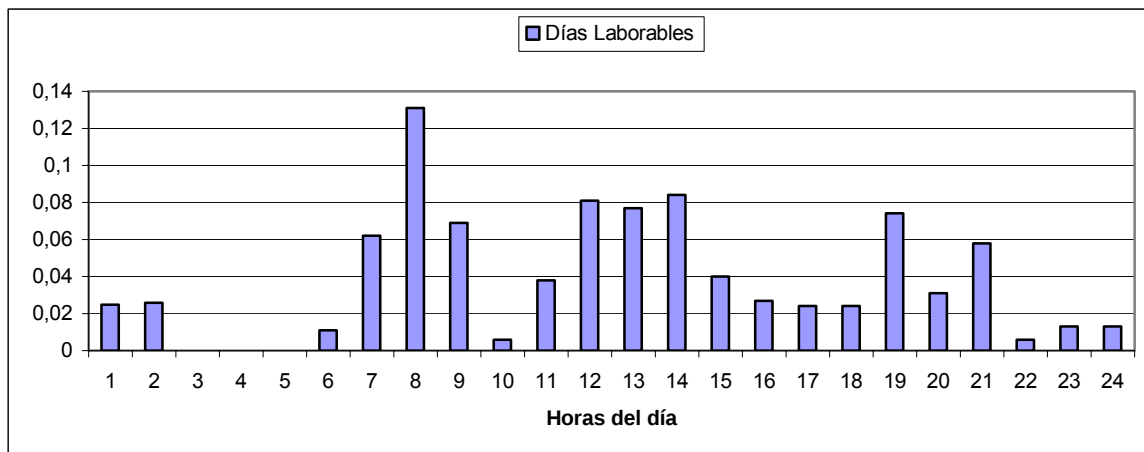


Gráfico 4-2

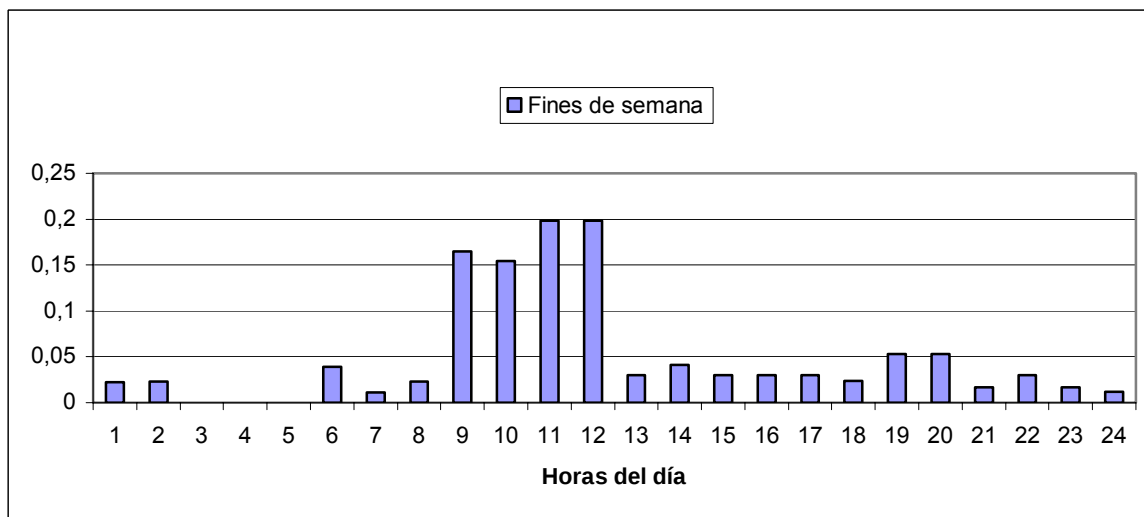


Gráfico 4-3



Comparando los perfiles horarios, se aprecia que en un día laborable, existen tres zonas de consumo de agua caliente sanitaria, que son la mañana, el medio día y la tarde noche. En cambio en un fin de semana o día festivo, se aprecia un mayor consumo durante la mañana, retrasando las horas de requerimiento de agua caliente sanitaria, frente a un día laborable. A lo largo del día, se tiene un consumo prácticamente constante.

4.4. ESPECIFICACIONES PROGRAMA PROSOL

Para la determinación de la superficie de captadores y del volumen de acumulación, seguiremos las instrucciones que nos indican el programa PROSOL.

El área total de captadores estará comprendida entre los siguientes valores:

$$60 \leq \frac{M}{A} \leq 100 \quad (4-1)$$

donde:

A = área de captadores en m²

M = carga de consumo en litros/día

El volumen de acumulación solar cumplirá la siguiente condición:

$$0,8 \leq \frac{V}{M} \leq 1,2 \quad (4-2)$$

donde:

V = es la capacidad del acumulador solar, en litros.

En todos los casos la carga de consumo diario, M, se referirá al valor medio diario anual cuando el consumo sea constante a lo largo del año o a los valores medios diarios de los meses estivales cuando sea variable a lo largo del año.

Cuando por razones justificativas no se instale toda el área de diseño, el volumen de acumulación solar cumplirá la siguiente condición:

$$50 \leq \frac{V}{A} \leq 120 \quad (4-3)$$



Para instalaciones con fracciones solares bajas, se deberá considerar el uso de relaciones V/A pequeñas y para instalaciones con fracciones solares elevadas se deberá aumentar dicha relación.



5. RESULTADO DE LAS SIMULACIONES

5.1. INTRODUCCIÓN

Como se comentó en el capítulo 1, este proyecto tiene el propósito de estudiar distintas configuraciones solares térmicas de baja temperatura en distintas provincias, variando los parámetros que definen a una instalación, como el área de captación y el espesor de aislamiento.

5.2. INFLUENCIA DE LA TIPOLOGÍA DE LA INSTALACIÓN

En este apartado, se analiza la diferencia existente entre distintas configuraciones de instalaciones solares, descritas en el capítulo 4, en cada una de las capitales de provincia de Andalucía.

En primer lugar, se definen los parámetros de área de captadores y volumen de acumulación. Se parte de las especificaciones para el área y volumen en función de la demanda, definidos por las ecuaciones 4-1 y 4-2 del capítulo 4. Para cada caso se tomará los puntos medios, obteniéndose unas relaciones entre áreas y los volúmenes de acumulación con la demanda de cada instalación.

Con estos ratios, se obtendrá la evolución de la fracción solar y del rendimiento del captador para cada una de las provincias en función de los tres tipos de instalaciones. Con ello se analiza cual la mejor instalación a instalar en cada una de las provincias. Las simulaciones se realizan para un perfil horario fijo.

En un primer lugar, es necesario definir los ratios entre el área, volumen de acumulación y la demanda. Tomando los puntos medios de las ecuaciones 4-1 y 4-2, se obtienen los siguientes ratios:

$$\frac{M}{A} = 80 \quad (5-1)$$

$$\frac{V}{M} = 1 \quad (5-2)$$

Al disponer de las demanda de cada una de las instalaciones, se calculan las áreas y volúmenes (Tabla 5-1).



Sistema	Demanda (m ³ /día·sistema)	Área (m ²)	Volumen Acumulador (m ³)
Vivienda Unifamiliar	0,160	2	0,160
Multivivienda Centralizada	1,52	19	1,52
Multivivienda descentralizada *	1,60	20	0,16

Tabla 5-1

En los sistemas multivivienda descentralizados, para calcular el área de captadores, se considera la demanda de todo el conjunto de viviendas, pero como cada vivienda dispone de un volumen de acumulador independiente, el volumen de éste corresponde a la demanda de cada vivienda.

Los casos de multivivienda centralizada y descentralizada están definidos para diez viviendas.

Con los datos de demanda y superficie de captación definidos para cada uno de los casos anteriores, se simula la instalación, obteniéndose los resultados resumidos en la Tabla 5-2.

Provincia	Vivienda Unifamiliar		Multivivienda Centralizado		Multivivienda Descentralizado	
	F %	η %	F %	η %	F %	η %
Almería	47,39	19,63	65,15	30,65	62,58	29,24
Cádiz	47,11	20,45	62,78	32,67	62,89	29,78
Córdoba	45,37	19,74	58,79	32,55	60,86	30,27
Granada	47,51	20,95	63,37	35,95	62,34	31,49
Huelva	42,11	18,33	62,00	32,85	64,97	31,52
Jaén	47,57	20,08	62,52	32,40	63,43	30,38
Málaga	45,14	19,92	60,54	32,36	61,32	29,89
Sevilla	46,36	20,36	60,76	32,60	61,20	30,06

Tabla 5-2

En las Gráficas 5.1 a 5.3 se representan los resultados anteriores.

