DOCUMENTOS TÉCNICOS DE INSTALACIONES EN LA EDIFICACIÓN
DTIE

DTIE 8.03
INSTALACIONES SOLARES TÉRMICAS PARA PRODUCCIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA

Edición: ATECYR

Redacción: Valeriano Ruiz Hernández y Germán López Lara

Coordinación: Comité Técnico de ATECYR

Producción y realización: Editorial EL INSTALADOR

Autores:

Valeriano Ruiz Hernández

Catedrático del Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. Director del Instituto Andaluz de Energías Renovables. Presidente del Centro de Nuevas Tecnologías Energéticas (CENTER).

Germán López Lara

Ingeniero Industrial, MSc en Ingeniería Mecánica, Master en Energías Renovables en la Ingeniería y Arquitectura, Responsable del Área de Energía Solar de SODEAN (Sociedad para el Desarrollo Energético de Andalucía). Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla.

Juan Carlos Martínez Escribano

Ingeniero Aeronáutico, Director Técnico de DISOL (División Solar).

Lista de miembros del Comité Técnico de ATECYR:

Presidente: José Manuel Pinazo

Vicepresidente: Felipe Cebrián

Vocales: Pablo Blanco
Alejandro Cabetas
José María Cano
Roberto Díaz
Ricardo García San José
Julio Largo Cabrerizo
Javier Rey
José Antonio Rodríguez Tarado
Delfín Silío
Rafael Úrculo
Alberto Viti

© ATECYR

Edita: ATECYR
Navaleno, 9 28033 Madrid

Producción y realización:
EDITORIAL TÉCNICA EL INSTALADOR

Portada y maquetación:
GRÁFICAS ELISA, SI.

Diseño gráfico:
Plácido Girón López

Impresión:
GRÁFICAS ELISA, SI.

ISBN: 84-95010-13-5
Dep. Legal: M-47149-2004

PRESENTACIÓN

La Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (ATECYR), entidad sin ánimo de lucro fundada en 1974, agrupa a más de 1.100 ingenieros y profesionales relacionados con los sectores de calefacción, refrigeración, ventilación y aire acondicionado.

Los Estatutos que rigen nuestra Asociación definen como sus fines:

- *El estudio de la problemática y de la ordenación, reglamentación y protección de las técnicas de calefacción, refrigeración, ventilación y acondicionamiento de aire, frío industrial, fontanería, uso racional de la energía y aquellas otras actividades relacionadas o anexas con las mismas, considerando su particular circunstancia de especialidades en la ingeniería del medio ambiente.*
- *La creación, recopilación y divulgación de información científica relacionada con estas tecnologías en España respecto a dichas técnicas, cuyo objeto es el entorno ambiental del hombre y el desarrollo de la misma.*
- *Fomentar el interés por el diseño y equipamiento de este entorno, a fin de cumplir mejor su función social.*
- *La investigación, realización de estudios y análisis relativos a esta temática, así como la recomendación de planes de actuación.*

Para la consecución de sus fines, ATECYR lleva a cabo una intensa actividad de colaboración con entes públicos y privados como: AENOR, mediante la participación en grupos de trabajo para la elaboración de distintas normas; Ministerios de Fomento, Economía y Sanidad, como miembro de pleno derecho en la Comisión Asesora y Grupo de Trabajo Permanente del Reglamento de Instalaciones Térmicas (RITE), así como asesor técnico en casos de tanta relevancia como la normativa sobre la prevención de la Legionelosis; un gran número de Comunidades Autónomas y Ayuntamientos, gracias a la incansable actividad de las Agrupaciones con que contamos; otras asociaciones como la Asociación de Fabricantes Españoles de Climatización (AFEC), con la que se ha desarrollado un Plan de Calidad para las instalaciones de climatización que pronto será elevado a norma; suministradores energéticos como REPSOL, SEDIGAS y GAS NATURAL, con los que se desarrollan gran cantidad de proyectos técnicos específicos; etc. En el campo normativo es digno de resaltar la participación en la elaboración del Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE\, publicado en 1998, así como la adjudicación del concurso restringido convocado por el IDAE para la revisión de este mismo reglamento, en diciembre de 2003.

Desde el punto de vista internacional, es miembro de REHVA, federación europea que agrupa a las asociaciones de técnicos del sector, y ASHRAE, su homónima americana. En este ámbito, lo más destacado, en los últimos tiempos, es haber promovido el Congreso Mediterráneo de Climatización CLIMAMED, en el que participan las asociaciones de Portugal, Francia e Italia. La primera edición de CLIMAMED se convoca en Lisboa para abril de 2004. La segunda tendrá lugar en España en el año 2005, coincidiendo con el certamen CLIMATIZACIÓN 2005.

En sus casi treinta años de vida, ATECYR no sólo ha participado en gran número de proyectos, sino que se ha convertido en un referente para todos los técnicos del sector de climatización y refrigeración.

Esto es, en gran parte, debido a la existencia de un grupo de socios comprometidos con los fines de la asociación, que han trabajado y trabajan de una forma desinteresada por mantener el nivel y el prestigio, de alguna forma heredado, evolucionando hacia las nuevas tendencias técnicas, tecnológicas y de mercado.

Una parte importante de este prestigio se debe a la labor del Comité Técnico, compuesto por un grupo de expertos muy respetados en nuestro sector y que, de alguna manera, han marcado las tendencias y la forma de hacer las cosas en los últimos años, ya sea desde ATECYR o desde el desarrollo de su actividad profesional. Como no podía ser de otra manera, el Comité Técnico de ATECYR viene trabajando desde hace años en la elaboración de una ingente documentación de divulgación científico-técnica sobre temas relacionados con el sector de climatización y refrigeración. Entre esta documentación, se encuentran traducciones de libros y artículos considerados de interés y bibliografía propia.

Dentro de la bibliografía propia nace la colección de Documentos Técnicos de Instalaciones en la Edificación (DTIE) como una respuesta a la necesidad detectada de agrupar y ordenar la información técnica sobre una serie de temas específicos, mediante la elaboración de unas guías donde se reúna toda la información que el técnico precisa sobre ese tema para desarrollar su labor.

Se trata de ofrecer al técnico una herramienta útil para la realización de su trabajo, sin tratar de condicionar su creatividad, incluyendo la última tecnología y tendencias, dejando a su interpretación las cuestiones normativas.

Por definición, el concepto de utilidad va unido inequívocamente a estos documentos, lo que nos ha hecho plantear algunos temas que, lejos de ser netamente técnicos, merecen la atención de nuestros expertos por la repercusión sobre la actividad de nuestros socios, los técnicos del sector. Me refiero a cuestiones de índole jurídico-técnico en los que nuestra actividad nos obliga a ponernos al día.

Como conclusión, esta colección de libros pretende constituirse como guías prácticas sobre temas de interés dentro del ámbito de la climatización y refrigeración, enfocadas a técnicos que trabajen o que tengan inquietudes en este ámbito. Sólo queda agradecer su aportación a los patrocinadores de estas ediciones, sin cuya ayuda sería imposible completar este interesante proyecto.

Manuel Acosta Malla

Presidente

AGRADECIMIENTO

Queremos agradecer a SAUNIER DUVAL, Socio Protector de ATECYR, la valiosa colaboración prestada a la edición de este nuevo Documento Técnico de Instalaciones en la Edificación.

Serie ATECYR de
DTIE - Documentos Técnicos de instalaciones en la Edificación

SERIE 1: Instalaciones sanitarias

*1.01 Preparación de agua caliente para usos sanitarios

*1.02 Calentamiento de agua de piscinas

1.03 Cálculo de redes de distribución de agua sanitaria

1.04 Cálculo de redes de evacuación y ventilación

SERIE 2: Condiciones de diseño

*2.01 Calidad del ambiente térmico

2-02 Calidad de aire interior

2.03 Ambiente acústico: origen, remedios y límites de ruidos y vibraciones

SERIE 3: Psicrometría

*3.01 Psicrometría

SERIE 4: Tuberías

*4 01 Cálculo de las pérdidas de presión y criterios de diseño

SERIE 5: Conductos

*5.01 Cálculo de conductos

SERIE 6: Combustible

*6.01 Combustión

6.02 Diseño y cálculo de chimeneas

6.03 Redes de distribución de gas, diseño y cálculo

SERIE 7: Cálculo de carga, demanda y consumo

*7.01 Cálculo de carga y demanda térmica

7.02 Cálculo de consumo de energía: simulación de sistema

SERIE 8: Fuentes de energía de libre disposición

*8.01 Recuperación de energía en sistemas de climatización

8.02 Bomba de calor

*8.03 Instalaciones Solares Térmicas para producción de Agua Caliente Sanitaria

SERIE 9: Sistemas de acondicionamientos de aire

*9.01 Tipos de sistemas

*9.02 Aplicaciones a diferentes tipos de edificios

*9.03 Sistemas de climatización para viviendas, residencias y locales comerciales

SERIE 10: Sistemas de calefacción

10.01 Tipos de sistemas

10.02 Aplicaciones para edificios residenciales

*10.03 Calderas individuales

SERIE 11: Control

11.01 Esquemas de control

***SERIE 12: Aislamiento térmico**

SERIE 13: Difusión de aire

SERIE 14: Acumulación de energía térmica

SERIE 15: Salas de máquinas

SERIE 16: Puesta en marcha, recepción y mantenimiento

SERIE 17: Varios

17.01 Análisis económico de sistemas

*17.02 Responsabilidad Civil del Ingeniero

* Editadas

INSTALACIONES SOLARES TÉRMICAS PARA PRODUCCIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA

INDICE

1 CONFIGURACIONES **11**

1.1 Descripción general de una instalación solar térmica 11

1.2 Criterios funcionales. 12
1.2.1 Principio de circulación. 12
1.2.2 Sistema de transferencia de calor. 15
1.2.3 Tipo de sistema de apoyo. 16
1.2.4 Forma de acoplamiento del sistema de apoyo. 18

1.3 Aplicación de los criterios funcionales. 20

1.4 Esquemas de funcionamiento. 22

1.5 Instalaciones solares en la edificación. 27
1.5.1 Con consumo centralizado. 29
1.5.2 Con consumo individual. 30

2 COMPONENTES **34**

2.1 Captador solar 34
2.1.1 Principio de funcionamiento 35
2.1.2 Elementos principales 36
2.1.3 Caracterización del funcionamiento 40
2.1.4 Orientación, inclinación y sombras 43
2.1.5 Conexionado 46
2.1.6 Cálculo de caudales de circulación 52

2.2 Otros componentes 52
2.2.1 Acumulador 52
2.2.2 Intercambiador de calor 56
2.2.3 Bomba de circulación 58
2.2.4 Vaso de expansión 59
2.2.5 Otros componentes hidráulicos 60
2.2.6 Sistemas de control 62
2.2.7 Sistema de energía de apoyo 62

2 CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO **63**

3.1 Temperaturas 63
3.2 Presiones 65
3.3 Temperaturas y presiones de diseño 66
3.4 Sistemas antiheladas 67
3.5 Fluido de trabajo 69

4 CÁLCULO **72**

4.1 Introducción 72
4.2 Parámetros de uso 72
4.2.1 Demanda de energía térmica 72
4.2.2 Consumo de energía térmica 76
4.3 Parámetros climáticos 77
4.3.1 Radiación solar 77
4.3.2 Temperatura ambiente 80
4.4 Parámetros de funcionamiento 81
4.5 Principios básicos de cálculo 82
4.6 Métodos de cálculo 83
4.7 Criterios de cálculo 85
4.7.1 Selección de la orientación e inclinación 86
4.7.2 Selección de los parámetros funcionales (Estimación del área de captación y del rendimiento medio anual) 87
4.7.3 Cálculo de prestaciones energéticas 88
4.8 Análisis de sensibilidad 90

5 EJEMPLO DE CÁLCULO: INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA EN UN HOTEL 95

5.1 Cálculo de la demanda de energía 95
5.2 Estimación del área 96
5.3 Cálculo de las prestaciones energéticas 97
5.4 Diseño de los sistemas de captación y de acumulación 100
5.5 Cálculo de intercambiadores, bombas y vasos de expansión 104

INTRODUCCIÓN

Aunque la sencillez de la tecnología sea una de las ventajas fundamentales de las instalaciones de energía solar térmica, la experiencia ha demostrado que ha sido uno de los grandes inconvenientes para su desarrollo. Una falta generalizada de conocimientos sobre el uso del calor, y sobre todo, del calor procedente de la energía solar, ha producido que los esfuerzos para el desarrollo del mercado correspondiente no se hayan realizado con las suficientes precauciones y conocimiento de causa por lo que, hasta ahora, no han dado los frutos esperados en España.

No obstante, en los últimos años se están realizando impulsos al mercado que puntualmente van ganando la confianza de usuarios y profesionales. Con ello se está empezando a generar una base de conocimientos de las instalaciones de energía solar térmica; la mayor parte de esta experiencia se está produciendo en instalaciones añadidas a edificios existentes y se dispone de menos experiencia en nuevas instalaciones en edificios nuevos.

Las instalaciones de energía solar térmica sobre edificios existentes, habitualmente acopladas a las instalaciones convencionales de producción de agua caliente sanitaria, están permitiendo demostrar que la tecnología funciona correctamente pero también se ha demostrado que todavía hay muchos aspectos críticos y que no está lo suficientemente madura para que todo funcione con plena garantía; por ello hay que seguir siendo precavidos y persistir en la mejora tecnológica de las instalaciones.

Las experiencias de las nuevas instalaciones proyectadas simultáneamente con el edificio está demostrando que el diseño y la integración de las instalaciones solares térmicas no es un problema. Siempre que se planteen desde el principio del proyecto, se pueden buscar las mejores soluciones de compromiso, entre la estética y la funcionalidad del diseño arquitectónico, con el objetivo de que el edificio sea sostenible, al menos, en la producción de agua caliente sanitaria. La problemática de la integración arquitectónica de las instalaciones solares ha surgido, normalmente, de los casos realizados de instalaciones incorporadas en edificios existentes con escasas posibilidades y queda reducida a ese ámbito.

Aunque las posibles aplicaciones de la energía solar térmica sigan siendo las mismas que señalan todos los manuales, bibliografía y documentos que circulan: agua caliente, sanitaria o industrial, calentamiento de piscinas, calefacción y refrigeración ambiental, otras aplicaciones térmicas: secaderos, evaporación, etc. cabe señalar que, en principio, y por seguir un orden de implantación y adquisición de tecnología siguen siendo las más importantes las instalaciones de producción de agua caliente sanitaria de aplicación al sector residencial y servicios.

A estos efectos cabe señalar las diferencias tecnológicas que se están empezando a establecer entre las aplicaciones de agua caliente sanitaria en el sector residencial individual con pequeñas instalaciones, representadas por los equipos solares domésticos o sistemas prefabricados, como se les empieza a denominar por normativa, y las instalaciones solares, grandes o medianas, a las que se refiere este documento (instalaciones a medida de acuerdo a la normativa UNE). Por tener un orden de magnitud, el tamaño mínimo de éstas debe considerarse siempre superior a 10 metros cuadrados de área útil de captación ó 1000 litros de acumulación solar.

Se ha pretendido, con este documento, realizar una organización y puesta al día de la descripción de la tecnología que se aplica y de los principales conceptos que se utilizan y, aunque se haya planteado como documento exclusivamente técnico, se ha preferido organizar ideas y transmitir conceptos en lugar de establecer procedimientos exhaustivos.

Aunque, como en cualquier tecnología, no hay criterios absolutos sino soluciones de compromiso, seguramente a medida que avance el conocimiento, y en esta fase se está, algunos o muchos de los criterios actualmente utilizados evolucionarán. No obstante, se pretende partir de una posición de control de la situación y dejar constancia de lo que se sabe que funciona, de lo fiable, de lo que en principio debe hacerse, de lo más generalizable, etc. con el único fin de consolidar una etapa previa de desarrollo.