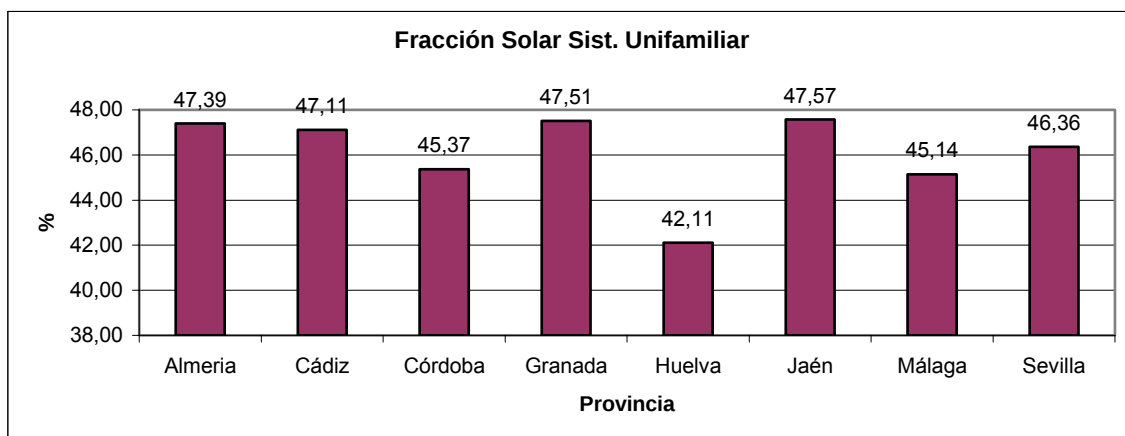


Gráfico 5-1

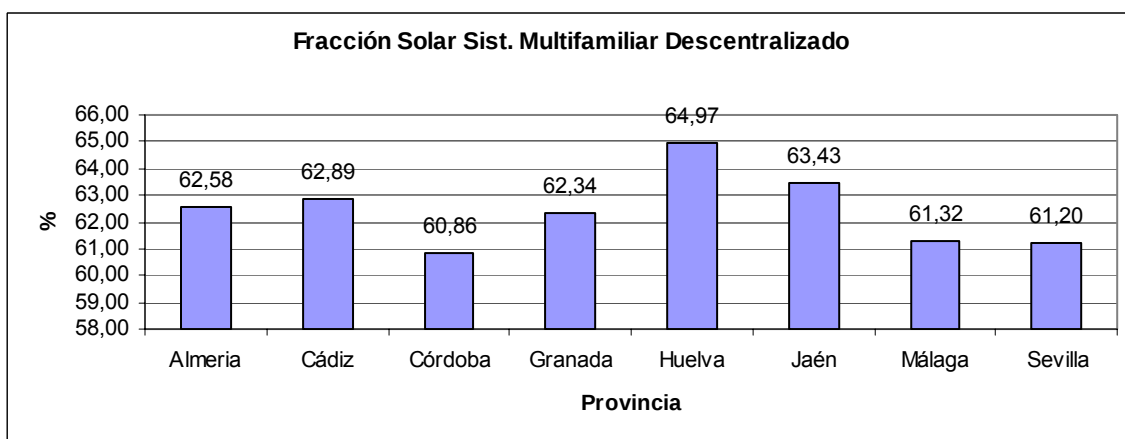


Gráfico 5-2

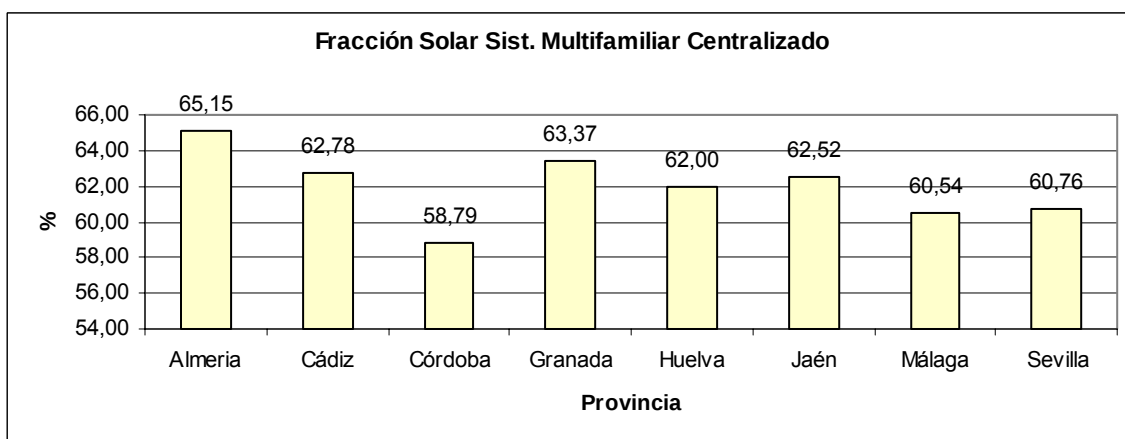


Gráfico 5-3



Como se aprecia en los Gráfico 5-2 y Gráfico 5-3, no se alcanza una diferencia relativa importante entre las instalaciones multifamiliares centralizadas y descentralizadas. Si se representa la diferencia entre ambos tipos de instalaciones, apreciamos un valor mínimo de 0,11 y un máximo de 2,97, en Cádiz y Huelva, respectivamente, tal como se aprecia en el Gráfico 5-4.

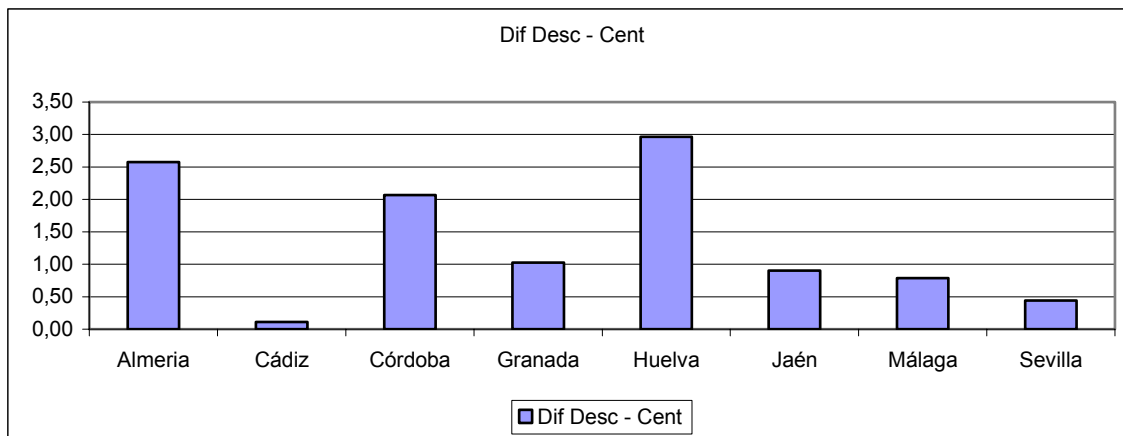


Gráfico 5-4. Diferencia Fracción Solar de Instalación descentralizada e Instalación centralizada.

Tal como se aprecia en el Gráfico 5-4, los valores de la fracción solar son mayores para el caso de una instalación descentralizada que para una instalación centralizada.



Comparando los resultados obtenidos en una instalación unifamiliar frente a los obtenidos en una instalación descentralizada, tal como se aprecia en el Gráfico 5-5, se observa un mejor comportamiento de los sistemas descentralizados.

A continuación, se estudia la evolución de los rendimientos medios de la instalación, para cada uno de las configuraciones estudiadas. Se ha definido el rendimiento medio del captador como el cociente entre la aportación solar del captador y la radiación solar incidente sobre él,

$$\eta = \frac{\text{Aportación}_\text{solar}_\text{al}_\text{consumo}}{\text{Radiación}_\text{Solar}_\text{Incidente}} \quad (5-3)$$

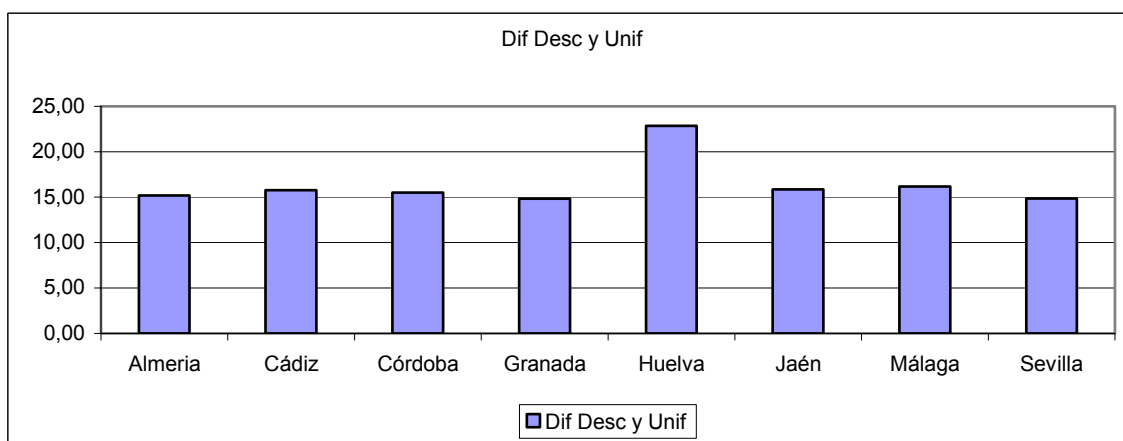


Gráfico 5-5 Diferencia Fracción Solar de Instalación descentralizada e Instalación unifamiliar.

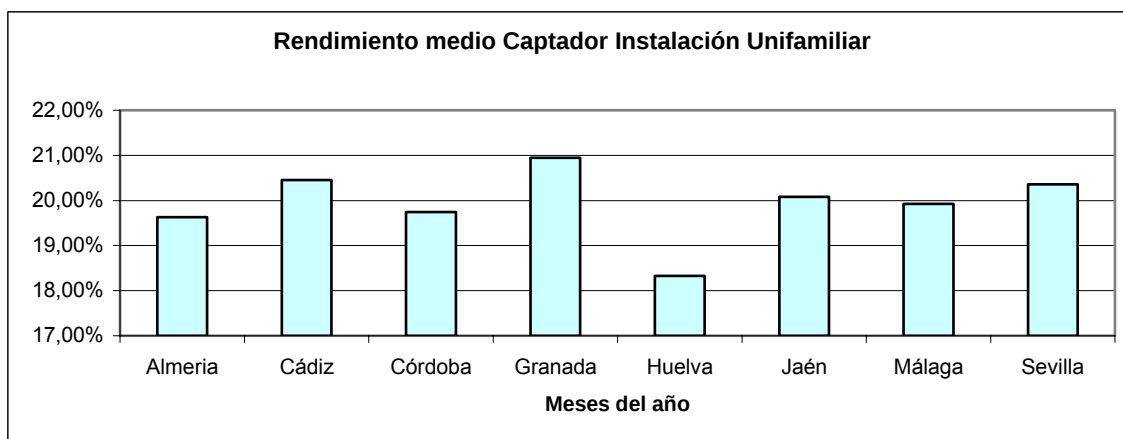


Gráfico 5-6



Los rendimientos para la configuración de instalaciones unifamiliares, se mantienen entorno al 20%. Exceptuando a la provincia de Huelva, donde se aprecia un rendimiento menor, algo inferior al 18,5%. La aportación al consumo en esta ciudad, es muy inferior al resto. La fracción solar de este tipo de instalación en esta ciudad, se aprecia que es inferior al resto de las instalaciones.

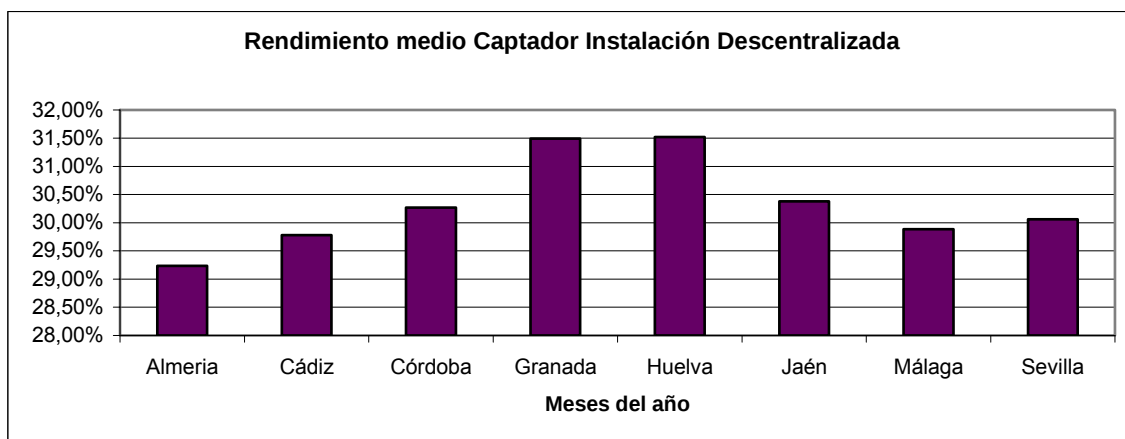


Gráfico 5-7

Para el caso de una instalación descentralizada, se obtienen unos rendimientos superiores al caso de instalaciones unifamiliares. Las ciudades de Huelva y Granada presentan los mayores rendimientos medios. La ciudad de Almería presenta un rendimiento inferior al resto de las ciudades.

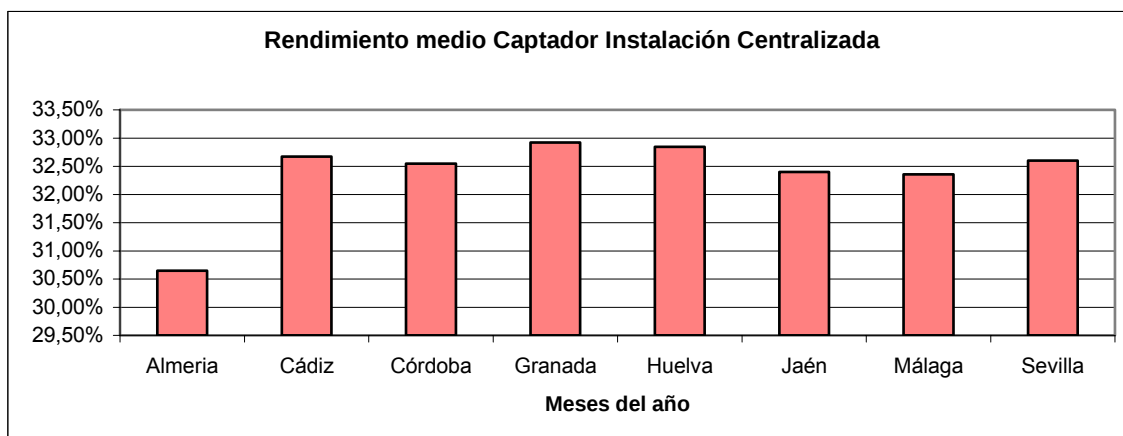


Gráfico 5-8

Para el caso de una instalación centralizada, los rendimientos medios, se mantienen prácticamente constantes, en comparación con las otras instalaciones. Se aprecia, que el rendimiento en comparación con los otros dos casos, es superior para este tipo de instalaciones.