En relación con los contenidos del documento, cabe resumirlos en los siguientes capítulos:

En el 1, se estudian los criterios de diseño y los modos de funcionamiento de las instalaciones, se aportan los condicionantes necesarios para definir el esquema de principio de una instalación solar térmica y se analizan las distintas tipologías y las posibles configuraciones que se pueden plantear en las instalaciones de los edificios.

En el 2 se analizan los componentes de las instalaciones solares térmicas, con mayor detalle en el elemento característico de las mismas: el captador solar. Se detallan sus elementos principales, sus características constructivas y de funcionamiento así como las condiciones de uso y montaje. Sobre el resto de componentes de una instalación solar, que suelen ser componentes también utilizados en otras instalaciones térmicas, se resaltan las particularidades, singularidades funcionales y detalles peculiares en relación con su uso en una instalación solar.

En el 3 se profundiza sobre aquellos aspectos de la tecnología solar térmica que pueden considerarse diferenciadores del resto de las instalaciones térmicas, fundamentalmente las condiciones especiales de temperaturas y presiones, producidas por la variabilidad de la fuente de energía de entrada.

En el 4, sobre el cálculo de instalaciones, se plantean las bases para la determinación de la demanda de energía asociada a la producción de agua caliente y la evaluación de la energía disponible con el examen de los datos climáticos que intervienen. Finalmente se realiza un análisis de los parámetros y factores que definen el funcionamiento de una instalación y se establecen los principios para realizar el dimensionado y cálculo de las instalaciones solares.

En el 5, se muestra un ejemplo de cálculo de una instalación solar prestando especial atención a aquellos aspectos particulares de este tipo de instalaciones.

1. CONFIGURACIONES

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE UNA INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA

La organización de los componentes en conjuntos funcionales o sistemas de una instalación y las interconexiones entre ellos constituyen el primer paso para analizar las alternativas de diseño y funcionamiento que se pueden plantear en una instalación solar para calentamiento de agua.

En la Figura 1.1 se muestra un esquema de funcionamiento básico de una instalación solar térmica, que consta de los siguientes sistemas:

- *Sistema de captación:* transforma la radiación solar incidente en energía térmica aumentando la temperatura del fluido de trabajo.
- *Sistema de intercambio:* realiza la transferencia de calor entre el fluido de trabajo que circula por el circuito primario y el agua que circula por el circuito secundario.
- *Sistema de acumulación:* almacena la energía térmica en forma de agua caliente.

- *Sistema de transporte:* hace circular el fluido de trabajo por el circuito primario y el agua de consumo a través del circuito secundario y del circuito de consumo de la instalación.
- *Sistema de control:* encargado de asegurar el correcto funcionamiento de la instalación solar.
- *Sistema de energía de apoyo:* complementa el aporte solar suministrando la energía adicional necesaria para cubrir la demanda prevista.

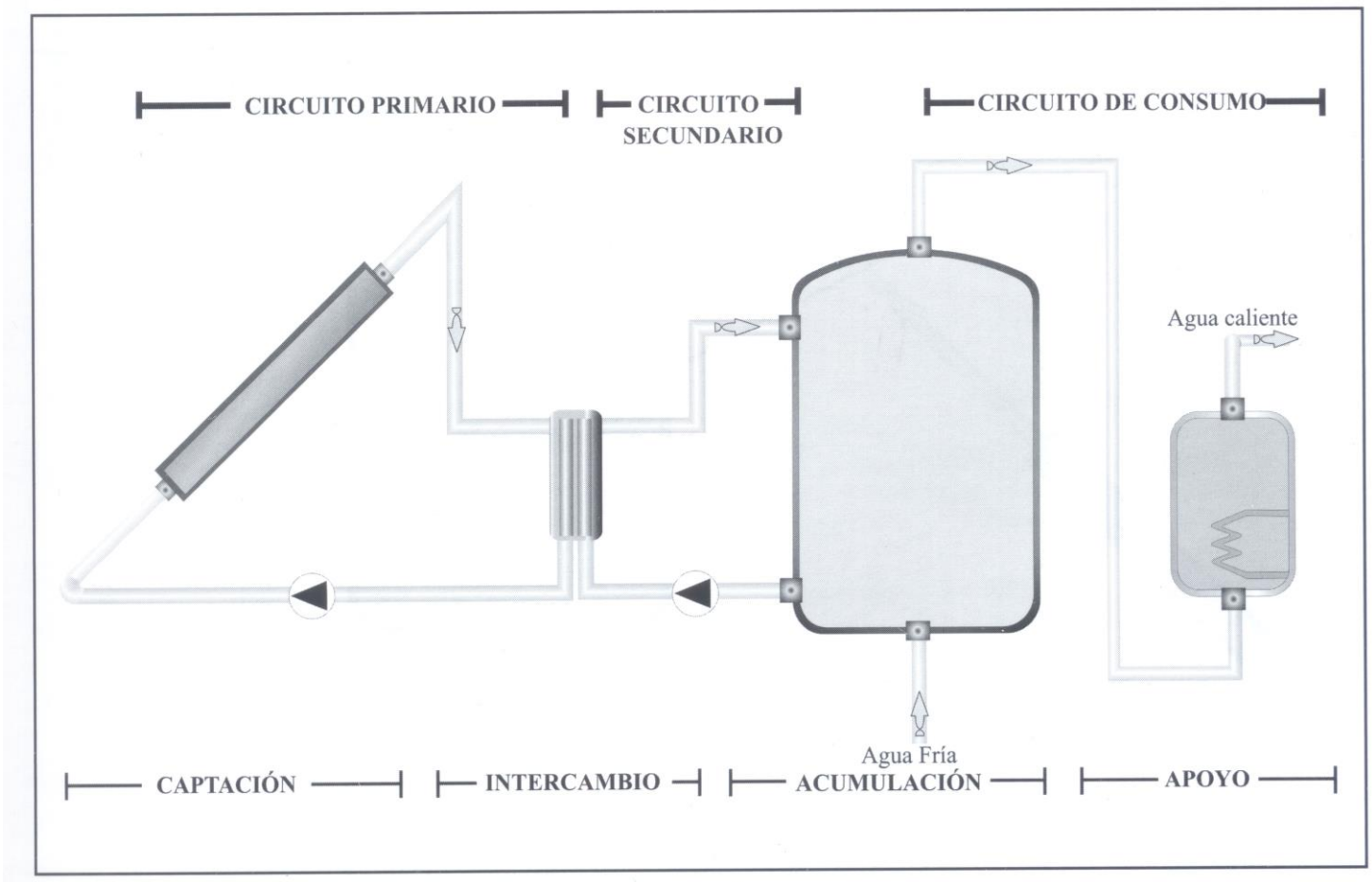


Figura 1.1: Esquema básico de una instalación solar térmica.

La instalación solar térmica mostrada en la Figura 1.1 consta de los siguientes circuitos:

- Circuito primario: formado por los captadores y las tuberías que los unen, en el que el fluido de trabajo recoge la energía térmica producida en los captadores y la transfiere al circuito secundario a través de un intercambiador de calor.
- Circuito secundario: en el que se recoge la energía captada en el circuito primario a través de un sistema de intercambio y se transfiere al sistema de acumulación.
- Circuito de consumo: que parte de la red de alimentación de agua fría y llega a los puntos de consumo.

En determinadas configuraciones con intercambiador exterior entre el acumulador y el circuito de consumo (apartado 1.4 de este manual) se hace referencia al circuito terciario, definido como aquel circuito encargado de recoger la energía almacenada en el sistema de acumulación y de transferirla al circuito de consumo a través de un intercambiador.

1.2. CRITERIOS FUNCIONALES

Las instalaciones solares térmicas pueden ser analizadas en base a los siguientes criterios funcionales:

1. Principio de circulación del fluido de trabajo en el circuito de captación.
2. Mecanismos de transferencia de calor desde el circuito de captación solar al circuito de consumo.
3. Tipo de sistema de apoyo
4. Forma de acoplamiento del sistema de apoyo en la instalación solar.

1.2.1 Principio de circulación.

Se refiere al mecanismo mediante el cual se produce el movimiento del fluido que circula en el circuito de captadores. Debe distinguirse entre **circulación forzada** o por bomba y la **circulación natural** o por termosifón.

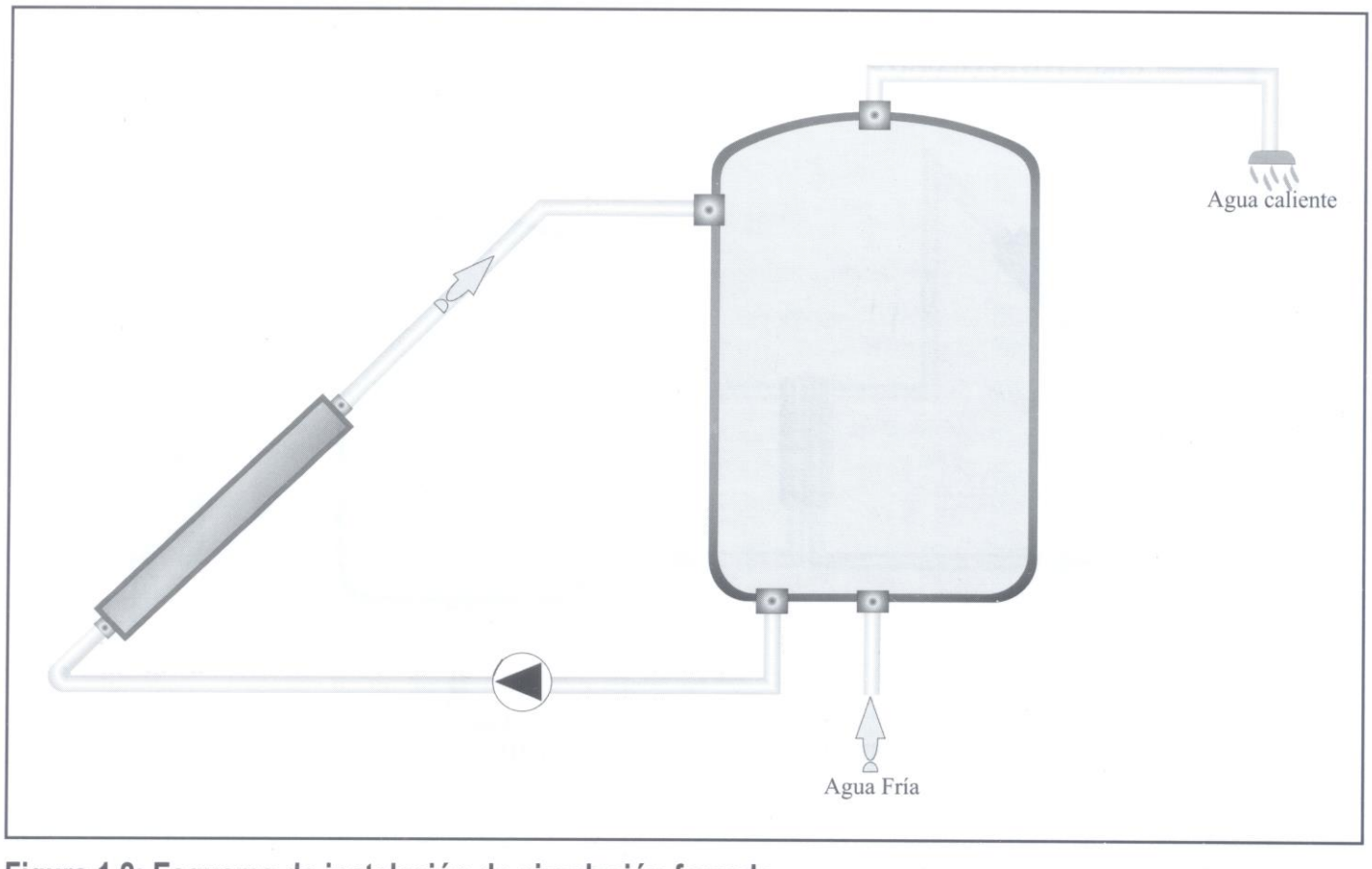


Figura 1.2: Esquema de instalación de circulación forzada

a) Circulación forzada

Utiliza una bomba de circulación para hacer circular el fluido de trabajo a través de los captadores solares por lo que la transferencia de calor al fluido tiene lugar por convección forzada.

La instalación dispone de un sistema de control, normalmente de tipo diferencial, que activa o desactiva la bomba dependiendo de la diferencia de temperaturas entre dos sondas. Habitualmente una de estas sondas se encuentra colocada a la salida de los captadores solares y la otra se instala en la parte inferior del acumulador. Esta estrategia de control es la más utilizada si bien se emplean otras dependiendo de la configuración de la instalación, etc.

En la Figura 1.3 se observa la evolución de las temperaturas correspondientes a la salida del captador y a la parte inferior del acumulador, así como el estado de funcionamiento de la bomba (ON-OFF). Cuando la diferencia de temperaturas entre captador y acumulador supera el nivel de consigna establecido (= 6-7 ºC) el sistema de control activa la bomba (ON), consiguiéndose de esta forma aumentar la energía interna del acumulador. Sin embargo, cuando esta diferencia disminuye por debajo de aproximadamente 2-3 ºC la bomba se desactiva (OFF). El valor de esta diferencia de parada que desactiva la bomba debe ajustarse en cada caso para conseguir una ganancia de energía térmica en el acumulador que compense el consumo de energía eléctrica asociado al funcionamiento de la bomba.

En las instalaciones de circulación forzada es necesario, por tanto, un consumo eléctrico auxiliar para disponer de la energía térmica y, por ello, se debe garantizar que la ganancia térmica no esté hipotecada por un consumo eléctrico significativo. De ahí la necesidad de optimizar la potencia eléctrica instalada (la normativa europea establece limitaciones, ver apartado 2.2.3) y por otro lado, las horas de funcionamiento, en relación con la energía útil obtenida.

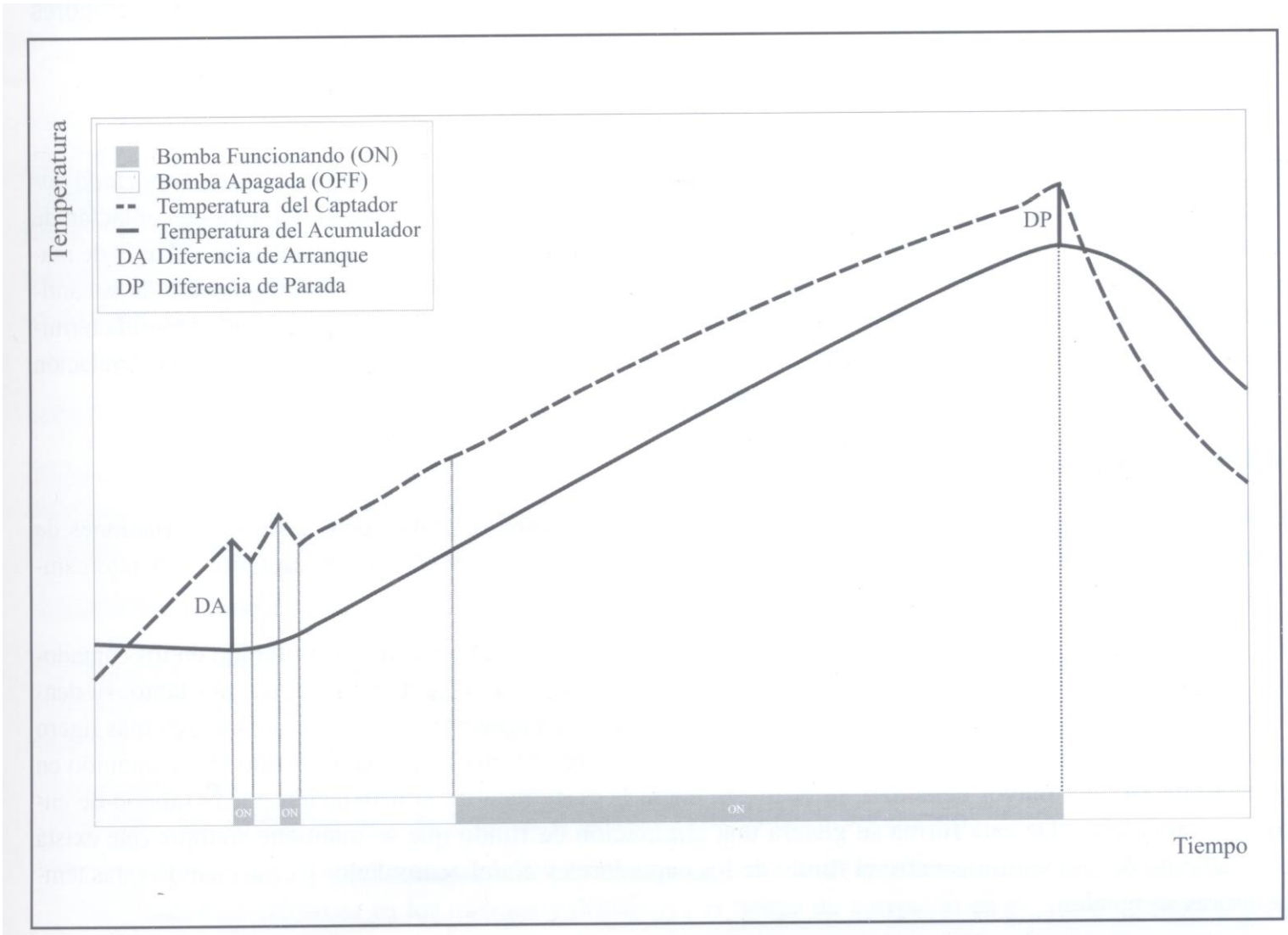


Figura 1.3: Control diferencial de la bomba de circulación.