5.3. INFLUENCIA DE LOS PERFILES HORARIOS

Los métodos tradicionales de cálculo, para el cálculo de la demanda toman una estimación del consumo medio diario, sin tener en cuenta la distribución del consumo a lo largo del día. Mediante el uso del programa TRANSOL, se puede introducir el porcentaje del consumo total diario en función del régimen horario y del día de la semana en el cual nos encontremos.

Tomando una provincia de referencia, en este caso se toma Sevilla, se va a estudiar la influencia de la variación del perfil horario en la fracción, en un tipo de instalación multifamiliar descentralizada.

Las variaciones que se van a realizar del perfil horario son las siguientes:

5.3.1. Perfil 0

Este perfil es el que viene por defecto dentro del programa TRANSOL. Tiene en cuenta una distinción entre los días laborables, de lunes a viernes, y los fines de semana, sábado y domingo.

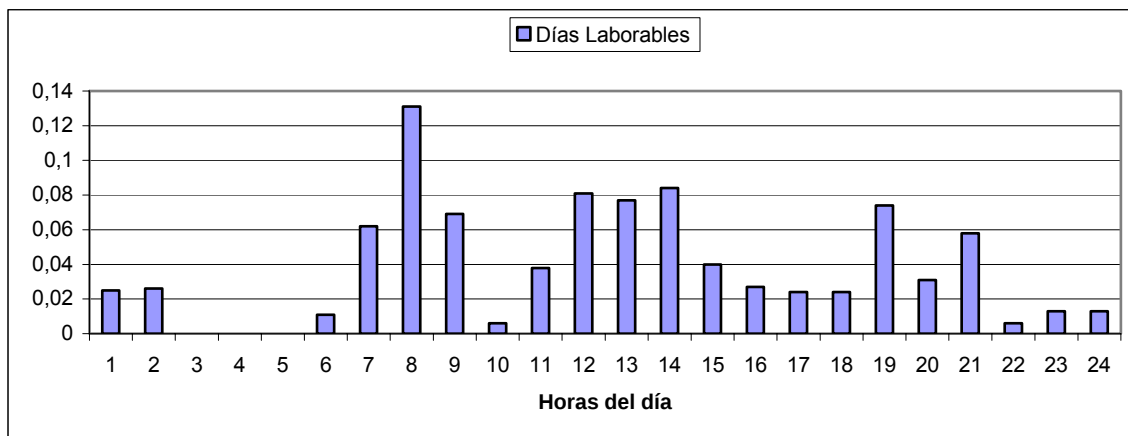


Gráfico 5-9

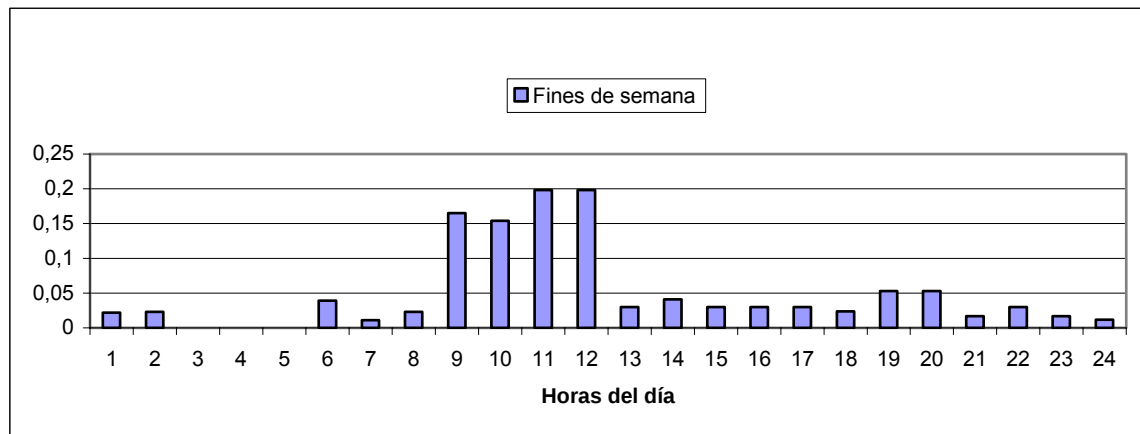


Gráfico 5-10

En el Gráfico 5-9, se representa el consumo durante los días laborables. El mayor consumo se produce a primera hora de la mañana, coincidiendo con la hora de partida hacia los trabajos y colegios. Al medio día, se produce demanda debido al consumo de agua caliente para realizar las tareas del hogar. A última hora de la tarde se produce una leve demanda.

En el Gráfico 5-10, correspondiente al fin de semana, el consumo de A.C.S. es completamente diferente. Los hábitos son modificados por completo. El consumo principal lo apreciamos durante las primeras horas de mañana, pero comparado con el correspondiente a los días laborables, estas horas se retrasan.

En ambos, perfiles, existe una pequeña demanda a lo largo del día, careciendo de demanda durante las horas nocturnas. Este tipo de perfil corresponde al de una familia normal.

5.3.2. Perfil 1

En este perfil, la distribución horaria es similar a la anterior, correspondiente a los días laborables. La diferencia es que no se realiza distinción entre los días de la semana. Este tipo de consumo, donde no se hace variación entre los días, se asemeja más al que podemos encontrar en un hotel, donde el cliente no varía sus requerimientos de A.C.S. según el día de la semana.

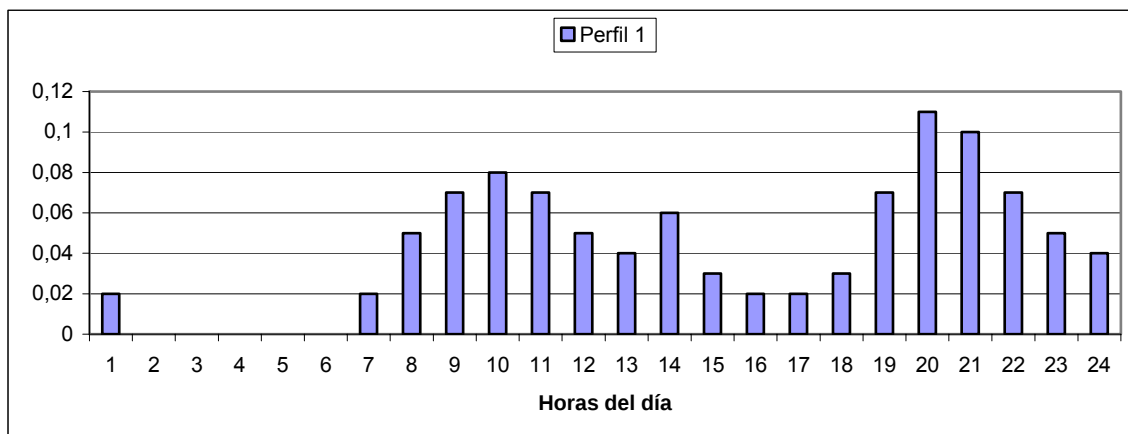


Gráfico 5-11

Al igual, que en el caso correspondiente al Gráfico 5-11, dispone de dos franjas horarias donde se produce una mayor demanda, siendo éstas las correspondientes a las primeras horas del día y las últimas horas de las tardes, coincidiendo con las horas de salida y de llegada del trabajo. Durante las horas nocturnas, no tenemos ninguna demanda.

5.3.3. Perfil 2

En este perfil, el consumo de A.C.S. no es función de las necesidades a lo largo del día, sino que en este caso, el consumo va a ser constante a lo largo de éste y a lo largo de la semana. Este tipo de consumo es típico de aplicaciones donde el requerimiento de A.C. no varíe, como en industrias.

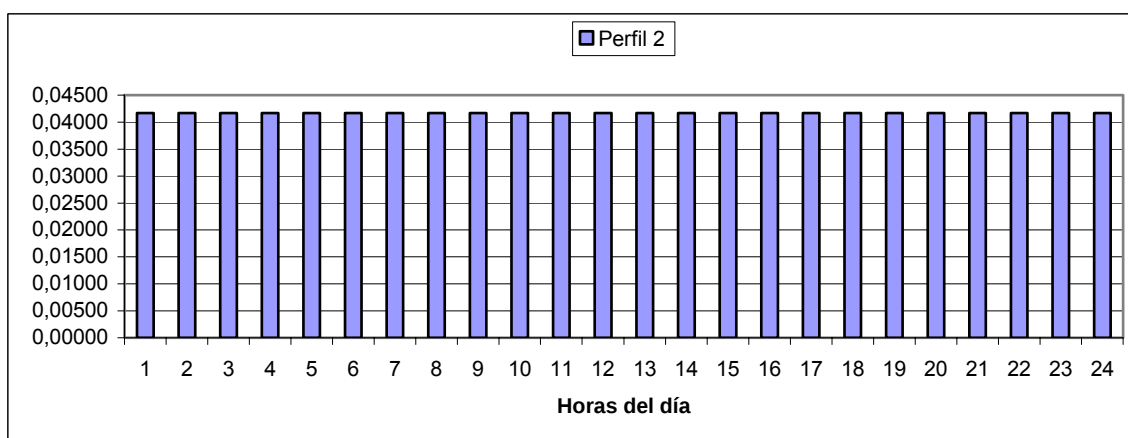


Gráfico 5-12. Perfil de demanda constante durante el día



5.3.4. Resultados perfil 0

Al realizar la simulación, obtenemos las fracciones solares en base mensual. Estos valores nos revelan que durante los meses de veranos estamos en torno al 95 % frente al 30 % en los meses de invierno, donde la radiación solar es menor.

Con el área de captación instalada, no se llega a obtener una fracción unidad. En los meses de verano, se debe tener en cuenta, que la temperatura de preparación del agua es menor, con lo cual se llegará a satisfacer la demanda casi por completo.

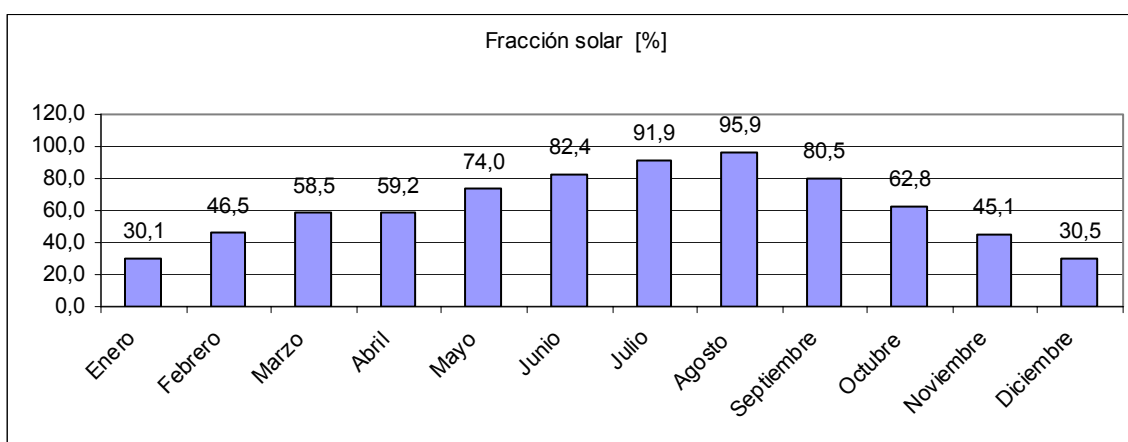


Gráfico 5-13

5.3.5. Resultados perfil 1

Los resultados obtenidos tras la simulación, son similares a los obtenidos en el apartado anterior. En los meses de mayor radiación, nos encontramos con las mayores fracciones solares, frente a los meses de verano, donde la fracción solar es aproximadamente un tercio respecto al máximo. La situación en los meses de verano, es similar al caso anterior.

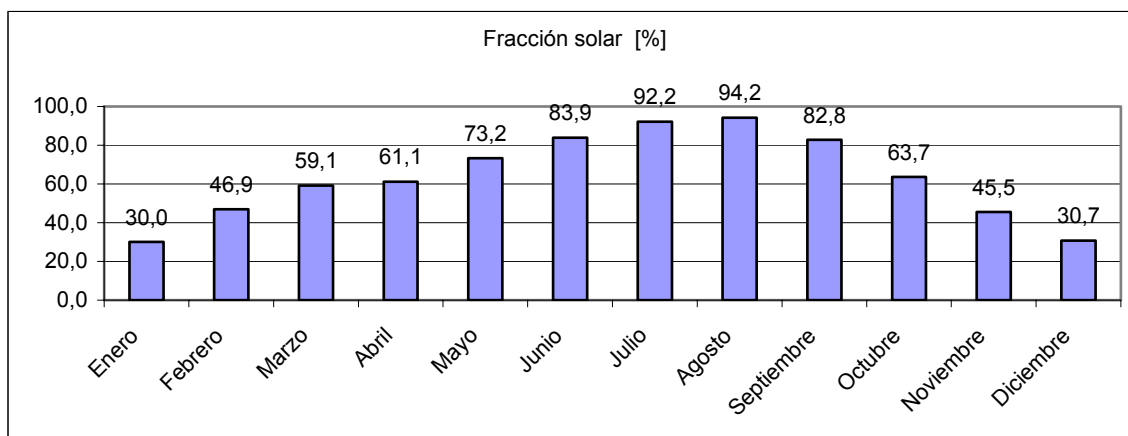


Gráfico 5-14

5.3.6. Resultados perfil 2

En este tipo de instalaciones, donde el consumo permanece constante a lo largo del día, apreciamos que la fracción solar no se modifica. Esto nos lleva a que la fracción solar de una instalación no está condicionada por el uso horario que tengamos de la instalación durante el día. El acumulador de agua, al actuar de volante de inercia, nos proporciona el agua caliente durante las horas que no existe radiación solar.

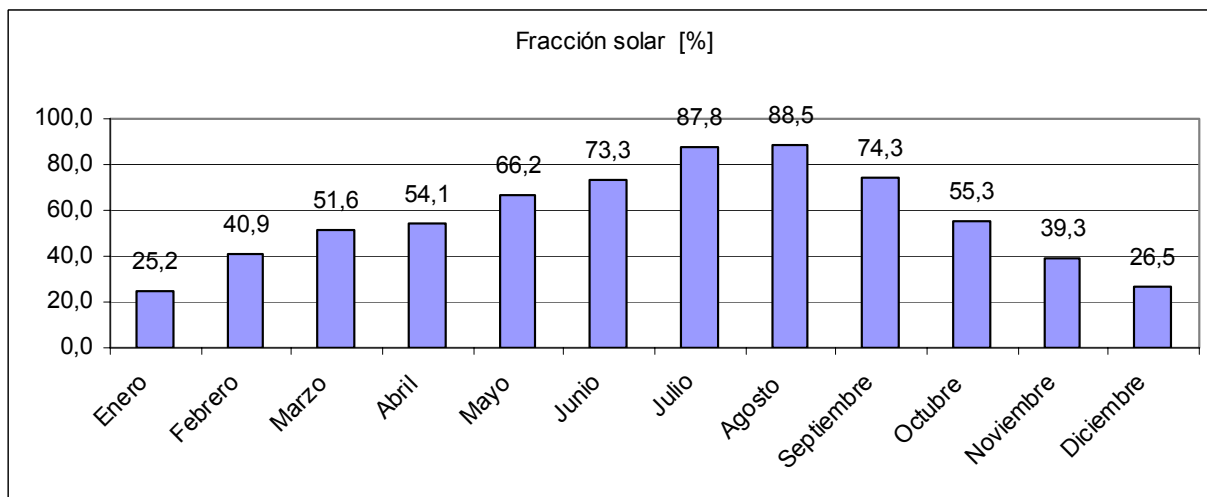


Gráfico 5-15



5.3.7. Comparación resultados

En la Tabla 5-3 se resumen los valores globales que de cada uno de los perfiles horarios simulados para una misma instalación.

Al comparar los valores obtenidos para los perfiles 0 y1, no se aprecia una gran diferencia entre ambos. Esto quiere decir, que una variación entre los hábitos de consumo en función del día de la semana no es apreciable gracias al sistema de acumulación.

Perfil Horario	Fracción Solar Global
Perfil 0	60,0 %
Perfil 1	60,5 %
Perfil 2	53,9 %

Tabla 5-3

La fracción solar correspondiente al perfil 2, como se ha comentado anteriormente, es relativamente baja, pero hay que tener en cuenta las características de este perfil, que es constante a lo largo del día, incluida la noche, donde necesitamos utilizar el sistema auxiliar para producir A.C.S. Una posible solución para aumentar la fracción solar de este tipo de instalación, sería aumentar el volumen de acumulación, para intentar almacenar durante el día la demanda que tenemos durante las horas nocturnas, teniendo en cuenta que deberemos tener un aislamiento exterior mayor.

5.4. INFLUENCIA DE LA SUPERFICIE DE CAPTACIÓN

Para el cálculo del área de captación del campo solar, hemos partido de la demanda de ACS y de las especificaciones del programa PROSOL, tomando el punto medio de las inecuaciones. En este apartado, se estudia la influencia que tiene sobre la fracción solar y el rendimiento de captador tomando distintos valores de área de captación solar, dentro de los límites que vienen marcados en las especificaciones.

Del rango de valores que encontramos en la ecuación 4-1, tomamos cinco puntos equidistantes, de tal manera que se abarque el mayor número de puntos posibles. Se han tomado cinco puntos, considerando que quedan bien definidos los distintos valores de áreas que se disponen.



Intuitivamente, al ir aumentando el área de captadores, la radiación solar captada va a aumentar, con lo que también va a aumentar la fracción solar. En cambio, el rendimiento, tal como se ha definido, tenderá a disminuir, debido a que al aumentar el área de captadores, aumenta la temperatura del agua que circula dentro de los captadores, con lo cual su efectividad disminuye.

Las áreas que se obtienen para cada tipo de instalación, queda reflejado en la siguiente tabla.

Instalación	ÁREAS					
Centralizada	15	17	19	21	23	25
Descentralizada	16	18	20	22	24	26
Unifamiliar	1	2	3	4	5	6

Tabla 5-4

Cómo se aprecia en la Tabla 5-4, los valores obtenidos de las áreas son números enteros. Las áreas se han redondeado para una mayor facilidad en el cálculo de número de captadores. Estos valores de áreas, para el caso de instalaciones centralizadas y descentralizadas, corresponden para todas las viviendas.

En la Tabla 5-5, se aprecia en función del tipo de instalación, el área correspondiente aproximadamente por vivienda.



Instalación	ÁREAS / VIVIENDA					
Centralizada	1,5	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5
Descentralizada	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6
Unifamiliar	1	2	3	4	5	6

Tabla 5-5

5.4.1. Vivienda multifamiliar centralizada

Las áreas de captación en este caso van a estar comprendidas desde los 15 m² hasta los 25 m², con un incremento de la superficie de 2 m².

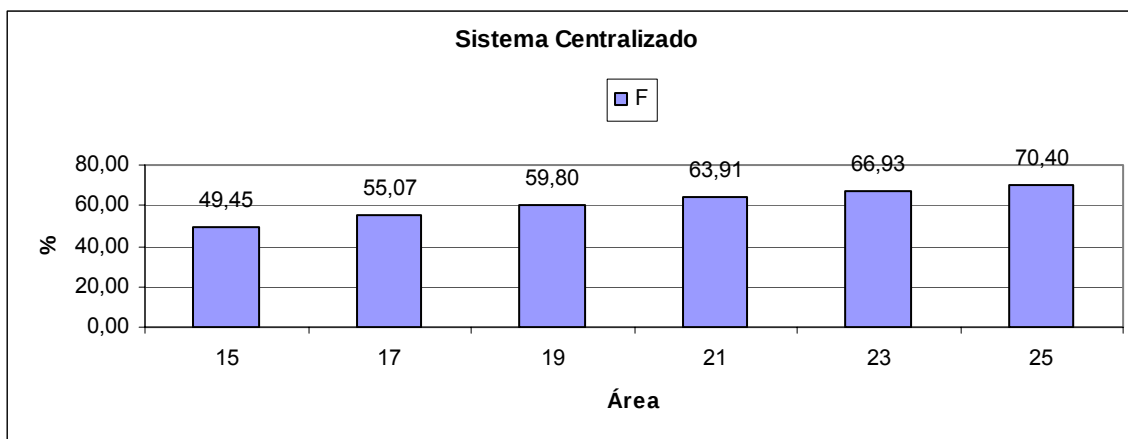


Gráfico 5-16

Se observa que al aumentar el área de captación, se consigue un aumento de la fracción solar del sistema del 42,36 % respecto a la fracción solar de menor área.

Al producirse un aumento de área de captación, las pérdidas que se producen en los captadores son mayores, disminuyéndose el rendimiento de éste, tal como se aprecia en el Gráfico 5-17.

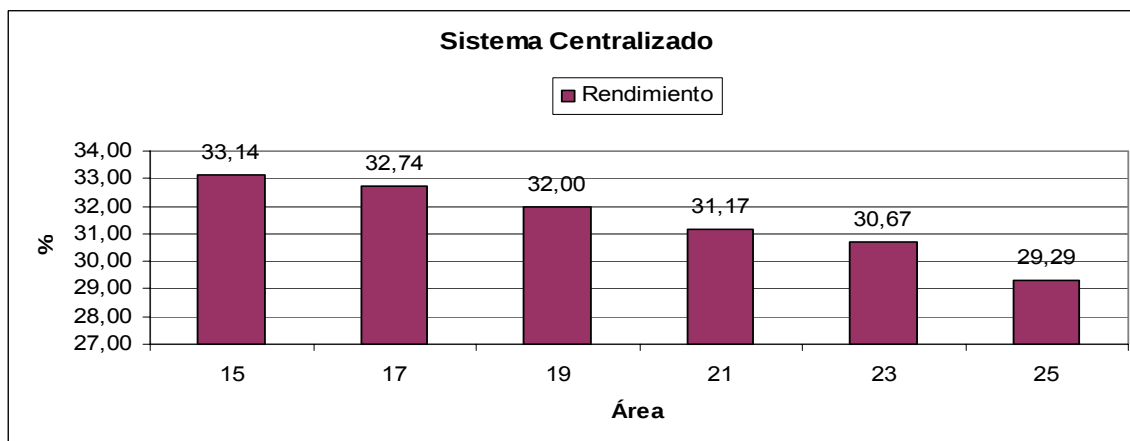


Gráfico 5-17

Si ahora vemos la evolución que sufre la fracción solar, en función de la fracción solar que disponemos para la menor área, vemos que al ir aumenta el área en dos metros, llegando desde los 15 metros cuadrados originales, hasta los 25 metros cuadrados, se produce un 42,35 % de aumento de la fracción solar, respecto al de menos área, tal como se aprecia en la Gráfico 5-18.