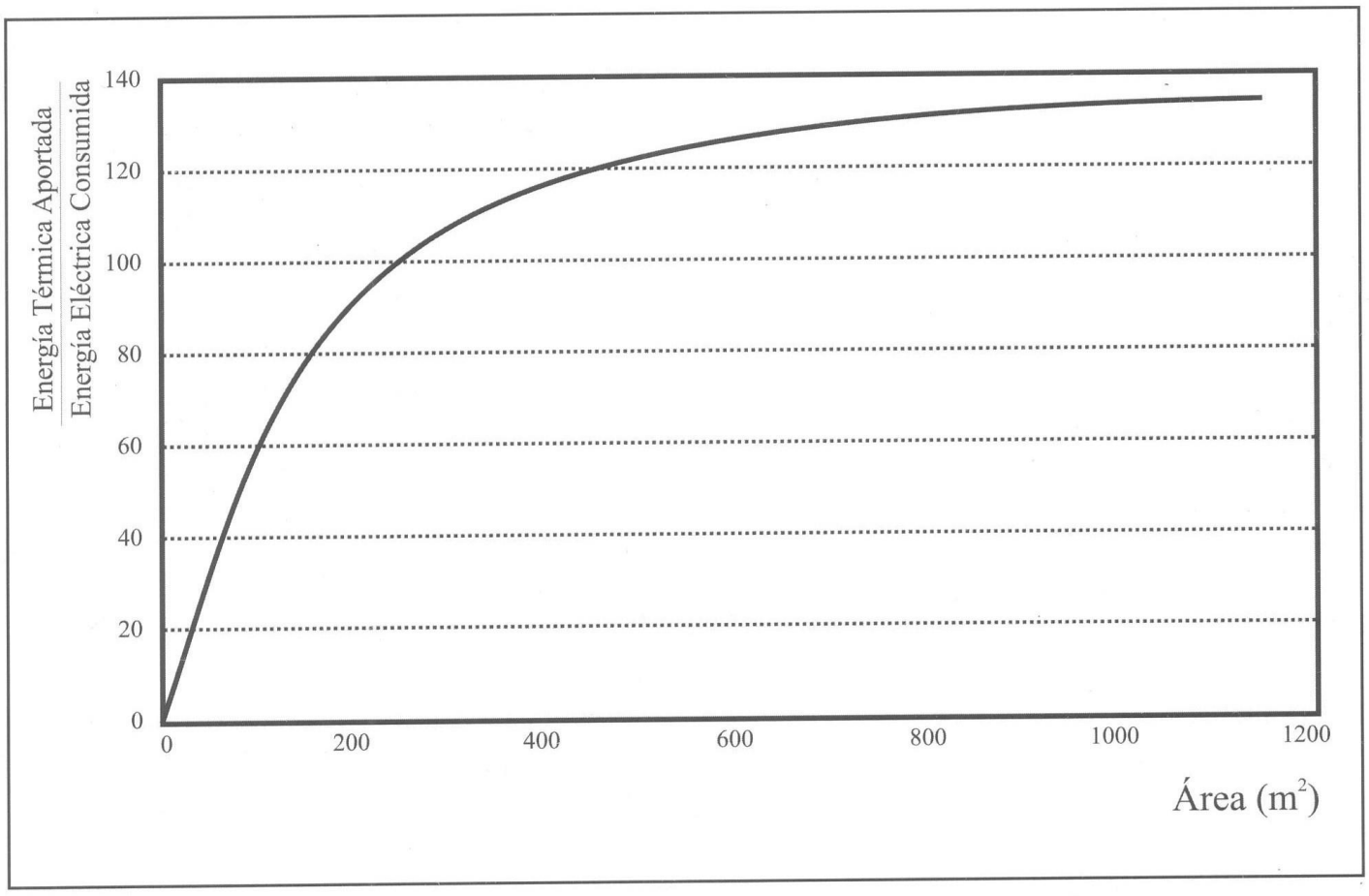


Figura 1.4: (Energía térmica aportada/Energía eléctrica consumida) en función del área de captadores solares.

En la Figura 1.4 se muestra la evolución aproximada de la relación *Energía térmica útil anual aportada por la instalación* y el *consumo de energía eléctrica anual de las bombas* en función del área de captación de la instalación solar. En general, como se observa en esta figura a medida que la instalación solar es de mayor tamaño el consumo eléctrico de las bombas, en términos porcentuales, es inferior respecto de la cantidad de energía térmica útil aportada por la instalación solar ya que la relación representada (energía térmica útil/consumo de electricidad) es mayor. De hecho es superior a cien, es decir, las bombas de la instalación consumen menos del 1% de la energía útil obtenida.

b) Circulación natural

Utiliza únicamente los cambios de densidad del fluido de trabajo, consecuencia de las variaciones de temperatura, para hacerlo circular entre el captador y el acumulador o entre el captador y el intercambiador de calor.

En la Figura 1.5 se representa el esquema de este tipo de instalaciones. El fluido contenido en los captadores se calienta al recibir la radiación solar, aumentando su temperatura y disminuyendo, por tanto, su densidad. Cuando la temperatura de este fluido es superior a la del contenido en el acumulador, es más ligero y pesa menos por lo cual asciende hacia la parte alta del circuito, mientras que el fluido frío contenido en el acumulador, con mayor densidad, se desplaza hacia la parte baja de la instalación por la tubería de entrada a captadores. De esta forma se genera una circulación de fluido que se mantiene siempre que exista un gradiente de temperaturas entre el fluido de los captadores y el del acumulador y cesa cuando estas temperaturas se igualan.

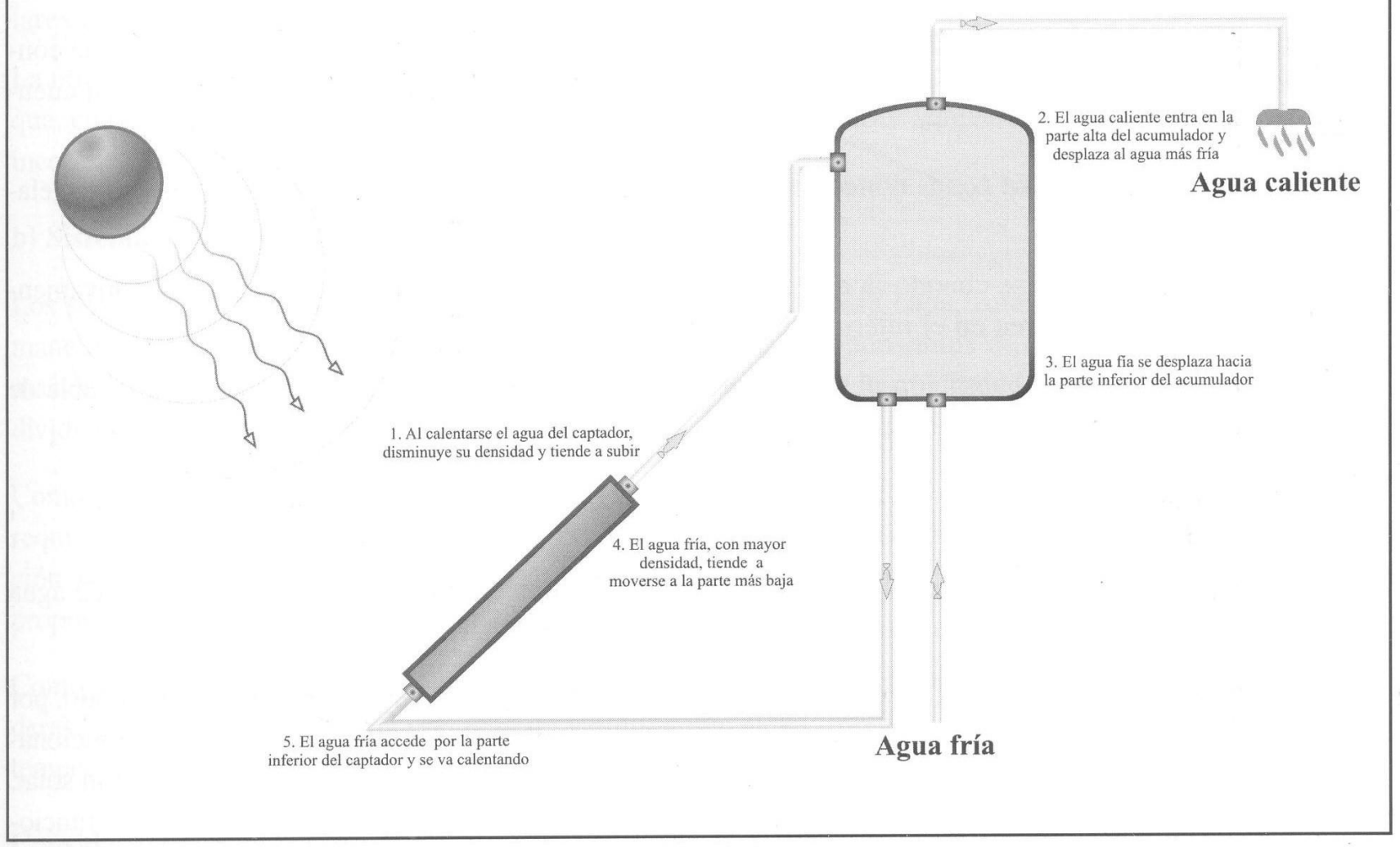


Figura 1.5: Esquema de instalación de circulación por termosifón

La fuerza impulsora del movimiento parte de la diferencia de densidades que genera la diferencia de temperaturas que depende en gran medida, además de otros parámetros, de la irradiancia incidente sobre el captador solar. A medida que aumenta la irradiancia incidente aumenta tanto la diferencia de temperatura entre la salida y la entrada de los captadores solares como el caudal de circulación a través de ellos.

La regulación por termosifón es muy simple ya que al producirse la circulación del fluido por diferencia de densidades no precisa de un sistema de bombeo adicional ni de ningún dispositivo electrónico de control.

1.2.2 SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Este criterio define cómo se produce la transferencia de calor desde el fluido de trabajo en captadores al agua caliente destinada a consumo. Atendiendo a que tengan intercambiador que participe en este proceso de transferencia de calor o no, puede distinguirse, respectivamente, entre instalaciones indirectas y directas.

a) Instalaciones indirectas

En estas instalaciones el fluido que circula por los captadores solares no es el agua destinada a consumo. Incorporan uno o varios intercambiadores que separan ambos fluidos, estando situados los intercambiadores en el circuito primario, en el de consumo o en ambos (ver Figuras 1.10 a 1.16). Se caracterizan porque:

- Permiten utilizar una mezcla de agua con anticongelante como fluido de trabajo en el circuito primario que actúa como sistema de protección frente a heladas en la instalación.
- Evitan el contacto directo del agua sanitaria de consumo con los captadores, con lo que se eliminan las incrustaciones calcáreas en los mismos y disminuye el riesgo de corrosión en el circuito primario.
- La instalación puede funcionar con presiones de trabajo distintas en cada uno de los circuitos.

b) Instalaciones directas

En este tipo de instalaciones el fluido de trabajo que circula por los captadores solares es el agua de consumo. Frente a la ventaja de mayor simplicidad y menor coste de la instalación, se debe tener en cuenta que:

- No se pueden emplear en zonas donde se alcancen temperaturas ambiente inferiores a las de congelación del agua.
- Tampoco deben utilizarse cuando la dureza del agua sea elevada ya que se aumenta significativamente la incrustación calcárea en el interior de los captadores solares.
- Se debe prestar especial atención al uso de materiales compatibles entre sí y con el agua potable de consumo con objeto de evitar la aparición de cualquier tipo de corrosión en el circuito.

1.2.3 Tipo de sistema de apoyo

En este criterio se considera el diseño y funcionamiento del sistema convencional de preparación de agua caliente que acoplado a la instalación solar termina de preparar el agua caliente para su uso.

Aunque a veces se considere que el sistema de apoyo no es parte de la instalación solar se ha preferido, por precaución, considerarlo incluido dadas las implicaciones que un mal diseño o un inadecuado funcionamiento de un sistema convencional puede tener en el funcionamiento y prestaciones de la instalación solar. Esta incorporación también permite analizar las implicaciones que el sistema de apoyo tiene en el funcionamiento y en la optimización del sistema completo.

En cualquier caso y con carácter general, debe considerarse que el diseño y dimensionado del sistema de apoyo debe realizarse sobre la base de que puede no existir precalentamiento por parte de la instalación solar y, por tanto, el sistema de apoyo debe ser capaz de suministrar la demanda total requerida por la instalación.

Los sistemas de apoyo pueden clasificarse en sistemas **instantáneos** y de **acumulación,** así como todo el rango intermedio de sistemas seminstantáneos o de semiacumulación, cuyas características pueden analizarse en cualquier tratado de instalaciones térmicas convencionales. Aquí únicamente se van a destacar aquellos conceptos que sean diferenciadores y aplicables en su condición de acoplamiento a las instalaciones solares.

Los sistemas de apoyo también pueden clasificarse por el tipo de energía que utilizan, ya sean combustibles (gasóleo, gas natural o GLP), electricidad (por efecto Joule o mediante bombas de calor) u otras renovables (biomasa, etc.). A estos efectos es importante destacar la importancia de considerar los efectos globales de la transformación de la energía en energía térmica y, en particular, la degradación energética que significa la transformación de electricidad en energía térmica por efecto Joule. El empleo de energía eléctrica con fines térmicos supone siempre elevados consumos de energía primaria (rendimientos exergéticos muy bajos) por lo que se ha de evitar la utilización de la misma.

Por último, los sistemas de apoyo también pueden clasificarse como **centralizados** o **individuales** en función del lugar donde se produce la transformación de energía de apoyo en energía térmica final.

a) Sistemas centralizados

Los sistemas de apoyo centralizados utilizan instalaciones comunes para un conjunto de usuarios o de puntos de consumo y se encargan de preparar el agua caliente que posteriormente se distribuye. En este caso son comunes las instalaciones y los consumos del combustible de apoyo, distribuyéndose el agua caliente que, como se indica en el apartado 1.5, en determinados casos ha de ser necesariamente contabilizada. Los sistemas de apoyo centralizados sólo son acoplables a instalaciones solares centralizadas.