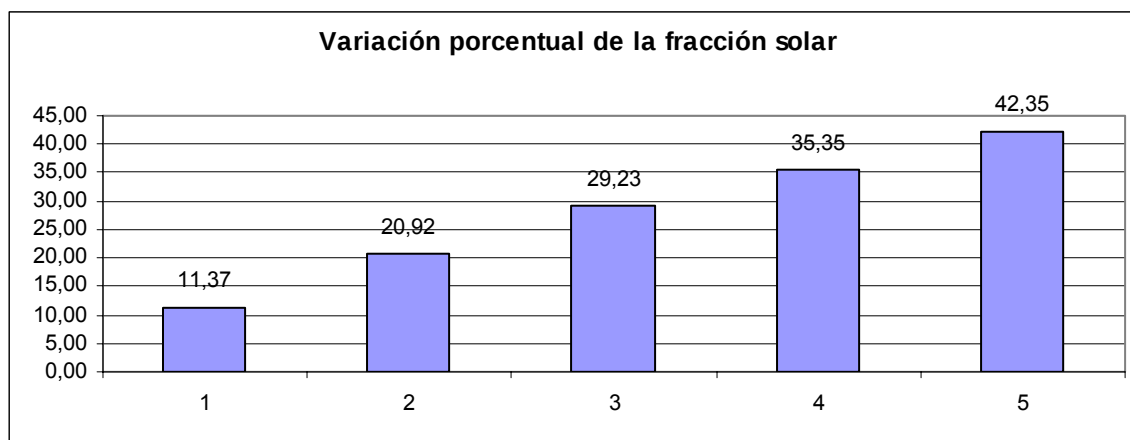


Gráfico 5-18

5.4.2. Vivienda multifamiliar descentralizada

Las áreas de captación que vamos a tener para este caso van a estar comprendidas desde los 16 m² hasta los 26 m², con un incremento de la superficie de 2 m². La tendencia de los resultados es similar a los casos anteriores, aumentando la fracción solar al aumentar el área de captación.

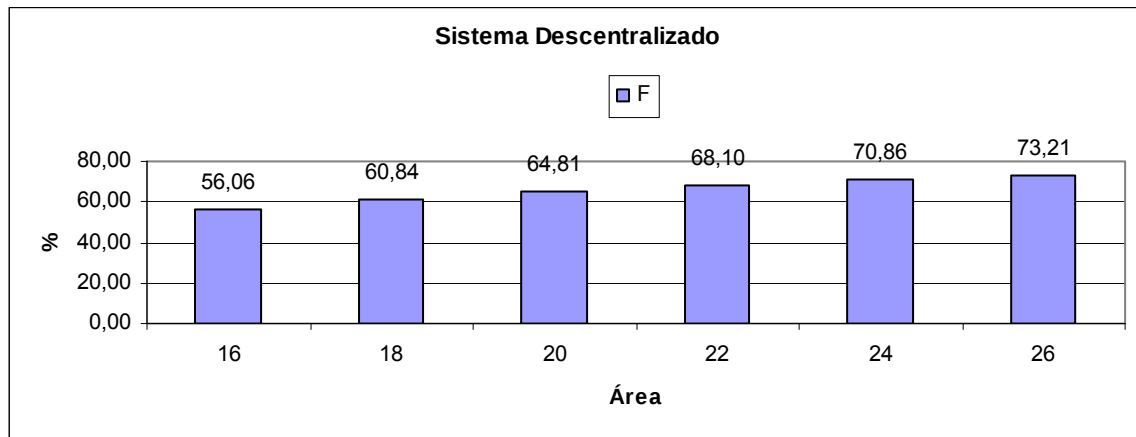


Gráfico 5-19

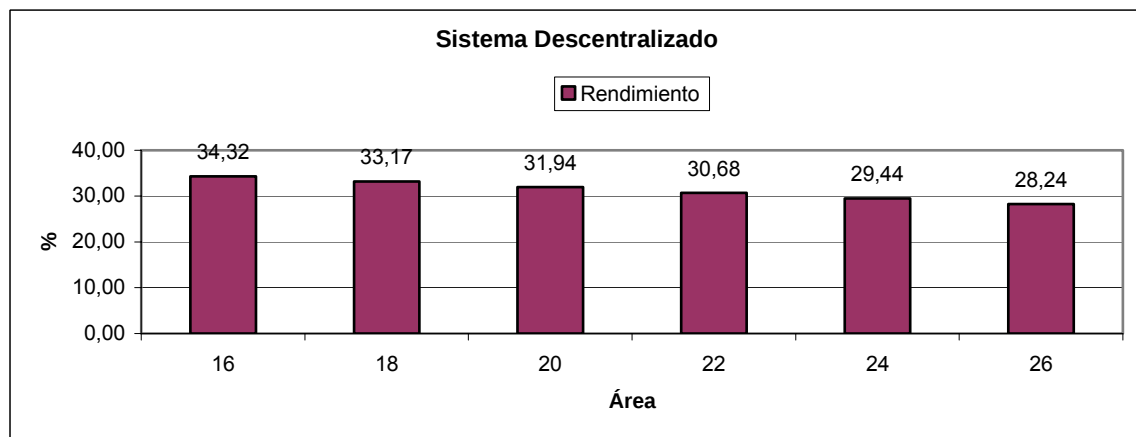


Gráfico 5-20

En este caso, tenemos un aumento de la fracción solar menor, pero la disminución del rendimiento es mayor, frente al caso de multivivienda centralizada.

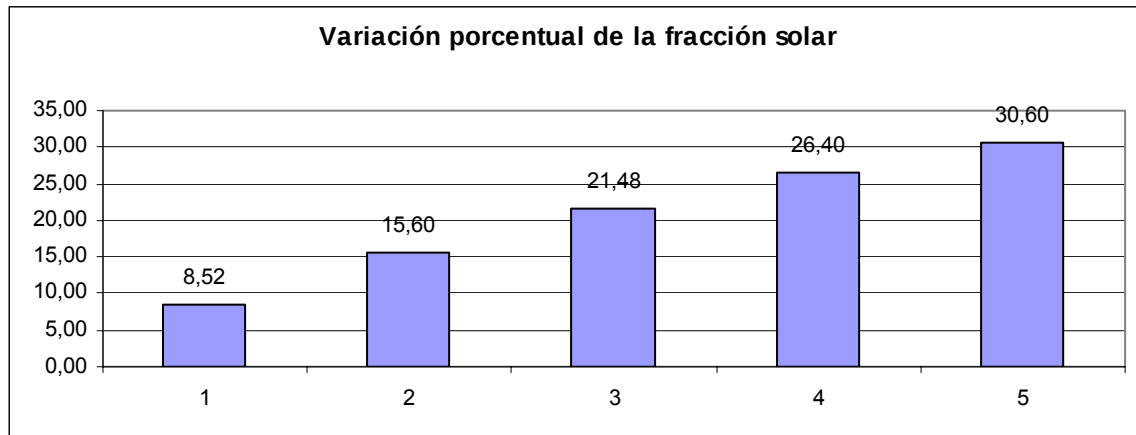


Gráfico 5-21

En el Gráfico 5-21, se representa la evolución porcentual de la fracción solar en función del incremento del área de captadores. En este caso, llegando a un área de captadores de veintiséis metros cuadrados, se tienen un aumento de la fracción solar del 30,60 %. Para este tipo de instalaciones se alcanza una fracción solar de 73,21 % para un área de 26 metros cuadrados.

5.4.3. Vivienda unifamiliar

Las áreas de captación para este caso van a estar comprendidas desde los 1 m² hasta los 6 m², con un incremento de la superficie de 1 m².

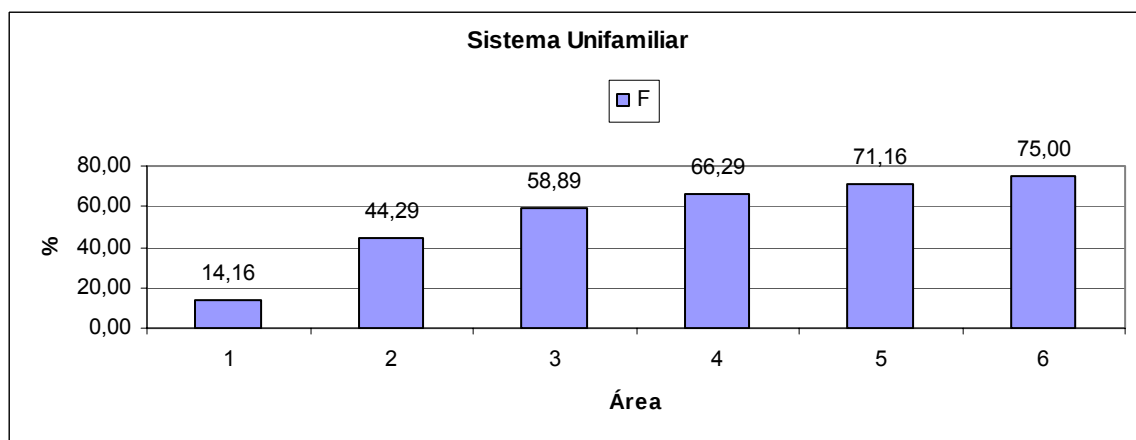


Gráfico 5-22

Vemos, que al aumentar el área de captación, aumenta la fracción solar, llegando aproximadamente a tener un aumento del 400 %. El rendimiento, sigue su tendencia de disminuir. Para instalaciones de 1 metro cuadrado, vemos que no es viable este tipo de instalación. En un primer lugar, la fracción solar que tenemos está fuera de los valores habituales que tenemos para el resto de instalaciones.

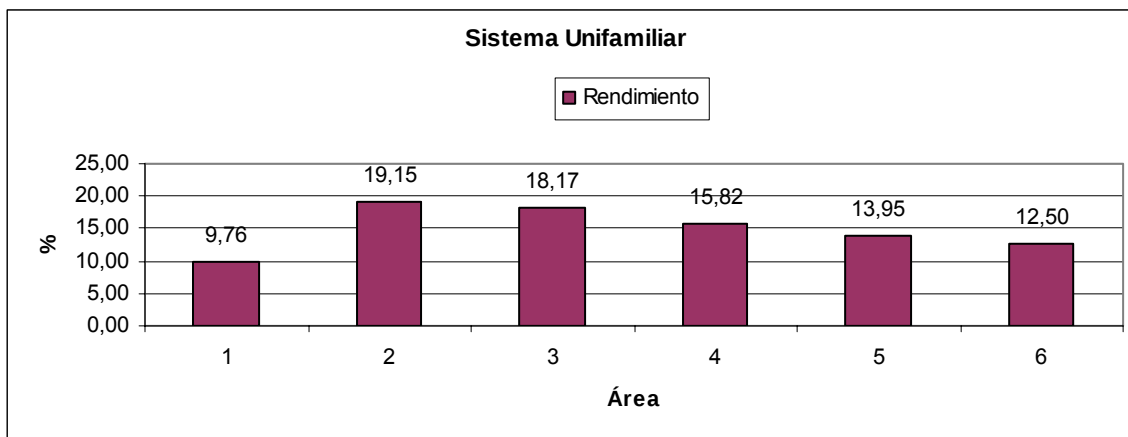


Gráfico 5-23

En un segundo lugar, el rendimiento del captador, es demasiado bajo. Al aumentar el área de los captadores, las pérdidas que se producen por éstos hacen que el rendimiento de éstos baje, pero para el área de un metro cuadrado, tenemos una situación anómala, porque el rendimiento, al aumentar el área, aumenta, debido fundamental al escaso rendimiento obtenido con esta superficie.

5.5. INFLUENCIA DEL MÉTODO DE CÁLCULO

El programa utilizado para los cálculos en este proyecto, es un programa de simulación, con las instalaciones solares térmicas definidas, pudiendo variar únicamente parámetros característicos de la instalación.

En este apartado se pretende ver las diferencia de cálculo existente entre este tipo de programa de simulación, con el método f-chart, basado en medias diarias. Para ello se utiliza el programa **solar9**. Este programa fue desarrollado como proyecto fin de carrera en la *Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla*.



Los datos de radiación que se han introducido para el cálculo de las fracciones solares, han sido extraídos del programa TRANSOL, para que la base de cálculo de la radiación sea la misma.

En primer lugar, se va a calcular una instalación unifamiliar. Los resultados obtenidos, se pueden apreciar en las siguientes tablas:

Unifamiliar	
Áreas	Fracción Solar
1	48,00%
2	76,20%
3	89,70%
4	95,00%
5	97,70%
6	99,00%

Tabla 5-6

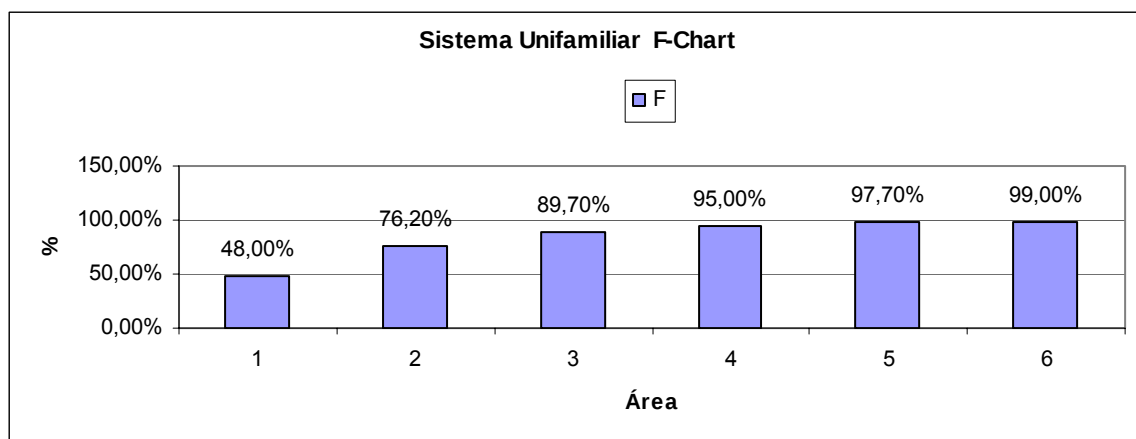


Gráfico 5-24

Para el caso de una instalación multifamiliar centralizada:



Centralizada	
Áreas	Fracción Solar
15	66,70%
17	71,80%
19	76,20%
21	80,00%
23	83,20%
25	85,80%

Tabla 5-7

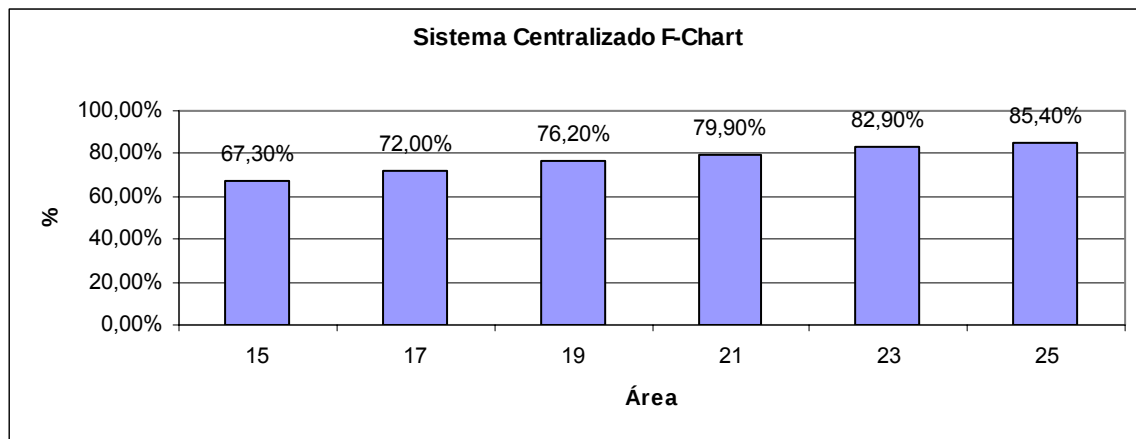


Gráfico 5-25

Para el caso de una instalación multifamiliar descentralizada:

Descentralizada	
Áreas	Fracción Solar
16	67,30%
18	72,00%
20	76,20%
22	79,90%
24	82,90%
26	85,40%

Tabla 5-8

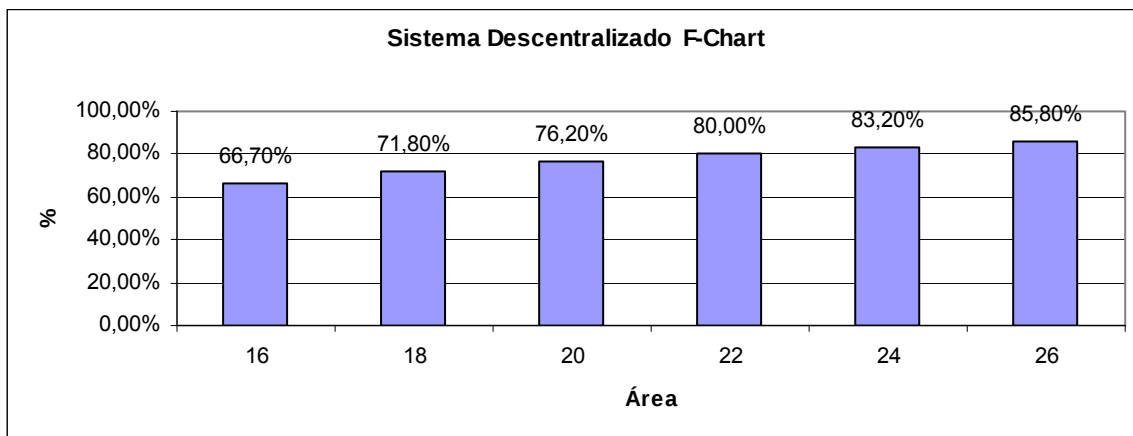


Gráfico 5-26

En todas las instalaciones calculadas, se aprecia un incremento de la fracción solar, como en el apartado anterior. Pero para ver directamente la diferencia entre los valores obtenidos en función del tipo de sistema de cálculo, se va a calcular la diferencia entre ambos métodos.

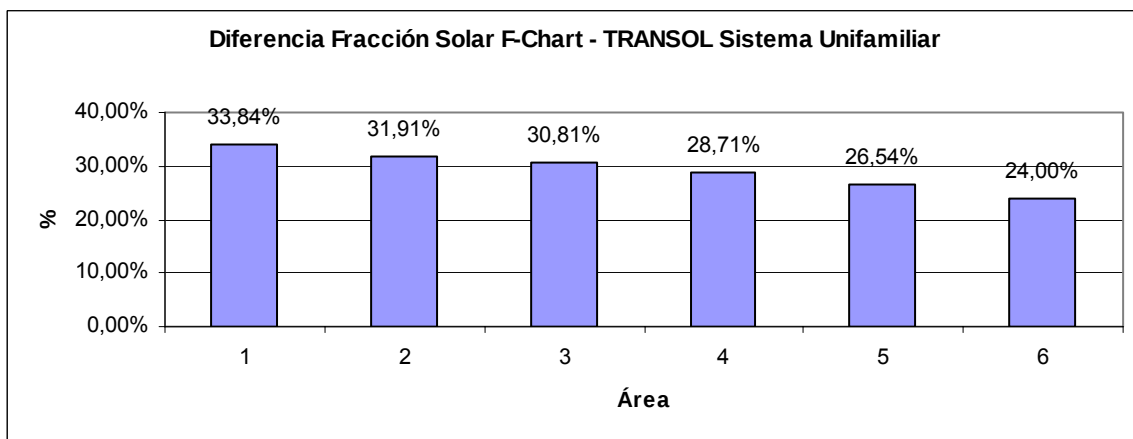


Gráfico 5-27

Para un sistema unifamiliar, al ir aumentando el área de captadores, el error de cálculo cometido entre ambos métodos va disminuyendo. Para áreas pequeñas, el método f-chart nos facilita resultados muy diferentes a los obtenidos mediante una simulación detallada

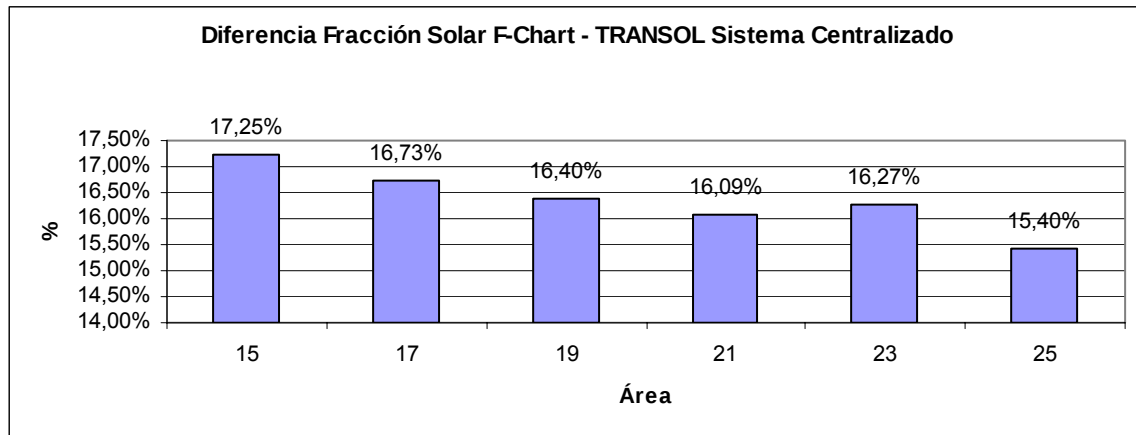


Gráfico 5-28

Para configuración multifamiliares centralizadas, el método del f-chart, nos da una diferencia máxima de aproximadamente de 17 puntos, por encima del resultado obtenido mediante una simulación. Esta diferencia, al ir aumentando el área de captación, va disminuyendo.

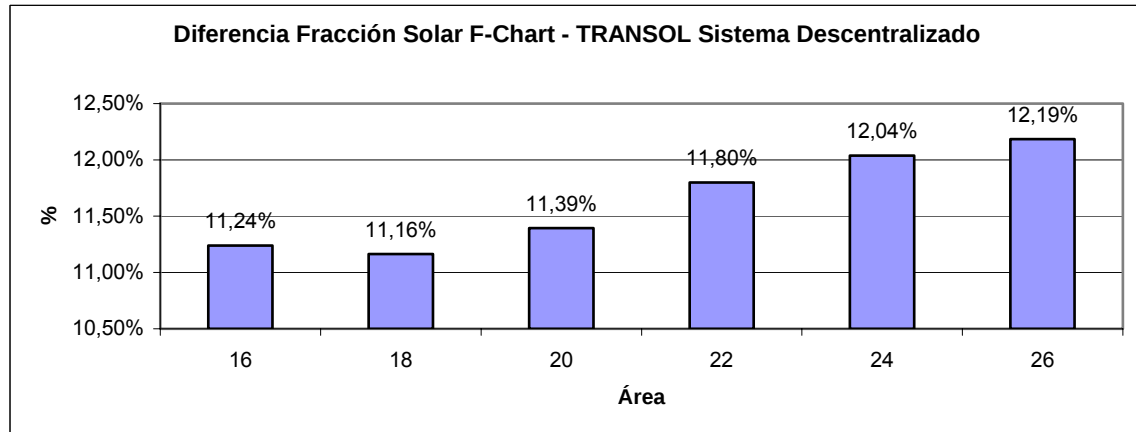


Gráfico 5-29

En último lugar, para el caso de configuraciones multifamiliares descentralizadas, tenemos un área para donde el método del f-chart, nos da la menor diferencia con el programa TRANSOL. Aunque los resultados tengan una tendencia a ir aumentando su diferencia, ésta es menor que en los casos anteriores.