La utilización de sistemas instantáneos o de acumulación no afecta, en principio, a la instalación solar aunque, cuando se analicen con más detalle las condiciones de diseño y acoplamiento, se verán las ventajas e inconvenientes de cada solución.

b) Sistemas individuales

Los sistemas de apoyo individuales preparan el agua caliente para cada usuario, o punto de consumo, de manera que son independientes tanto las instalaciones como los consumos de energía asociados. Los sistemas de apoyo individuales son acoplables a instalaciones solares de cualquier tipo, sean centralizadas o individuales.

Como sistemas individuales instantáneos se suelen utilizar calentadores instantáneos o calderas mixtas; el requisito fundamental, que no siempre se cumple, a efectos de optimizar el funcionamiento de la instalación solar, es que permitan la regulación de la temperatura a la salida del calentador mediante reducción proporcional del consumo de combustible.

Como sistemas individuales de acumulación se utilizan termos eléctricos o acumuladores acoplados a calderas. El propio diseño de los sistemas de acumulación lleva implícito que dispongan de regulación de la temperatura de preparación.

Consideraciones sobre los sistemas de apoyo incorporados en el acumulador solar

Un caso especial de los sistemas de apoyo mediante acumulación corresponde a las instalaciones que utilizan un único acumulador para almacenar tanto la energía solar como la del calentamiento de apoyo.

Este tipo de solución pretende integrar en un único acumulador el volumen solar y el volumen de apoyo, e imponiendo determinados condicionantes de diseño y funcionamiento, la solución podría ser técnicamente correcta pero, para ello se requeriría una fiabilidad y un conocimiento de la tecnología que actualmente se considera no se dispone de forma generalizada.

Los condicionantes de diseño podrían resumirse en la necesidad de independizar térmicamente el funcionamiento de los dos volúmenes y disponer de la máxima fiabilidad en el funcionamiento.

El problema de la utilización de este tipo de sistema surge, fundamentalmente, por las experiencias anteriores de instalaciones de energía solar "consumidoras de energía de apoyo", y en muchos casos energía eléctrica por efecto Joule, que incluso aumentan su ineficacia utilizando los captadores como disipadores, que disponen de equipos de control de escasa fiabilidad que no detectan que la parte solar deje de funcionar, que sólo se controla la continuidad en el suministro sin considerar la procedencia del consumo, que utilizan acumuladores no estratificados que hacen que el funcionamiento del sistema de apoyo reduzca significativamente el rendimiento de la instalación solar, etc.

Como se ha comentado anteriormente el uso de la energía eléctrica para aplicaciones térmicas (calentamiento de agua, etc.) supone un importante despilfarro energético al implicar consumos significativos de energía primaria. Además, al aumentar la temperatura del acumulador solar mediante la incorporación en el mismo del sistema de apoyo, disminuye el rendimiento del sistema de captación debido a que aumenta la temperatura del fluido de entrada a los captadores solares (ver apartado 2.1). Por estos motivos, el borrador del Código Técnico de la Edificación prohíbe la incorporación de un sistema de apoyo en el acumulador solar y, en la actualidad, Comunidades Autónomas como la andaluza incorporan esta prohibición en su normativa técnica.

1.2.4 Forma de acoplamiento del sistema de apoyo

Además del tipo de sistema de energía de apoyo empleado, la forma de acoplamiento entre la instalación solar y el sistema de apoyo influye en el funcionamiento global de la instalación de producción de agua caliente sanitaria.

A los efectos de acoplamiento de sistemas se distinguen, además del acoplamiento principal que puede ser en serie o en paralelo, otras posibilidades que deben ser consideradas por las implicaciones que pueden tener en el funcionamiento de la instalación solar. Estas son el acoplamiento directo de la instalación solar al circuito de distribución, el circuito de recirculación y el circuito para tratamiento térmico de prevención de la legionelosis.

a) Acoplamiento en serie

Mediante este conexionado se consigue que el agua destinada a consumo sea calentada inicialmente por la instalación solar y, en segundo lugar es el sistema de apoyo quien se encarga, cuando sea necesario, de realizar el calentamiento final hasta la temperatura deseada.

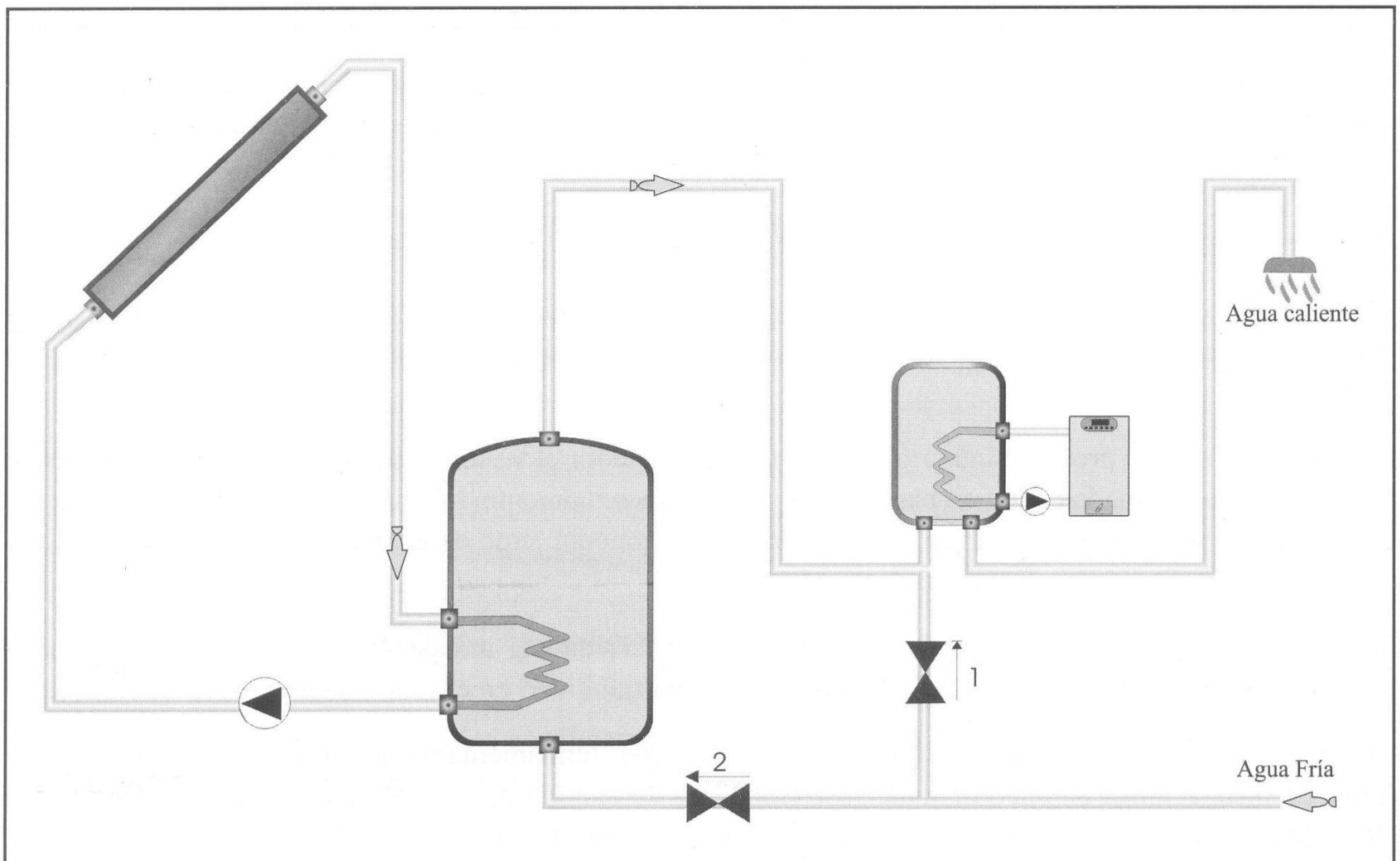


Figura 1.6: Acoplamiento en serie del sistema de apoyo.

El acoplamiento en serie (válvula 1 cerrada, válvula 2 abierta) permite que todo el agua que va a ser preparada pase previamente por la instalación solar con lo cual se evacúa toda la energía disponible en la misma y se maximizan las prestaciones energéticas de la instalación solar. En esta situación, debe destacarse la importancia de ajustar la temperatura de preparación por la influencia que tiene en el caudal que pasa por la instalación solar.

El acoplamiento siempre debe disponer de un by-pass de conexión que permita no interrumpir el suministro de agua caliente para las operaciones de mantenimiento de las instalaciones (válvula 1 abierta, válvula 2 cerrada).

b)Acoplamiento en paralelo

El abastecimiento de agua caliente al consumo se realiza, opcionalmente, desde el sistema de apoyo o desde la instalación solar. Para dar el servicio adecuado, esta forma de acoplamiento requiere que el acumulador solar disponga de la temperatura de preparación mínima establecida. Cuando la temperatura del acumulador solar desciende del valor de consigna asignado, la conexión debe conmutarse al sistema de apoyo. En este tipo de acoplamiento resulta necesario manipular, manual o automáticamente, la conexión de ambos sistemas.

Se utiliza exclusivamente en instalaciones muy pequeñas, normalmente de edificios existentes, donde la conexión en serie obligaría a largos trazados de conexión.

c)Consideraciones sobre el acoplamiento directo

En determinadas ocasiones se pretende, en los conexionados en serie, evitar que el agua calentada exclusivamente por la instalación solar tenga que pasar por el sistema de apoyo y para ello se puede disponer de un by-pass que permita el conexionado directo entre la instalación solar y el circuito de distribución/consumo (válvulas 1 y 3 abiertas, válvula 2 cerrada).

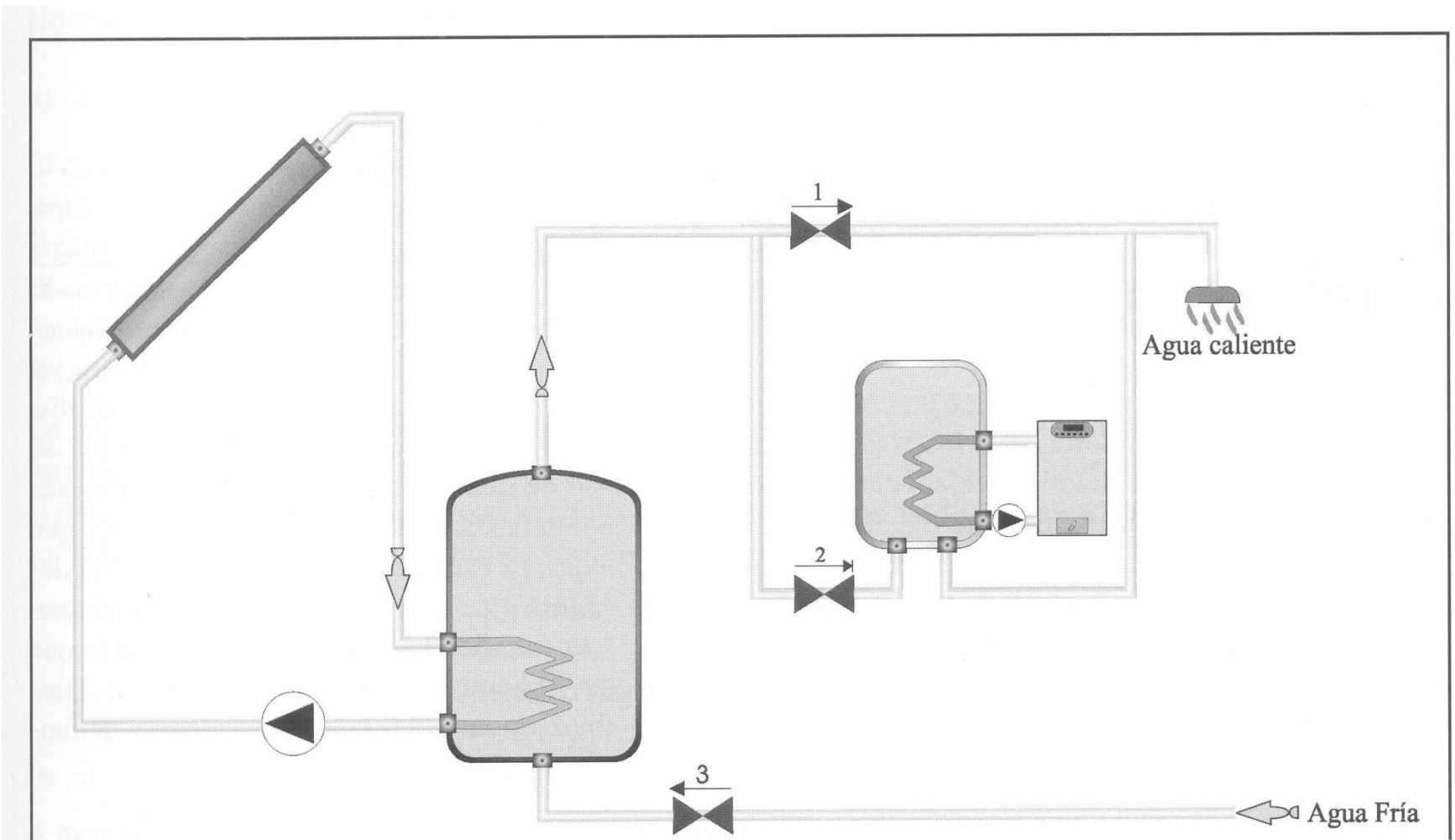


Figura 1.7 Acoplamiento en serie con by-pass.

Esta solución, no aplicable a grandes instalaciones, se adopta normalmente en instalaciones existentes cuando el sistema de apoyo es de muy bajo rendimiento (pérdidas térmicas elevadas, etc.) y lo que puede hacer es disminuir las aportaciones de la instalación solar.

d) Circuito de recirculación

En instalaciones con largos circuitos de distribución, situación muy habitual en instalaciones centralizadas, se instala un circuito de recirculación para disponer de agua caliente de forma inmediata en el punto de consumo más alejado del sistema de preparación

En general, este circuito no debe interferir en el funcionamiento de la instalación solar de forma que la recirculación, con agua que se ha enfriado por pérdidas térmicas después de salir del sistema de apoyo, debe realizarse sobre el acumulador del sistema de apoyo siempre que este sistema esté activo.

Si esta recirculación tuviera lugar sobre el acumulador solar se podría calentar éste con la energía de apoyo y disminuir, además, el rendimiento de la instalación solar debido al menor rendimiento del sistema de captación solar cuando la temperatura de entrada a captadores aumenta.