Se puede apreciar los resultados mostrados en los Gráfico 5-24, Gráfico 5-25, Gráfico 5-29, la misma tendencia ascendente que se aprecia en los resultados obtenidos mediante el programa TRANSOL. En ambas simulaciones se aprecia una tendencia de ir aumentando la fracción solar al aumentar la superficie de captación. Esto es debido, a que al permanecer la demanda constante e ir aumentando la superficie, la cantidad de energía solar útil captada aumenta, aumentando la fracción solar.

El método f-Chart al basarse en valores medios mensuales introduce una serie de errores que no se introducen al realizar una simulación horaria. Al utilizar el programa TRANSOL, estamos realizando una simulación horaria, teniendo en cuenta la radiación que llega en cada hora, por ello los resultados obtenidos son más exactos que los obtenidos mediante un método en base mensual.

5.6. INFLUENCIA DEL AISLAMIENTO DEL SISTEMA DE ACUMULACIÓN

Mediante el depósito de acumulación eliminamos el desfase existente entre la producción de A.C.S. y el consumo. Por ello, durante un gran número de horas, éste se encuentra con un fluido caliente. Por este motivo, el aislamiento térmico de este elemento es fundamental. En este apartado, vamos a realizar un análisis de sensibilidad de la variación de la fracción solar en función del espesor del aislamiento. Al aumentar el espesor de aislamiento, las pérdidas que tenemos en este equipo se van a reducir, produciéndose un aumento en la energía que llega a los usuarios.

Fracción Solar		
Espesor	Instalación Centralizada	Instalación Descentralizada
0,05	59,80	64,81
0,06	62,76	67,82
0,07	64,55	68,71
0,08	66,18	69,34
0,09	67,33	69,84
0,1	68,18	70,26

Tabla 5-9

En las Tabla 5-9 y Tabla 5-10, se aprecia la evolución de la fracción solar y del rendimiento en una instalación multifamiliar centralizada y descentralizada en la ciudad de Sevilla. Se aprecia un aumento de la fracción solar, propiciada, por la disminución de las pérdidas en espesor. La energía demandada es constante, independiente del espesor de aislamiento. Ésta, la podemos descomponer en la energía útil que nos llega y en la energía que se pierde, en depósito, en el intercambiado, en tuberías, etc. Al disminuir la energía perdida en el depósito, la energía útil aumenta, con lo cual la fracción aumenta.



Rendimiento Captador		
Espesor	Instalación Centralizada	Instalación Descentralizada
0,05	32,00	31,94
0,06	33,76	33,47
0,07	34,86	33,93
0,08	35,84	34,26
0,09	36,53	34,52
0,1	37,06	34,74

Tabla 5-10

El rendimiento sufre el mismo efecto que la fracción solar. Al ir aumentando el espesor del aislamiento del acumulador, se aumenta el rendimiento. Esto se debe, a que según hemos definido este rendimiento, la radiación solar captada, que constituye el denominador de ésta expresión, no depende del espesor del acumulador, sólo del área de captación. El aporte solar al consumo, que constituye el numerador, va a estar ligado a las pérdidas existentes en la instalación. Al disminuir las pérdidas en el acumulador, éste aumenta la energía que es aportada al consumo.

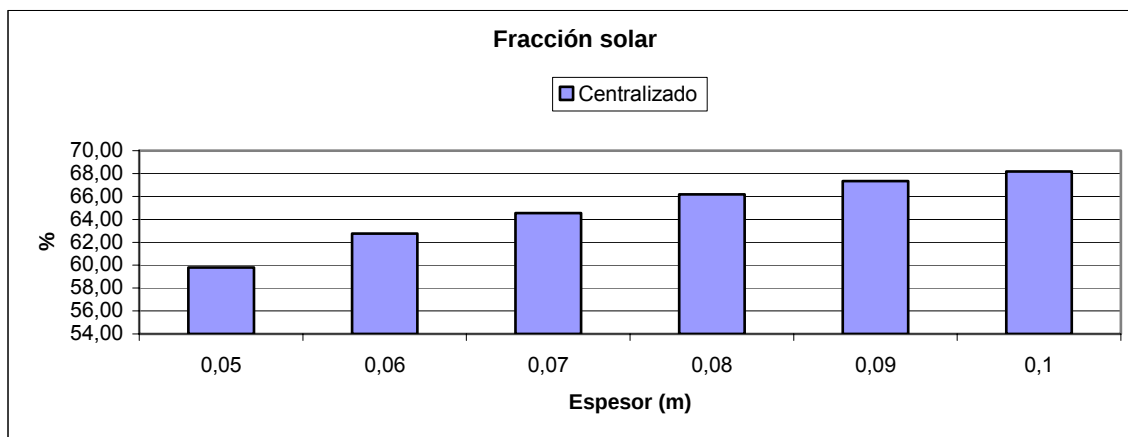


Gráfico 5-30. Evolución de la fracción solar para un sistema multifamiliar centralizado

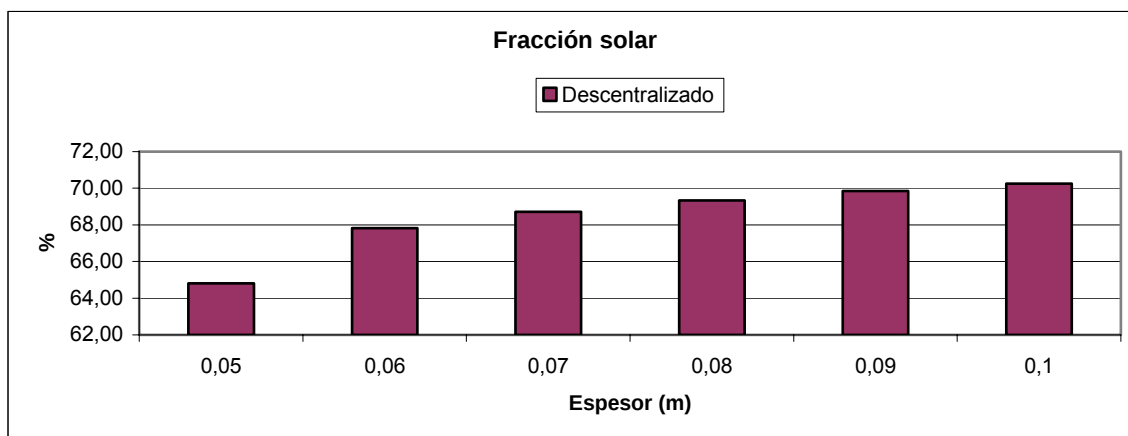


Gráfico 5-31 Evolución de la fracción solar para un sistema multifamiliar descentralizado

En ambos sistemas, centralizado y descentralizado, al producirse un aumento del espesor de aislamiento se produce un aumento de la fracción solar.

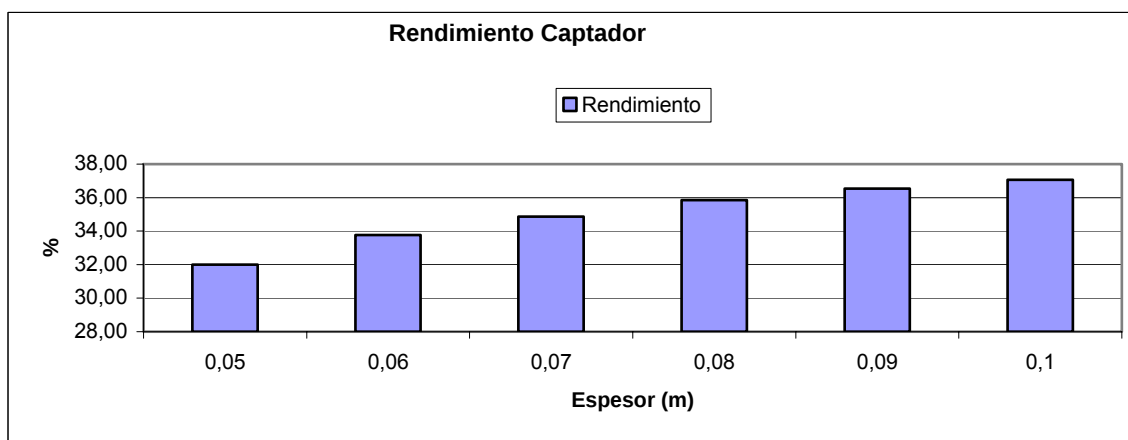


Gráfico 5-32 Evolución del rendimiento para un sistema multifamiliar centralizado

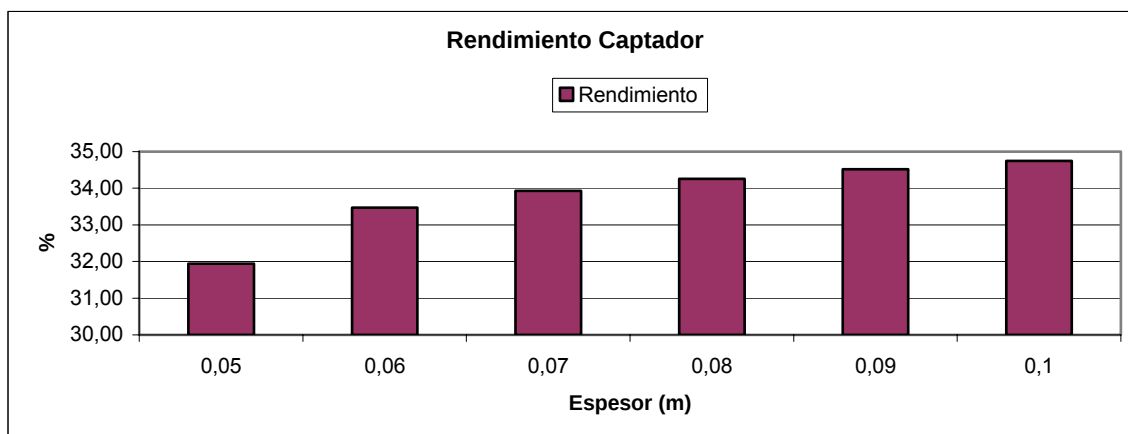


Gráfico 5-33 Evolución del rendimiento para un sistema multifamiliar centralizado

Viendo la variación entre el valor máximo y mínimo de la fracción solar, tenemos que en los sistemas centralizados se produce una variación del 14% y para los sistemas descentralizados del 8,4%. Esta variación de cerca de seis puntos, se debe al tipo de sistema de acumulación DE cada instalación, uno centralizado, para todo el conjunto de viviendas y otro individual.