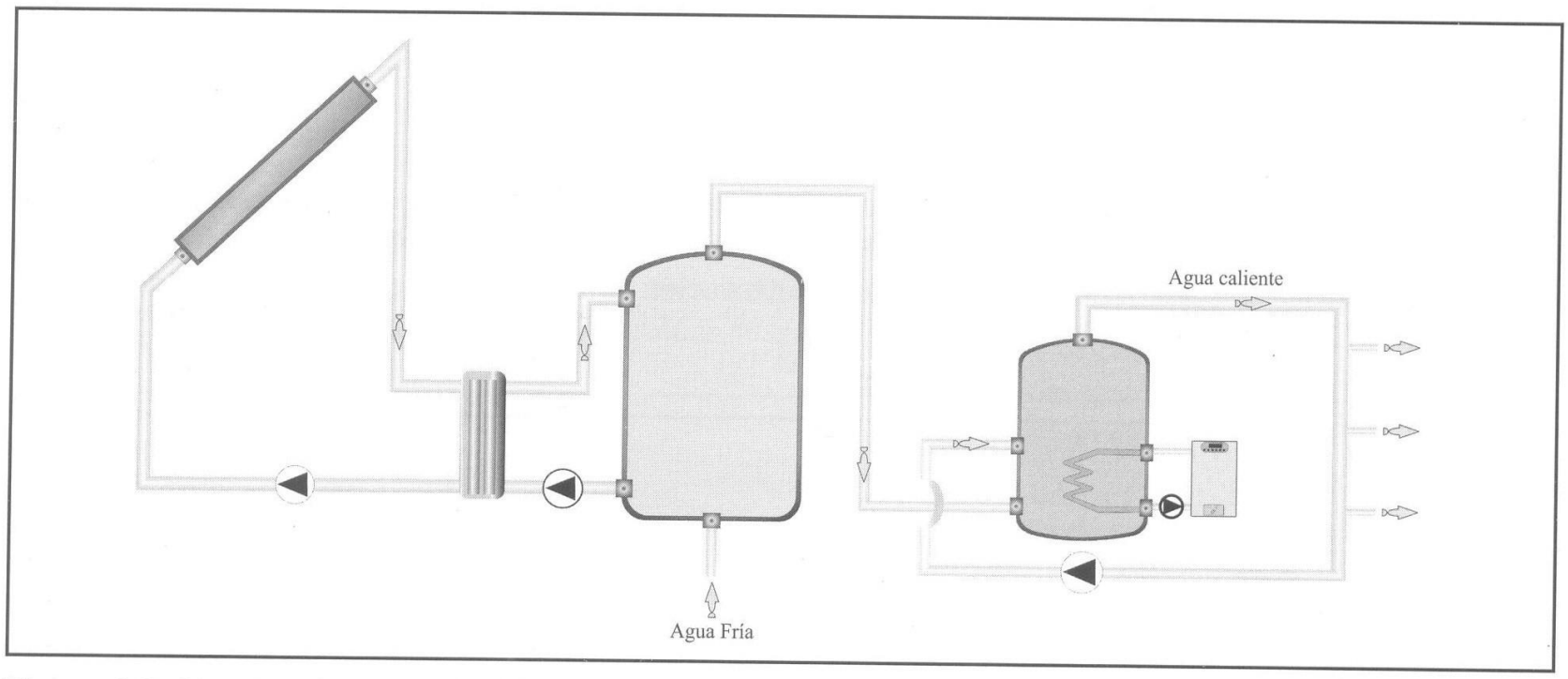


Figura 1.8: Circuito de recirculación .

No obstante lo anterior, cuando existe un conexionado directo entre la instalación solar y el circuito de distribución/consumo y el aporte de la instalación solar es suficiente para abastecer la demanda requerida, se puede realizar la recirculación sobre el acumulador solar en caso de que el sistema de apoyo permanezca desconectado. Esta situación permite evitar que se consuma el combustible del sistema de apoyo, ya que permanece desconectado, siendo la instalación solar quien se encarga exclusivamente de satisfacer la demanda de energía requerida y combatir las pérdidas térmicas de la red de distribución. En general, el consumo térmico que lleva implícito una determinada demanda de agua caliente, fundamentalmente en lo que afecta a las pérdidas en el circuito de distribución y en el sistema de acumulación, podría combatirse, también parcialmente, con la instalación solar, siempre que se establezcan las condiciones de diseño y de funcionamiento apropiadas.

e) Tratamiento térmico para prevención de la Legionelosis

En las instalaciones que requieran el tratamiento térmico de los acumuladores para la prevención de la Legionelosis, se debe considerar el conexionado de la acumulación solar con el circuito del sistema de apoyo de forma que se permita realizar el tratamiento térmico periódico.

En algunos casos, y siempre que se reúnan las condiciones necesarias, se puede realizar el tratamiento térmico de los acumuladores solares utilizando exclusivamente como fuente de energía térmica el sistema de captación de forma que, sin consumo, se alcancen en los acumuladores solares las temperaturas necesarias.

1.3 APLICACIÓN DE LOS CRITERIOS FUNCIONALES

Se establece, en lo que sigue, la selección de los criterios funcionales señalando que esta selección no debe considerarse excluyente ni restrictiva; lo que se pretende es que los criterios sean de aplicación generalizada. Naturalmente, puede haber excepciones y situaciones distintas tan válidas como las aquí expuestas.

Las aplicaciones analizadas en este documento están centradas en instalaciones medianas y grandes que, como ya se estableció en la introducción, estén en un rango de área útil de captación superior a 10 metros cuadrados o de volumen de acumulación solar superior a 1000 litros. Para este tipo de instalaciones, entre las opciones funcionales referidas en el apartado anterior se seleccionan las siguientes:

- De circulación forzada. La circulación forzada del fluido de trabajo permite maximizar la cantidad de radiación solar transformada en energía térmica útil cedida al circuito de consumo.
- Con circuitos indirectos. Se consigue eludir la presencia de agua sanitaria en los captadores solares y, en caso de incorporar un intercambiador en el circuito primario, disminuir el volumen de la mezcla agua-anticongelante a utilizar en el circuito de captadores.
- Acoplamiento en serie del sistema de apoyo con la instalación solar. Con este conexionado la instalación solar se comporta como precalentamiento de un sistema de preparación de agua caliente sanitaria y resulta máxima la capacidad de evacuación de calor de la instalación solar.

La selección del tipo de sistema de apoyo, centralizado o individual, con acumulación o instantáneo, requiere una evaluación completa del diseño asociada a costes, de inversión y explotación, y rendimientos del sistema de preparación de agua caliente sanitaria.

a)Consideraciones sobre los sistemas de circulación

El máximo efecto útil de las instalaciones solares se alcanza cuando se consigue la máxima cantidad de energía térmica útil con el menor consumo de energía en el trasvase. Este máximo efecto útil se consigue manteniendo la capacidad de evacuación de energía térmica del campo de captadores que está muy relacionada con el caudal en circulación. Al aumentar el tamaño de una instalación solar los condicionantes de los circuitos por termosifón (tamaños de tuberías, pérdidas térmicas, caudales en circulación, etc.) no producen un aumento proporcional de la capacidad de evacuación.

En las instalaciones de circulación forzada sí se puede mantener esta capacidad de evacuación, e incluso mejorar a medida que aumenta el tamaño de la instalación solar. En estos casos (Figura 1.4), al aumentar el área de captación aumenta la relación entre la energía térmica aportada y el consumo de energía eléctrica de la bomba por lo que en términos energéticos se mejora la evacuación de la energía térmica.

Por otro lado, los condicionantes que impone la situación relativa de los componentes en una instalación por termosifón contrastan con la versatilidad que permiten las instalaciones de circulación forzada y, en general, es más fácil conseguir una adecuada integración de la instalación solar en un edificio cuando sólo hay que resolver la del sistema de captación ya que los acumuladores y resto de componentes se suelen instalar en el interior del mismo (sala de calderas, sótano, etc.).

A medida que aumenta el tamaño de la instalación es más clara la ventaja de utilizar la circulación forzada y en instalaciones grandes puede ser la única forma. La circulación por termosifón se utiliza habitualmente en pequeñas instalaciones individuales y, en algunos casos, deben compararse las ventajas e inconvenientes de emplear la solución de varias instalaciones pequeñas por termosifón en lugar de una instalación grande de circulación forzada.

b)Consideraciones sobre los mecanismos de intercambio

La incorporación de intercambiadores, a pesar de la ventaja que supone la separación de circuitos, implica que las instalaciones solares indirectas presenten menor rendimiento energético inicial, mayor coste y mayor pérdida de carga que las instalaciones directas.

No obstante, el efecto del menor rendimiento inicial de una instalación al introducir el intercambiador queda compensado por el mayor rendimiento y fiabilidad a largo plazo. Por otra parte, hay que tener en cuenta que un diseño y dimensionado adecuados del intercambiador minimizan la reducción del rendimiento del proceso de transferencia de calor.

El mayor coste de inversión de las instalaciones indirectas queda compensado por la reducción de los costes de explotación, con lo que a largo plazo y durante el ciclo de vida el coste total es menor. Además habría que considerar los costes adicionales asociados a los problemas de habilidad, mantenimiento, etc.

Finalmente se destaca que los captadores solares quedan aislados de las posibles incrustaciones calcáreas con lo que el rendimiento de los mismos se mantiene prácticamente inalterable con el tiempo. En las instalaciones directas, en caso de emplear aguas con alto contenido en sales minerales, la disminución de rendimiento en los captadores puede ser muy importante.

1.4 ESQUEMAS DE FUNCIONAMIENTO

En este apartado se presentan esquemas de principio de instalaciones forzadas indirectas donde los diversos componentes de la instalación solar se encuentran centralizados.

En la Figura 1.9 se representa el esquema de principio de una instalación solar térmica en el que se destacan los siguientes sistemas y/o componentes:

- Sistema de captación solar.
- Sistema de acumulación solar. Consta de doble acumulación, en circuito cerrado (acumulador de inercia) y en circuito de consumo (acumulador de consumo). Es decir, las alternativas de acoplamiento del sistema de acumulación son dos: entre circuito secundario y circuito terciario (acumulador de inercia) y en el propio circuito de consumo.
- Sistema de intercambio. Consta de doble intercambio, entre captación solar y acumulación (intercambiador solar) y entre acumulación y consumo (intercambiador de consumo).
- Sistema de apoyo. Al estar conectado en serie la instalación solar precalienta el agua sanitaria que alimenta este sistema de apoyo.

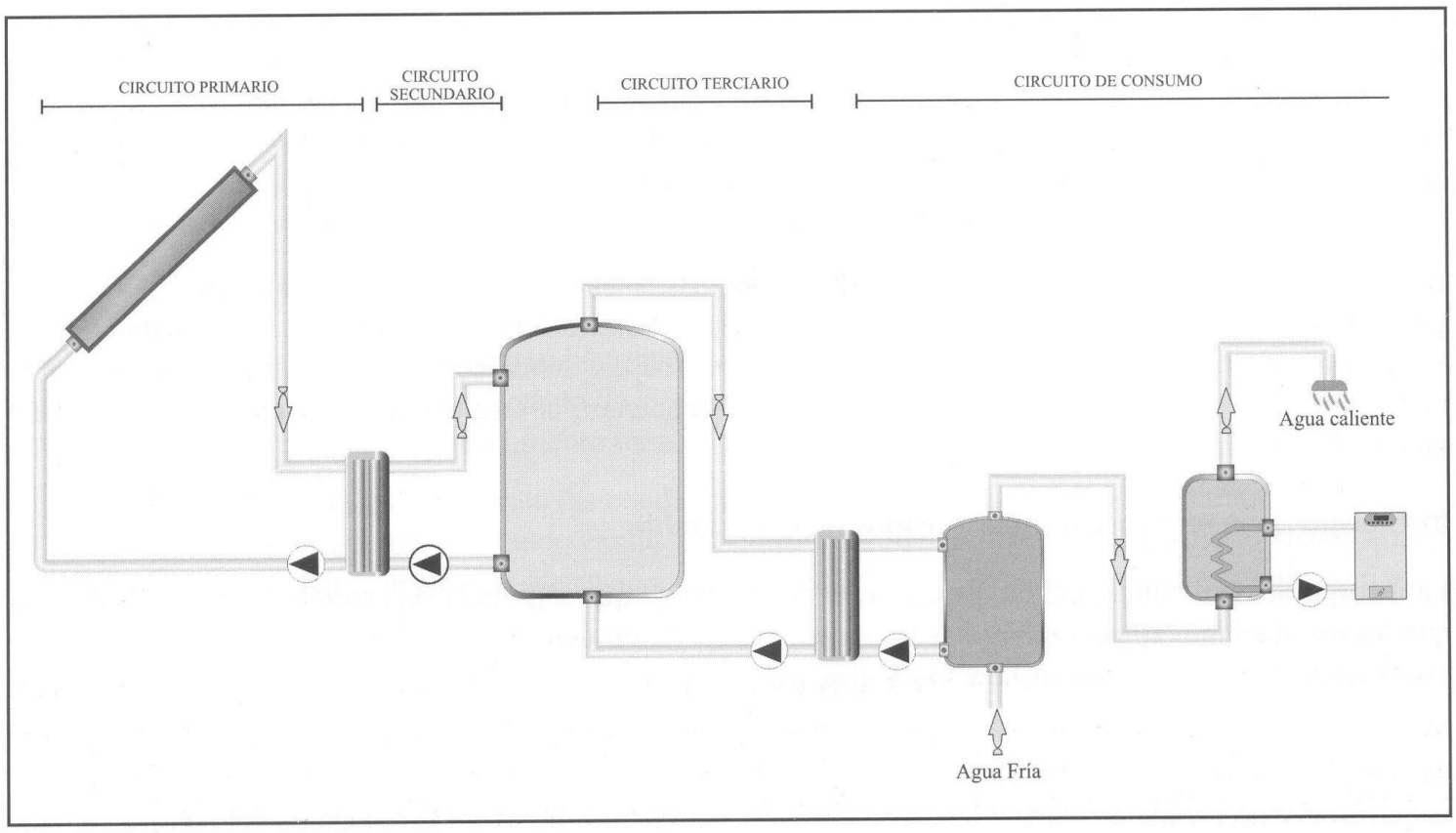


Figura 1.9: Esquema de principio de instalación solar térmica.

Sin considerar el sistema de apoyo, que se analiza posteriormente en las configuraciones, y a partir de este esquema general, cabe distinguir diversos esquemas de principio o configuraciones. Estas configuraciones se han clasificado tanto en base al sistema de acumulación como al sistema de intercambio. La nomenclatura asignada a cada una de estas configuraciones es del tipo XY, tomando X e Y los siguientes valores:

X=A si la instalación presenta sólo sistema de acumulación en el circuito de consumo

X=B si la instalación presenta sólo sistema de acumulación en circuito cerrado (inercia)

X=C si la instalación presenta doble sistema de acumulación (consumo e inercia)

Y=l si la instalación dispone sólo de intercambiador solar

Y=2 si la instalación dispone sólo de intercambiador de consumo

Y=3 si la instalación presenta doble sistema de intercambio (solar y consumo)

De acuerdo a esta nomenclatura las configuraciones consideradas son:

Configuración Al: Instalación solar con sistema de acumulación en circuito de consumo e intercambiador solar

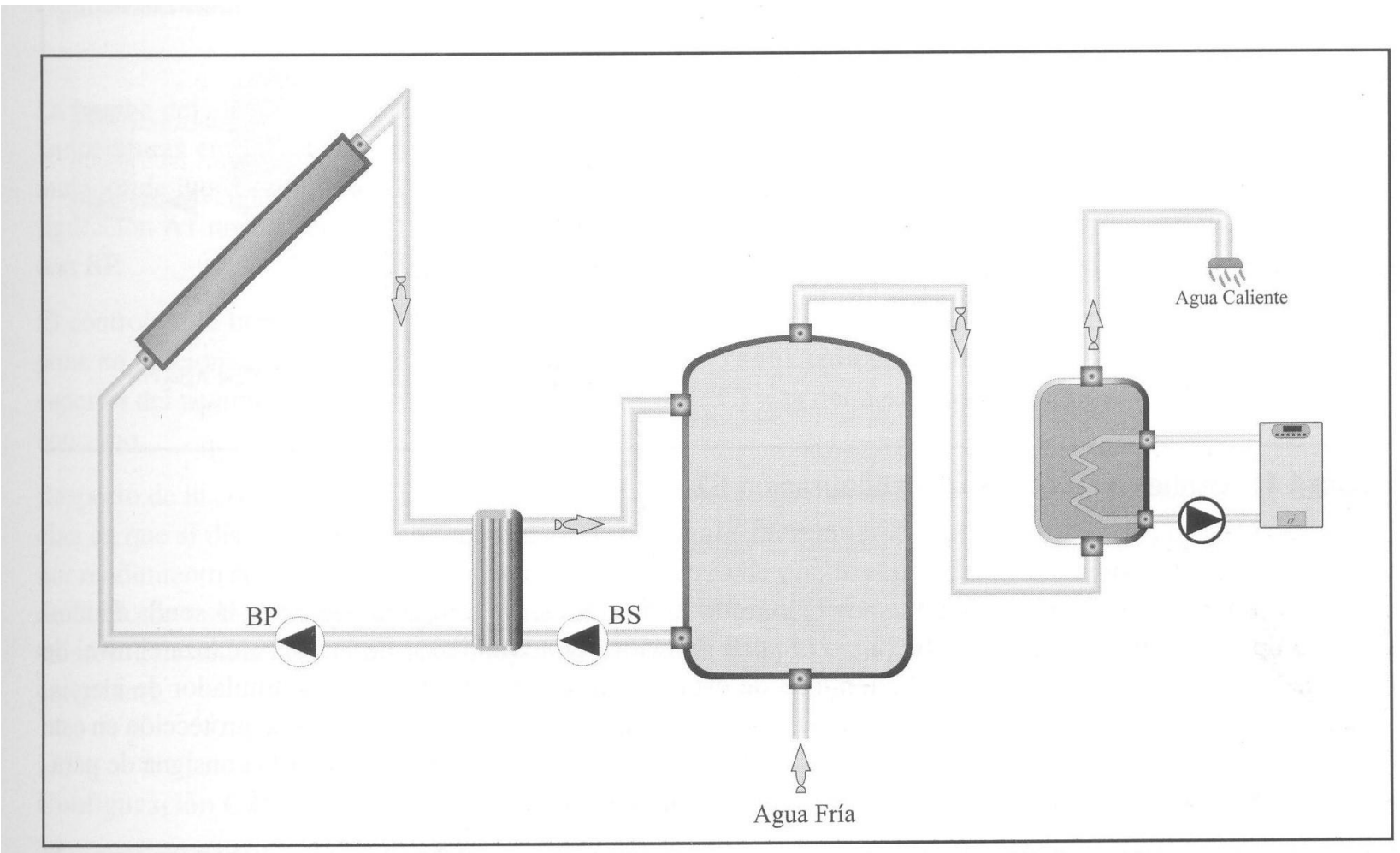


Figura 1.10: Esquema de principio Configuración A1.