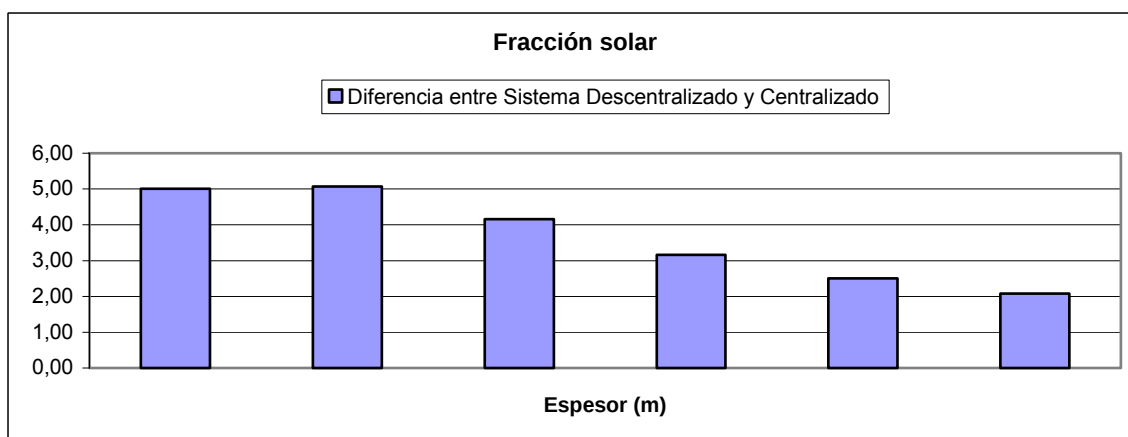


Gráfico 5-34

En el Gráfico 5-34, apreciamos que inicialmente los sistemas descentralizados tienen una mayor fracción solar frente a los centralizados. Esta diferencia se va haciendo menor conforme vamos aumentando el espesor de aislamiento, hasta que al llegar al doble del espesor mínimo impuesto por el RITE, tenemos que la diferencia existente entre estos dos sistemas es de puntos, lo que equivale aproximadamente a un 3%.



6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se ha estudiado el comportamiento de tres tipologías diferentes de instalaciones de energía solar a baja temperatura para producción de agua caliente sanitaria en viviendas. En particular, se han considerado dos tipos de viviendas: viviendas unifamiliares y viviendas multifamiliares. En el caso de viviendas multifamiliares se han estudiado dos configuraciones: instalaciones centralizadas e instalaciones descentralizadas

Para cada una de las instalaciones consideradas se ha simulado su funcionamiento con un programa de simulación en base horaria. La simulación se ha llevado a cabo en cada una de las provincias andaluzas, obteniendo como parámetros de diseño característicos la fracción solar y el rendimiento del sistema de captación, ambos en base anual.

En viviendas unifamiliares, la fracción solar anual de la instalación en Andalucía está comprendida entre el 42,11% y el 47,6%, para una superficie de captación de 2 m², equivalente a 0,0125 m²/lts de agua caliente a 45 °C. El valor mínimo de la fracción solar se alcanza en Huelva y el máximo en Jaén.

En viviendas multifamiliares centralizada, la fracción solar anual de la instalación en Andalucía está comprendida entre el 60,54% y el 63,37%, para una superficie de captación de 19 m², equivalente a 0,0125 m²/lts de agua caliente a 45 °C. El valor mínimo de la fracción solar se alcanza en Sevilla y el máximo en Granada.

En viviendas multifamiliares descentralizada, la fracción solar anual de la instalación en Andalucía está comprendida entre el 60,86% y el 64,97%, para una superficie de captación de 20 m², equivalente a 0,0125 m²/lts de agua caliente a 45 °C. El valor mínimo de la fracción solar se alcanza en Córdoba y el máximo en Huelva.

Tomando como referencia la provincia de Sevilla, se ha estudiado la influencia del perfil horario de consumo en la fracción solar del sistema. Se han considerado cuatro perfiles diferentes correspondientes a los siguientes patrones de consumo:

Perfil 0: perfil horario diferente en días laborables y fin de semana

Perfil 1: mismo perfil horario todos los días de la semana

Perfil 2: consumo horario igual todas las horas del día



Los resultados obtenidos, para cada uno de los casos anteriormente descritos se resumen en la Tabla 6-1.

Perfil Horario	Fracción Solar Global
Perfil 0	60,0 %
Perfil 1	60,5 %
Perfil 2	53,9 %

Tabla 6-1

Como se comprueba en la Tabla 6.1, la distribución del perfil horario del consumo de agua caliente en la vivienda tiene poca influencia en la fracción solar de la instalación.

Se ha analizado asimismo la influencia del método de cálculo en el diseño del sistema. Se han considerado como métodos de comparación, un método aproximado basado en valores medios diarios en base mensual (método f-chart) y un método de simulación en base horaria (programa TRANSOL). Los resultados obtenidos muestran que el método de cálculo utilizado tiene una fuerte influencia en el dimensionado de la instalación, observándose diferencias de hasta el 15% en la fracción solar.

Por último, al realizar un análisis de los parámetros de una instalación, variando el espesor de aislamiento del acumulador solar, se aprecia que un aumento de este, conlleva a una disminución de las pérdidas en el depósito. El aumento del espesor mínimo que marca el RITE en diez milímetros, marca el mayor aumento porcentual de la fracción solar. Los sucesivos aumentos de espesor conllevan un aumento marginal decreciente de la fracción solar. Se debe llegar a una solución de compromiso entre aumento del espesor y el coste de éste.



Como se aprecia en la Tabla 6-2, existe un aumento de la fracción solar en ambos tipos de instalaciones, conforme aumentamos el espesor de aislamiento.

Fracción Solar		
Espesor	Instalación Centralizada	Instalación Descentralizada
0,05	59,80	64,81
0,06	62,76	67,82
0,07	64,55	68,71
0,08	66,18	69,34
0,09	67,33	69,84
0,1	68,18	70,26

Tabla 6-2

En las gráficas 6.1 y 6.2 se representa la diferencia de valores entre el valor correspondiente al espesor mínimo y los sucesivos espesores.

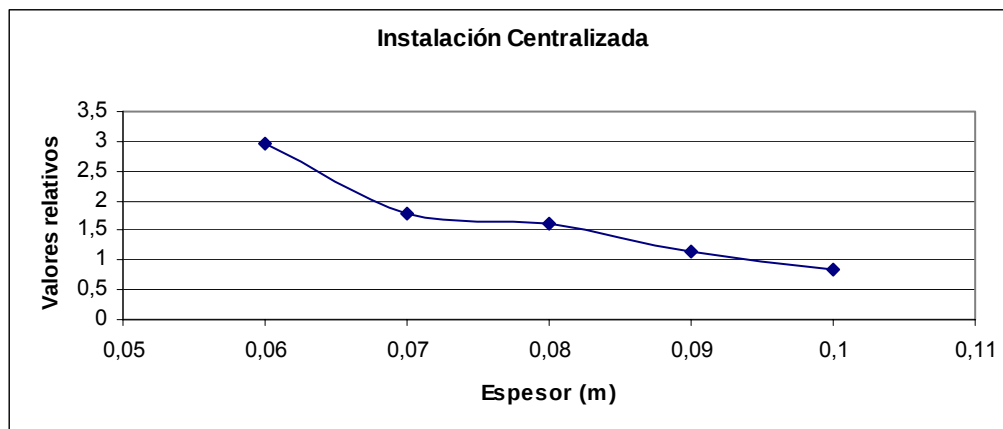
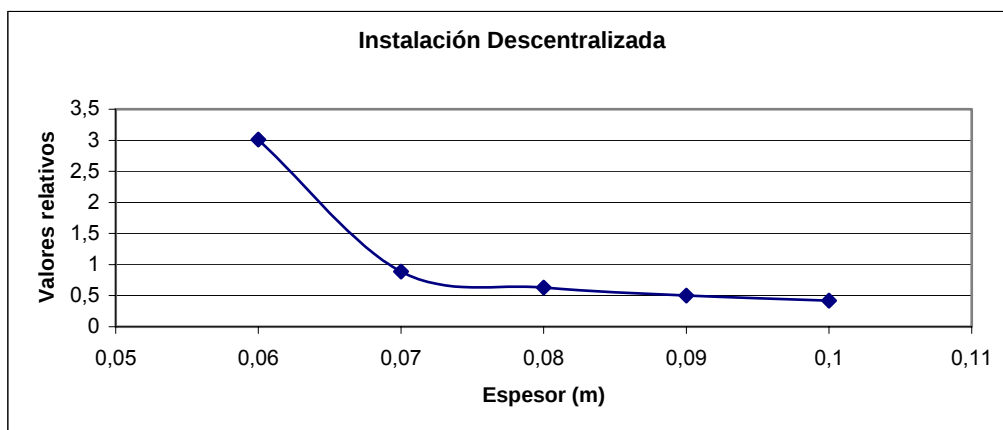


Gráfico 6-1

**gráfico 6-2**

Para ambos caso, el primer aumento de 10 mm del espesor, supone el mayor aumento de la fracción solar. Los sucesivos aumentos para el caso de una instalación centralizada, nos produce un aumento de la fracción solar, respecto al caso anterior del 1,5%, lo que equivale a la mitad que en el caso anterior. Los sucesivos aumentos de espesor nos llevan a tener una diferencia de un punto con el caso anterior.

Para el caso de una instalación descentralizada, el primer aumento de espesor, nos produce un aumento de la fracción solar de 3 puntos con respecto al caso inicial. Los sucesivos aumentos se encuentran por debajo de 1 punto, con lo cual no se produce ninguna mejora sustancial aumentada el espesor del aislamiento del acumulador solar.

Por último, indicar que el uso de este tipo de instalaciones para la producción de agua caliente, tanto para uso doméstico e industrial, conlleva a un ahorro en combustibles tradicionales y dado que España no es un país con recursos propios para autoabastecerse, nos hace tener una menor dependencia de otros países, además de una contribución a la disminución de producción de CO₂ y conservación del medio ambiente. También indicar que la instalación de este tipo de instalaciones conlleva a una demanda de personal para su instalación y mantenimiento, produciendo una de empleo.



7. BIBLIOGRAFÍA

7.1. ARTÍCULOS

Sichar Moreno, F. J., “La energía solar y el gas (I)”. Montajes e Instalaciones. Octubre 2005, nº 398, p 47 – 52.

Sichar Moreno, F. J., “La energía solar y el gas (II)”. Montajes e Instalaciones. Noviembre 2005, nº 399, p 43 – 45.

7.2. JORNADAS

Espada Nicolás, Rebeca. “Energía Solar Térmica de Baja Temperatura”. I Jornadas Técnicas de Ciencias Ambientales. Madrid, 3 – 14 de noviembre de 2003.

7.3. LIBROS

Dr. Feliz A. Peuser; Kart-Heinz Remmers; Martin Schnauss. *Sistemas Solares Térmicos. Diseño e Instalación*.

Germán López Lara, Bernd-Rainer Kasper, Bernhard Weyres-Borchert. *Instalaciones Solares Térmicas*. 1ª Edición. Sevilla: Sodean. ISBN: 3-934595-30-8

Duffie J. A., Beckman W. A.. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2º Edition. Canada. John Willey & Sons, Inc. ISBN: 0-471-51056-4

Manual de Usuario TRANSOL EDU 1.2

IDAE, “Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE)” y sus “Instrucciones Técnicas Complementarias ITE”. Madrid. 1998. Depósito Legal: M. 45074-1998.

Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura. CIEMAT

7.4. PROYECTO FIN DE CARRERA

Páez Rodríguez, David. “Instalación de energía solar para la producción de agua caliente en un hotel”. Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos, 2001

Jiménez Revilla, José Ramón “Instalación de Energía Solar Térmica para Fábrica de Productos Químicos”. Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, 2005.

Moñino Díaz, Víctor. “Estudio de viabilidad técnico económico y proyecto de ejecución de instalación centralizada de producción y almacenamiento de A.C.S. mediante energía



solar térmica en residencia geriátrica en régimen de venta de energía”. Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería del Diseño, 2003

Fernández Guerra, David “Instalación Solar Térmica a Baja Temperatura para Producción de A.C.S. en un Hotel” Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos, 2002

7.5. NORMA

UNE – EN 94002:2004, “Instalaciones solares térmicas para producción de agua caliente sanitaria: Cálculo de la demanda de energía térmica”

Real Decreto 909/2001, de 27 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA LEGIONELOSIS