La bomba del circuito primario (BP) se activa cuando la diferencia de temperaturas entre la sonda de temperatura de captadores y la sonda situada en la parte inferior del acumulador alcanza el nivel de consigna marcado (≈ 6-7 ºC). Salvo en instalaciones con largos recorridos en el circuito primario y con elevada inercia térmica, la bomba del circuito secundario (BS) se encuentra enclavada eléctricamente con BP. Mediante esta activación de las bombas se consigue aumentar la cantidad de energía térmica almacenada en el acumulador. Estas bombas paran cuando se alcanza la temperatura máxima de protección en el acumulador o porque disminuye la diferencia de temperaturas entre captadores y acumulador hasta alcanzar la consigna de parada (≈ 2-3 ºC).

En la actualidad, a pesar del mayor coste del sistema de acumulación en el circuito de consumo en comparación con el sistema de acumulación de inercia, es con gran diferencia la configuración más utilizada en instalaciones medianas y grandes (> 20 m^2). Esta configuración presenta la ventaja de su mayor simplicidad respecto al resto de configuraciones mostradas en este apartado.

Configuración B2: Instalación solar con sistema de acumulación en circuito cerrado e intercambiador de consumo

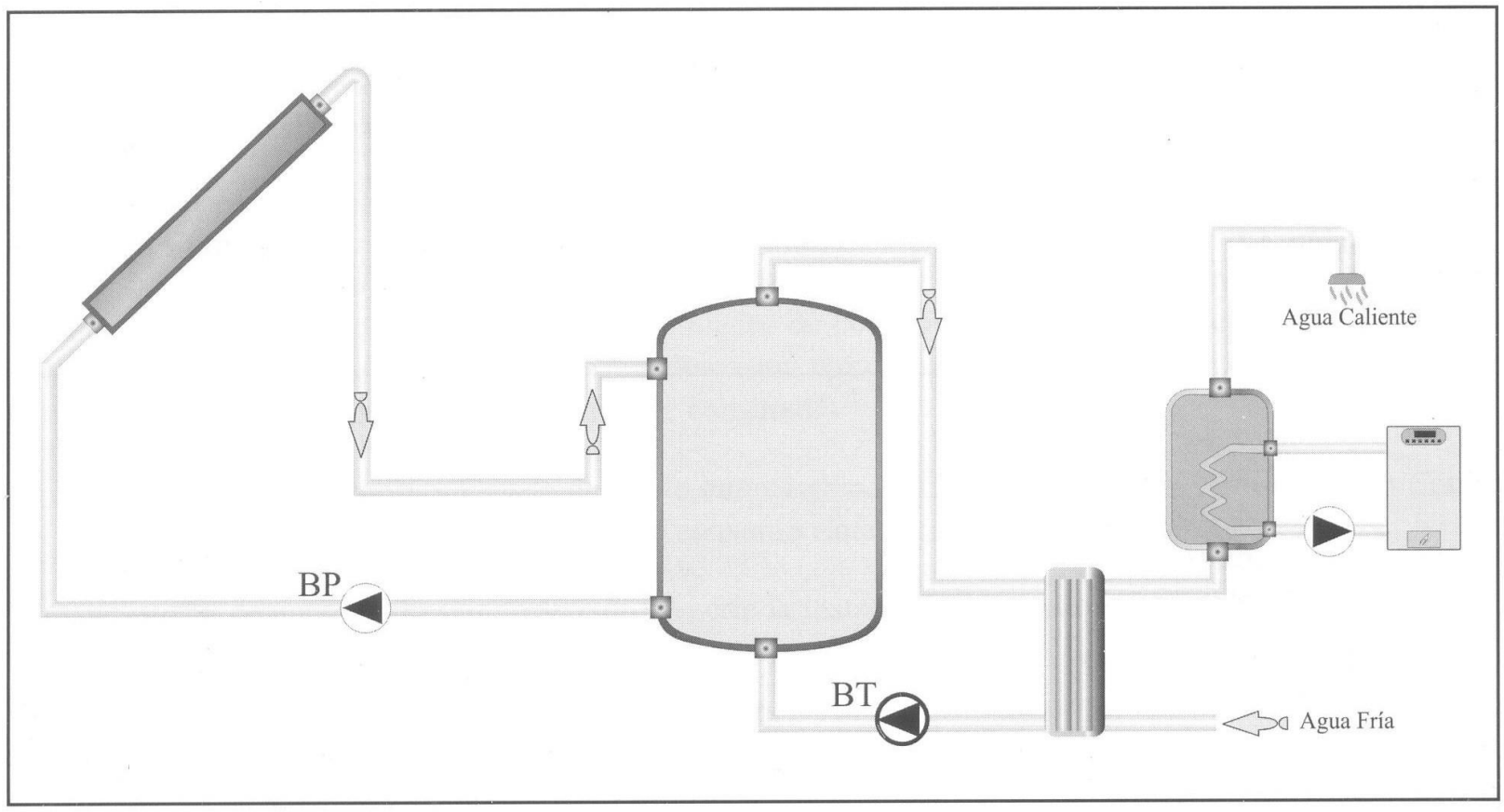


Figura 1.11: Esquema de principio Configuración B2.

La bomba del circuito primario (BP) se activa cuando la diferencia de temperaturas entre la sonda de temperatura de captadores y la sonda situada en la parte inferior del acumulador de inercia alcanza el nivel de consigna establecido **(**≈ 6-7 ºC), produciéndose de esta forma la carga térmica del acumulador de inercia. Este proceso de carga térmica se interrumpe cuando se alcanza la temperatura máxima de protección en este acumulador o cuando disminuye la diferencia de temperaturas indicada hasta alcanzar la consigna de parada (≈ 2-3 ºC). En esta configuración no existe circuito secundario.

La bomba del circuito terciario (BT) debe activarse cuando exista consumo de agua caliente sanitaria y la temperatura en la parte superior del acumulador de inercia sea superior a la del agua fría de entrada al intercambiador de consumo (≈ 6-7 ºC).

Esta configuración (al igual que las configuraciones C2, B3 y C3) presenta la ventaja, al encontrarse el sistema de acumulación en un circuito cerrado, del coste inferior del acumulador de inercia en comparación con el de los acumuladores convencionales de agua caliente sanitaria.

Configuración B3: Instalación solar con sistema de acumulación en circuito cerrado y doble sistema de intercambio

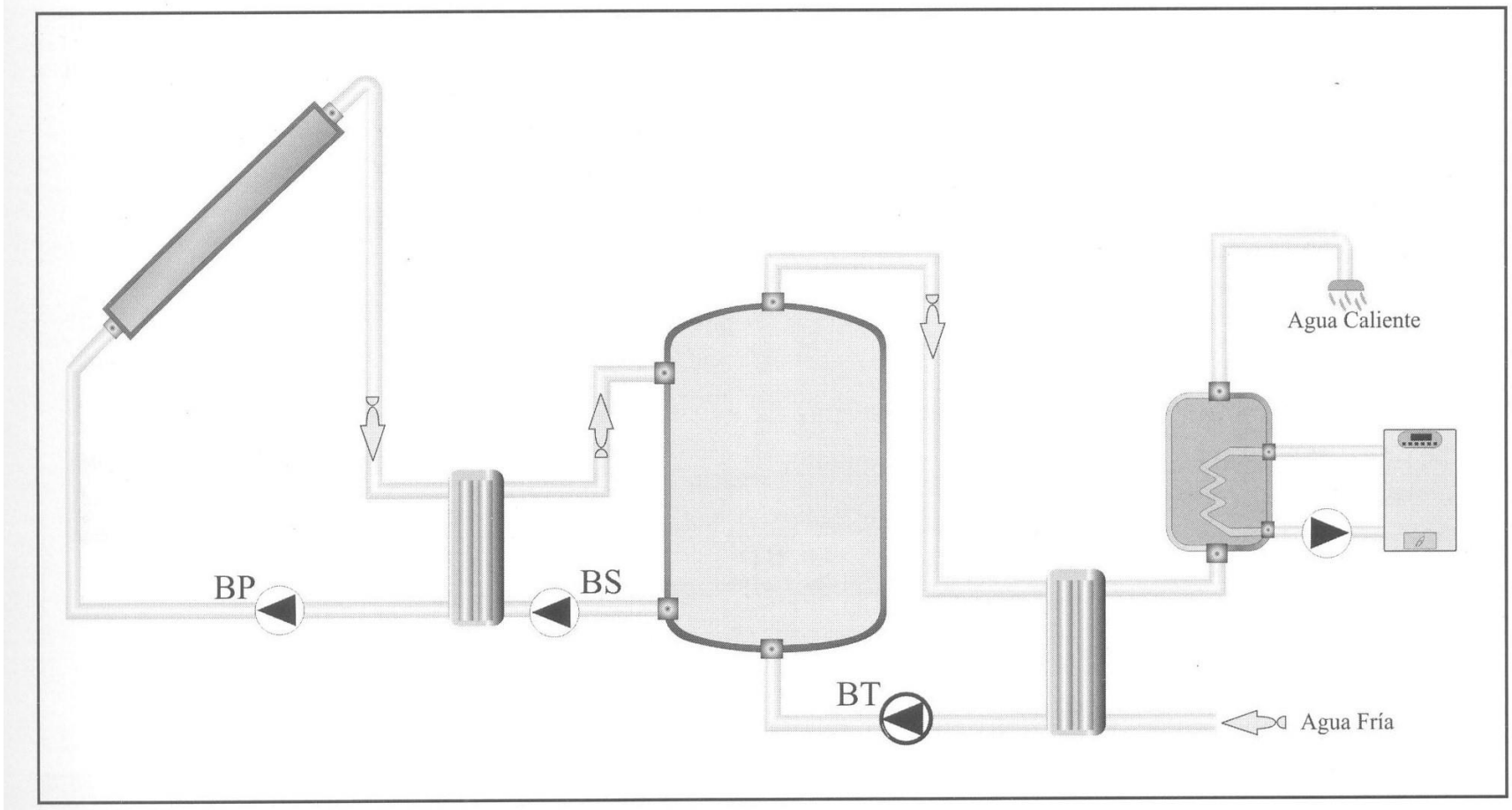


Figura 1.12: Esquema de principio Configuración B3.

La bomba del circuito primario (BP) se activa como en el caso anterior, es decir cuando la diferencia de temperaturas entre la sonda de temperatura de captadores y la sonda situada en la parte inferior del acumulador de inercia alcanza el nivel de consigna establecido (≈ 6-7 ºC). Al igual que en el caso de la configuración Al normalmente la bomba del circuito secundario (BS) se encuentra enclavada eléctricamente con BP.

El control de la bomba del circuito terciario (BT) se realiza como en la configuración B2. Esta bomba se pone en funcionamiento cuando se detecta consumo de agua caliente sanitaria y la temperatura en la parte superior del acumulador de inercia es superior (≈ 6-7 ºC) a la del agua fría de entrada al intercambiador de consumo.

Respecto de la configuración B2, las instalaciones solares que responden a la configuración B3 se diferencian en que al disponer de un intercambiador adicional (intercambiador solar) presentan, en principio, menor rendimiento si bien por el contrario tienen la ventaja de que los captadores trabajan con menor volumen de fluido de trabajo ya que el fluido contenido en el acumulador de inercia no circula a través de los captadores. Este último aspecto cobra mayor importancia cuando este fluido es una mezcla de agua con anticongelante.

Configuración C2: Instalación solar con doble sistema de acumulación e intercambiador de consumo

Al igual que en los casos B2 y B3 la bomba del circuito primario (BP) se activa cuando la diferencia de temperaturas entre la sonda de temperatura de captadores y la sonda situada en la parte inferior del acumulador de inercia alcanza el nivel de consigna fijado.

Las bombas del circuito terciario (BT) y del circuito de consumo (BC), situada esta última entre el intercambiador y el acumulador de consumo, funcionan simultáneamente activándose cuando la diferencia de temperaturas entre la parte superior del acumulador de inercia y la parte inferior del acumulador de consumo alcanzan la consigna establecida (≈ 6-7 ºC). Gracias a la activación de estas bombas se consigue aumentar la cantidad de energía térmica almacenada en el acumulador del circuito de consumo. Este proceso de carga térmica se interrumpe cuando se alcanza la temperatura máxima de protección en el acumulador de consumo o cuando disminuye la diferencia de temperaturas indicada hasta alcanzar la consigna de parada (≈ 2-3 ºC)

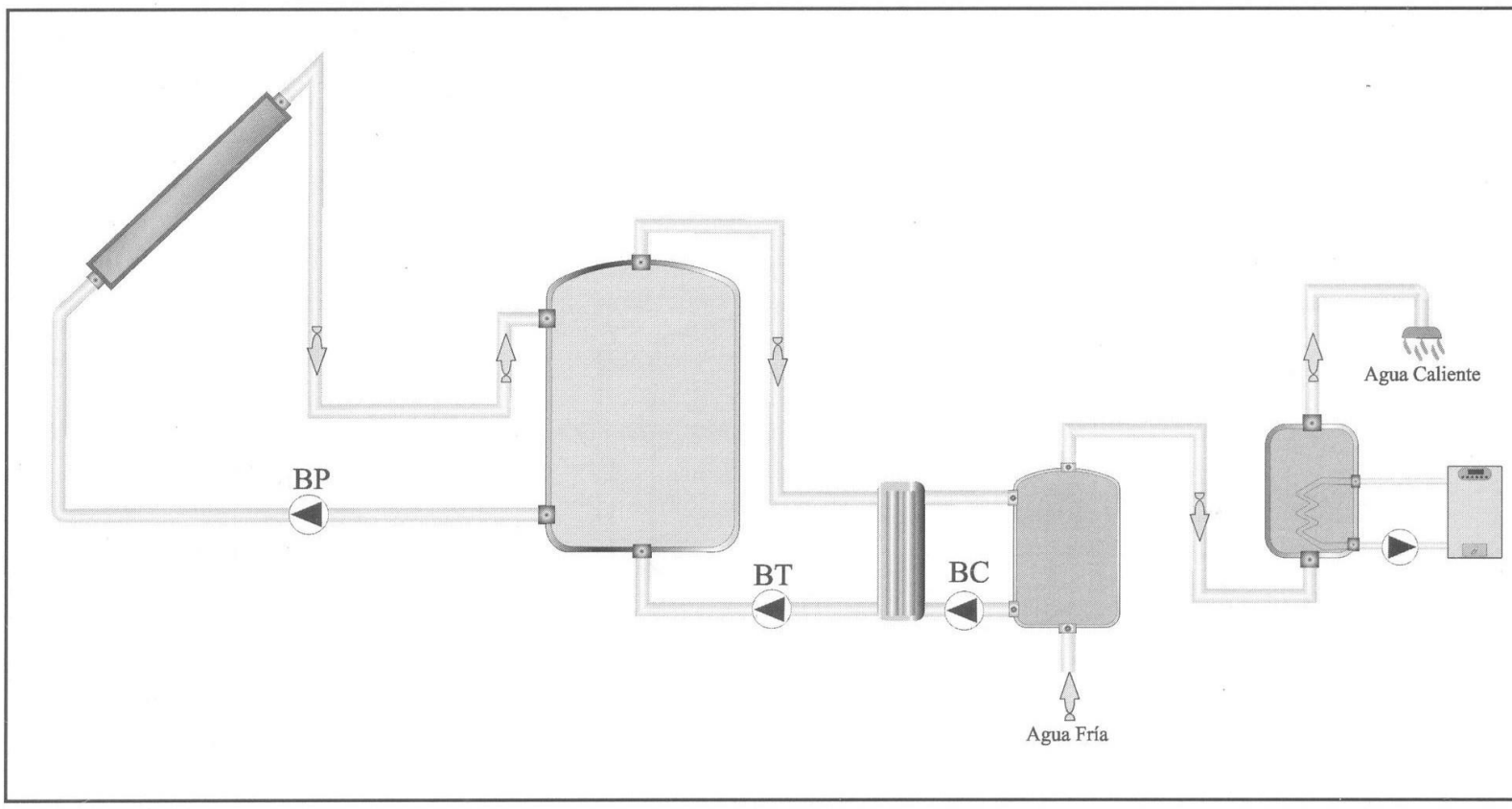


Figura 1.13: Esquema de principio Configuración C2.

Una de las ventajas que presenta la incorporación del acumulador de consumo es que permite mantener los caudales de circulación prácticamente constantes a través del intercambiador de consumo. Solamente en caso de que se esté produciendo consumo de agua caliente sanitaria se modifica ligeramente el caudal que circula por el circuito secundario del intercambiador debido a que parte del caudal de consumo no pasa directamente a través del acumulador de consumo sino a través del secundario del intercambiador de consumo; normalmente este porcentaje es pequeño (inferior al 15% del caudal total de consumo). Por tanto, en este caso el dimensionado del intercambiador de consumo no presenta variaciones significativas respecto al del intercambiador solar (caudales similares en ambos lados, etc.).

Sin embargo, en las configuraciones B2 y B3 puede resultar más complejo dimensionar adecuadamente el intercambiador de consumo ya que en muchas ocasiones los caudales de circulación en ambos lados del intercambiador de consumo pueden ser muy diferentes. En este caso es especialmente recomendable emplear algún sistema de control encargado de regular en cada instante el caudal del primario del intercambiador de consumo en función del caudal de consumo.

Configuración C3: Instalación solar con doble sistema de acumulación y doble sistema de intercambio

La bomba del circuito primario (BP) se activa cuando la diferencia de temperaturas entre la sonda de temperatura de captadores y la sonda situada en la parte inferior del acumulador de inercia alcanza el nivel de consigna establecido (≈ 6-7 ºC). Como se comentó en las configuraciones Al y B3, salvo en instalaciones con largos recorridos en el circuito primario y con elevada inercia térmica las bombas del circuito secundario (BS) y del circuito primario se encuentran enclavadas eléctricamente, produciéndose de esta forma la carga térmica del acumulador de inercia. Este proceso de carga térmica se interrumpe cuando se alcanza la temperatura máxima de protección en el acumulador de inercia o cuando disminuye la diferencia de temperaturas indicada hasta alcanzar la consigna de parada (≈ 2-3 ºC).

Como en la configuración C2 las bombas del circuito terciario (BT) y del circuito de consumo (BC) se encuentran enclavadas eléctricamente y se activan al alcanzar la diferencia de temperaturas entre la parte superior del acumulador de inercia y la parte inferior del acumulador de consumo el valor de consigna (≈ 6-7 ºC). De esta forma se carga térmicamente el acumulador de consumo interrumpiéndose este proceso de carga cuando se alcanza la

temperatura máxima de protección en el acumulador de consumo o cuando disminuye la diferencia de temperaturas entre acumuladores indicada hasta alcanzar la consigna de parada (≈ 2-3 ºC).

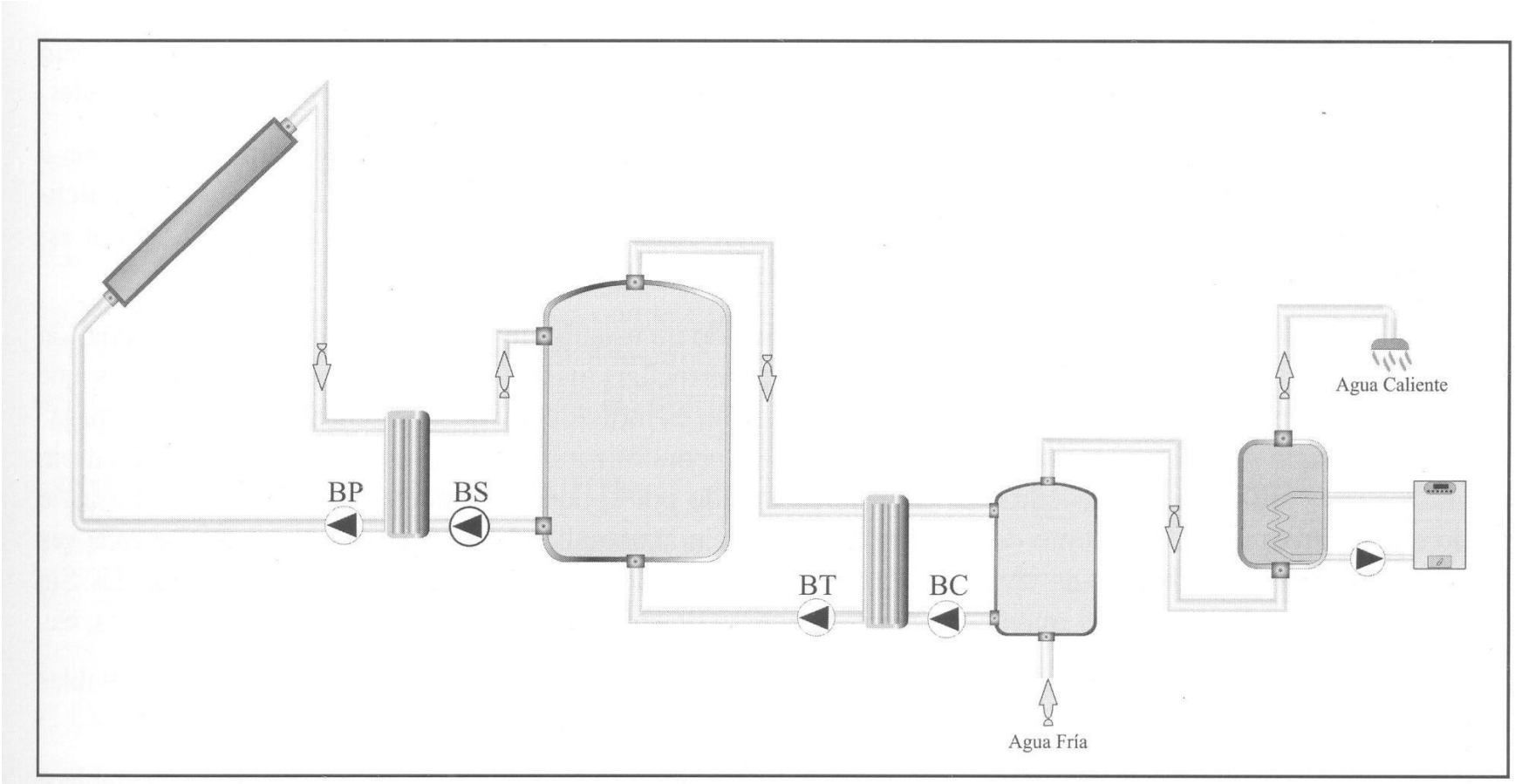


Figura 1.14: Esquema de principio Configuración C3.

Consideraciones adicionales

Las instalaciones solares utilizadas en hoteles, hospitales, viviendas multifamiliares, centros deportivos, industrias, etc. normalmente responden a alguna de las configuraciones anteriores. Cualquiera de estas configuraciones, al disponer de al menos un intercambiador, evitan que el agua caliente sanitaria pase por los captadores solares por lo que se eliminan los problemas de deposición calcárea.

Como regla general, en las instalaciones que disponen de sistema de acumulación en circuito cerrado (B2, C2, B3 y C3), se recomienda emplear las configuraciones tipo 3 en lugar de las configuraciones tipo 2. Estas últimas deben emplearse exclusivamente en aquellos casos en los que prácticamente no exista riesgo de que se produzcan heladas y por tanto se pueda utilizar agua como fluido de trabajo en los captadores solares.

En todas las opciones que disponen de intercambiador solar se ofrece la alternativa de incorporar este al sistema de acumulación si bien este caso corresponde habitualmente a instalaciones de pequeño tamaño. Las configuraciones más utilizadas con intercambiador solar incorporado corresponden al tipo genérico Al.

1.5 INSTALACIONES SOLARES EN LA EDIFICACIÓN

Las distintas configuraciones de instalaciones solares térmicas que se pueden establecer en la edificación están relacionadas con el grado de centralización o individualización de los distintos sistemas que la componen en relación con los centros de consumo que puede atender.

A los efectos de este apartado, se consideran centros de consumo a las unidades funcionales (aseos, baños, etc.) donde se genera la demanda de agua caliente; estas unidades pueden ser elementales (aseos) o compuestas (viviendas) y pueden pertenecer al mismo usuario (aseos de un hotel o conjunto de aseos de una vivienda) o a-distintos usuarios (viviendas en relación con el bloque, etc.).

Realmente no todas las configuraciones que se presentan han sido utilizadas con la misma intensidad, pero dado el estado actual de desarrollo, se considera deben dejarse abiertas el mayor número de posibilidades.

El grado de centralización de la instalación define, por un lado, el nivel de concentración de la inversión y por otro la estructura de disgregación de los costes de explotación de la instalación. A los efectos de definir el nivel de centralización de las instalaciones, pueden utilizarse centralizaciones por portales o por escaleras, para el edificio completo o, incluso, para un conjunto de edificios.

Conviene hacer notar que, en circunstancias normales, cuando un usuario tiene la sensación de que la instalación "es de todos" (instalación centralizada) tiende a consumir (derrochar) más ya que se tiene la consideración de que es un "gasto compartido". Sin embargo, cuando la instalación es individual y tiene la sensación de que él "paga" la energía (aunque sea sólo la de apoyo) y el agua tiende a economizar más, tanto energía como agua. Es decir, en instalaciones individuales normalmente el gasto producido por el consumo afecta "más de cerca" al usuario por lo que controla más el consumo de agua y de energía. En la actualidad este tipo de situaciones es cada vez menos frecuente en los edificios de viviendas ya que es obligatoria la instalación de contadores individuales. Sin embargo sigue siendo habitual el mayor consumo de agua y de energía por parte de los usuarios en hoteles, etc. En lo que sigue se hará referencia a la vivienda como centro de consumo siendo los criterios extrapolables a otras situaciones.

A efectos de clasificación de las configuraciones de las instalaciones solares en la edificación se establece como criterio de partida la distinción entre **consumos centralizados** e **individuales** de agua caliente. Las diferencias fundamentales que se plantean entre las instalaciones con consumos centralizados y con consumos individuales son las siguientes:

- Diseño: En las centralizadas existe una acometida de agua fría desde la centralización de contadores al sistema de producción de agua caliente desde donde, por parte de la comunidad, se realiza el suministro de agua caliente a las viviendas. Las instalaciones individuales disponen solamente de su propia acometida de agua fría.
- Dimensionado: La concentración de consumos por la centralización de las instalaciones de producción de agua caliente permite ajustar el dimensionado de las instalaciones aprovechando la oportunidad de la centralización y de la simultaneidad de consumos.
- Espacios: Además de los captadores solares que, en cualquier caso, necesitan espacios significativos preferentemente dedicados en exclusiva a ellos, los acumuladores centralizados también requieren un espacio comunitario específico, habitualmente en cubierta o en sótano. En el caso de acumuladores individuales el espacio necesario hay que encontrarlo en cada una de las viviendas (falsos techos, etc.).
- El sistema de apoyo, si es centralizado, puede formar una única unidad que también requiere un espacio perteneciente a la comunidad y dedicado exclusivamente a esa función. Si el sistema de apoyo consiste en sistemas individuales cada usuario afronta claramente de forma particular tanto el coste de explotación como la localización del mismo en su vivienda.
- Control: En instalaciones centralizadas en acumulación y dado que este sistema es común, se puede utilizar el control diferencial normalizado que compara la temperatura de salida de captadores con la del acumulador. En instalaciones centralizadas en captación e individuales en acumulación la estrategia de control difiere. Entre las diferentes estrategias se encuentra el control diferencial entre la salida y la entrada de captadores solares.
- Costes: En este apartado se ha de diferenciar entre los costes de inversión y los de explotación. A medida que se aumenta el grado de centralización de las instalaciones los costes de inversión son generalmente inferiores. En relación con los costes de explotación hay que tener en cuenta que los costes más importantes de las instalaciones son:

    1. los correspondientes al consumo de energía convencional como energía de apoyo

2.los de mantenimiento del sistema de producción de agua caliente sanitaria
3.los de gestión de consumos

1.5.1 Con consumo centralizado.

En este tipo de instalaciones existe una única alimentación de agua fría a la instalación solar donde se realiza el precalentamiento del agua sanitaria y un circuito de distribución pone a disposición de cada una de las viviendas el agua caliente o precalentada. Normalmente, en función de las longitudes del circuito de distribución, se requiere un circuito o anillo de recirculación que debe realizarse considerando los aspectos indicados en 1.2.4.

En las instalaciones solares en edificios con consumo centralizado de agua caliente los sistemas de captación y acumulación solares son centralizados mientras que el sistema de apoyo puede ser centralizado o individual. En la siguiente tabla se indican las dos posibles configuraciones de este tipo de instalaciones:

CONFIGURACIÓN DE INSTALACIÓN	CAPTACIÓN	ACUMULACIÓN	APOYO
TODO CENTRALIZADO (SOLAR + APOYO)	C	C	C
SOLAR CENTRALIZADO CON APOYO INDIVIDUAL	C	C	I

C: Centralizado, I: Individual

a) Con sistema de apoyo centralizado

En esta configuración se realiza el proceso completo de preparación del agua caliente. La red de distribución de agua caliente suministra a cada vivienda agua caliente. Cada vivienda a través de un contador de caudal de agua caliente. Cada vivienda ha de disponer en la acometida de agua caliente de un contador de agua caliente encargado de contabilizar la energía térmica aportada por el sistema de preparación de agua caliente sanitaria.

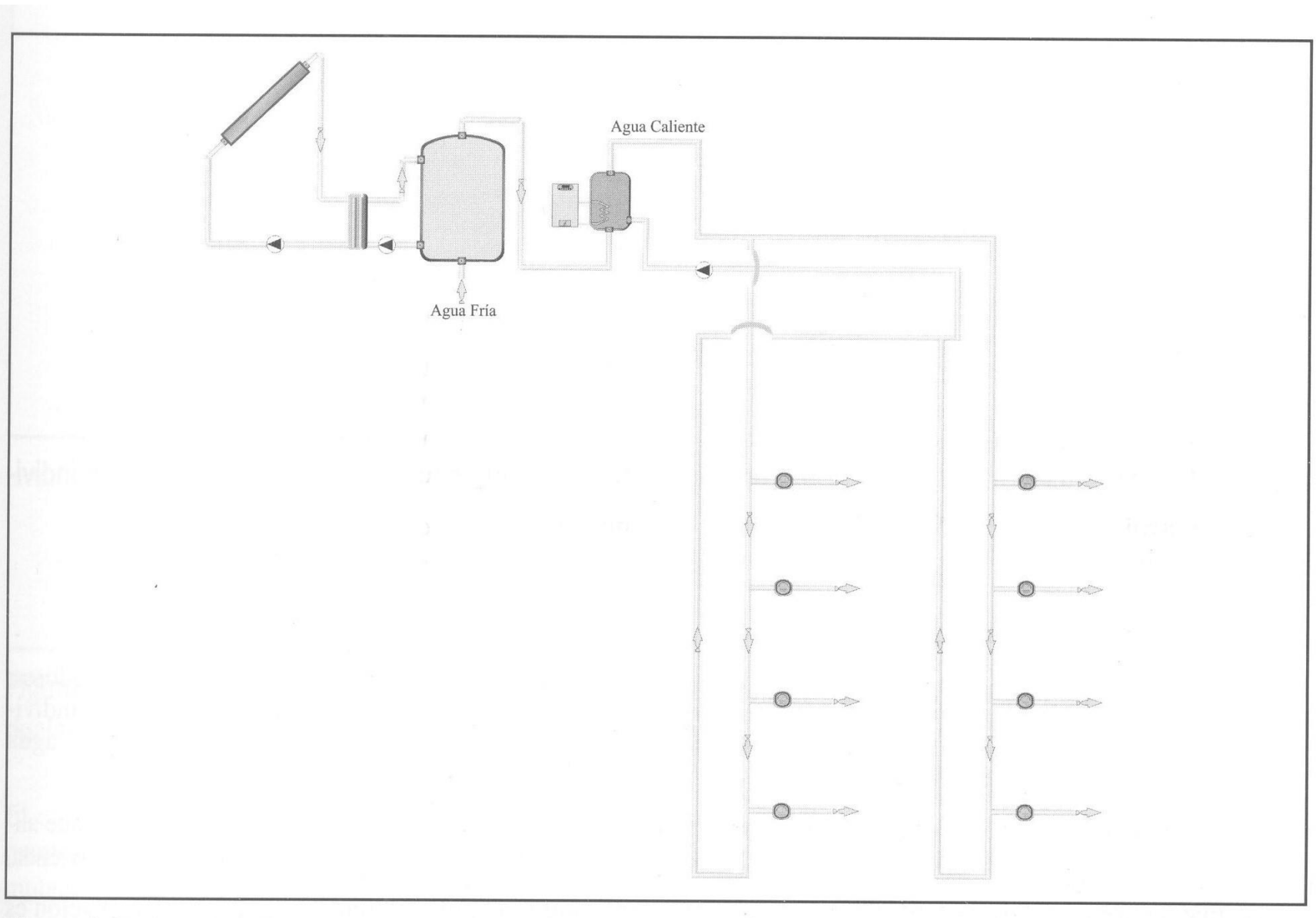


Figura 1.15. Instalación solar totalmente centralizada (captación, acumulación y sistema de apoyo) de aplicación en edificios con consumo centralizado.

El diseño de este tipo de instalación totalmente centralizada requiere la máxima disponibilidad de espacios comunes (para captación y acumulación solar así como para el sistema de apoyo). Esta configuración normalmente es la que requiere menor inversión global y en ella todos los gastos corresponden a la comunidad.

b) Con sistema de apoyo individual

En este caso la instalación solar sólo realiza el precalentamiento del agua; el circuito de distribución pone a disposición de cada uno de los centros de consumo agua precalentada y cada vivienda dispone de un sistema de energía de apoyo individual para terminar de preparar el agua caliente sanitaria. Igual que en el caso anterior debe existir un contador de agua que en este caso contabiliza el agua precalentada por la instalación solar.

El diseño de este tipo de instalación requiere menos espacios comunes pero necesita ocupar los espacios necesarios en la vivienda para el sistema de apoyo.

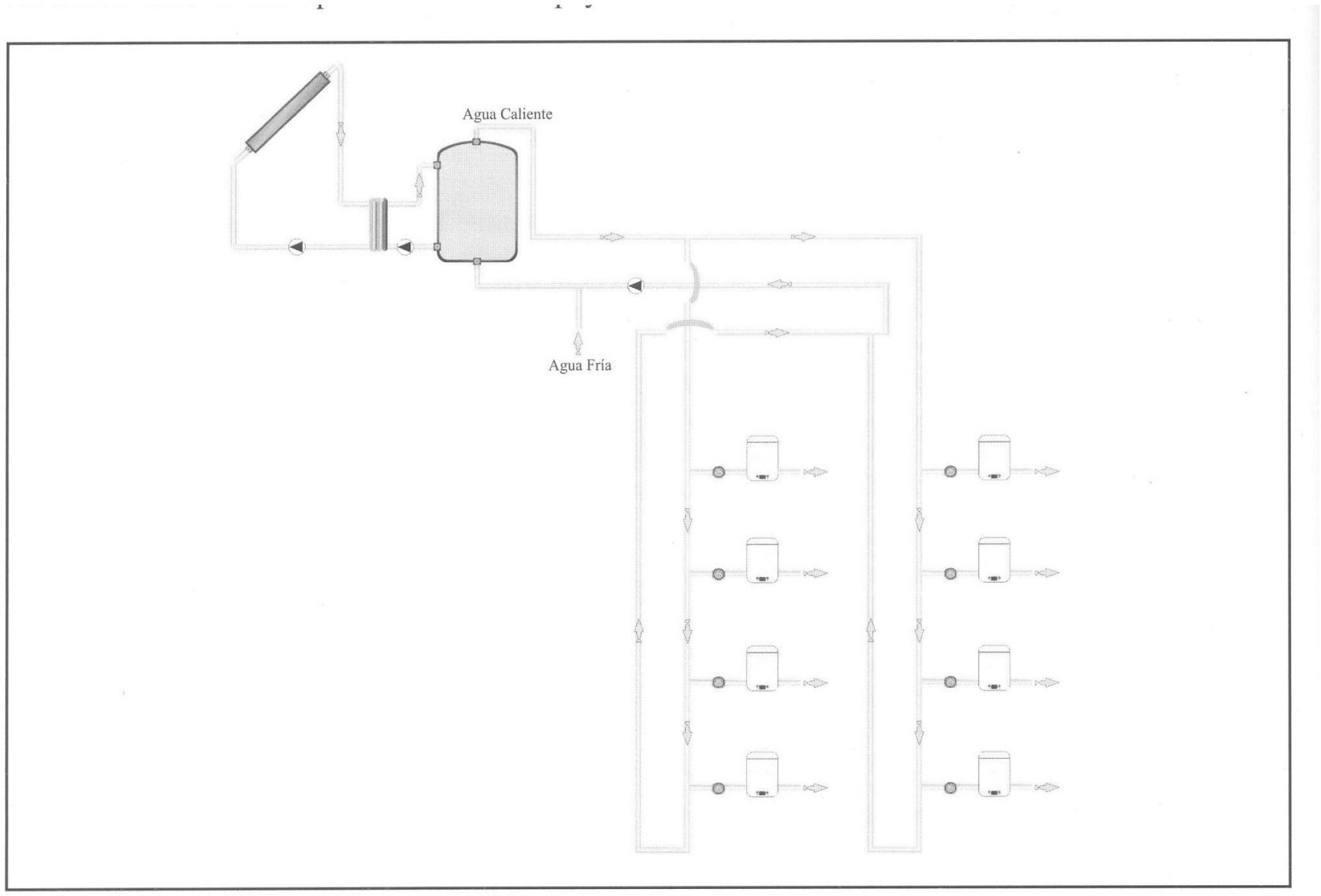


Figura 1.16: Instalación solar centralizada en captación y acumulación y con sistemas de apoyo individuales de aplicación en edificios con consumo centralizado.

1.5.2 Con consumo individual

Cada vivienda dispone de una única acometida de agua fría procedente de la centralización de contadores; de la red interior de la vivienda se extrae la alimentación al sistema de preparación de agua caliente individual que la vivienda dispone. Por tanto en este caso la instalación solar se encarga de precalentar el agua hacia la entrada al sistema de apoyo.

El anillo de distribución de los sistemas centralizados se convierte, en estos casos, en un circuito cerrado que alimenta los circuitos primarios de los intercambiadores o interacumuladores individuales situados en cada vivienda.

En las instalaciones solares en edificios con consumo individual de agua caliente el sistema de captación es centralizado mientras que el sistema de apoyo es individual. Sin embargo, el sistema de acumulación puede ser centralizado o individual. En la siguiente tabla se indican estas dos configuraciones.

CONFIGURACIÓN DE INSTALACIÓN	CAPTACIÓN	ACUMULACIÓN	APOYO
SOLAR CENTRALIZADO + APOYO INDIVIDUAL (INTERCAMBIADOR DE CONSUMO INDIVIDUAL)	C	C	I
SOLAR PARCIALMENTE CENTRALIZADO (ACUMULACIÓN DISTRIBUIDA) + APOYO INDIVIDUAL	C	I	I

C: Centralizado, I: Individual

Estas configuraciones solucionan, como alternativa a las de instalaciones con sistemas centralizados, el problema de la medida individualizada del consumo de agua caliente. Por el contrario, requieren mayores espacios en las viviendas y las inversiones son más elevadas.

a) con sistema de acumulación centralizada.

La instalación se realiza de forma que, desde un acumulador solar centralizado de inercia, se configura un circuito solar de calentamiento que, mediante intercambiadores de consumo individuales, precalientan el agua de cada vivienda antes de entrar al sistema de apoyo que, naturalmente, es individual.

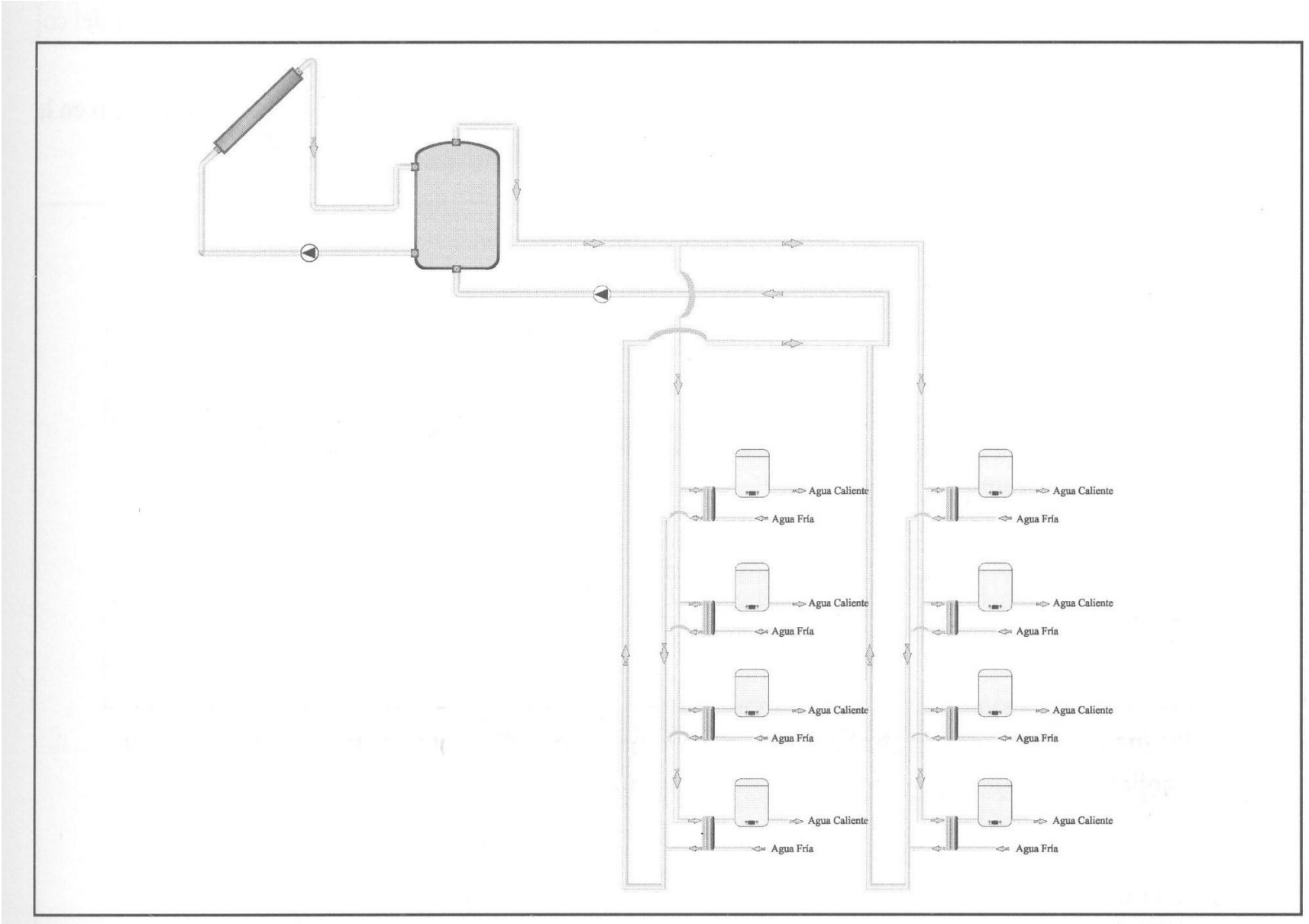


Figura 1.17: Instalación solar centralizada en captación y acumulación y con sistemas de apoyo individuales de aplicación en edificios con consumo individual.

El circuito terciario solar es una extensión del sistema de acumulación hacia el consumo dado que debe mantener, en el primario de los intercambiadores de consumo, la máxima temperatura disponible en el acumulador de inercia.

Esta configuración surge, como variante de los sistemas con consumos individuales, para evitar la problemática de espacios ocupados por los interacumuladores descentralizados. Las estrategias de control del circuito terciario deben ser de funcionamiento casi continuo del mismo dado que se ha de mantener el primario de los intercambiadores de consumo a las temperaturas máximas disponibles en cada instante. Además, estos intercambiadores de consumo deben estar dimensionados para los caudales punta de cada vivienda.

b) con sistema de acumulación individual

En esta opción el circuito solar de calentamiento se conecta con cada uno de los interacumuladores de las viviendas, de forma que se acumula en ellos y se precalienta el agua antes de entrar al sistema de apoyo que también es individual.

El circuito solar es un circuito de calentamiento de los interacumuladores y, por tanto, su puesta en funcionamiento deberá realizarse de forma que garantice que la energía captada es suficiente para aumentar la energía térmica almacenada en el conjunto de la instalación.

La problemática que surge en estos sistemas es relativa al funcionamiento y a su sistema de control y puede analizarse con las dos situaciones extremas que se plantean:

Control individualizado: cada primario de interacumulador dispone de una válvula automática que elimina la circulación por el mismo cuando se alcanza una determinada temperatura en el interior del correspondiente acumulador.

Sin sistema de control: el caudal del circuito de distribución (coincide con el circuito secundario en la Figura 1.18) siempre está circulando por todos los interacumuladores

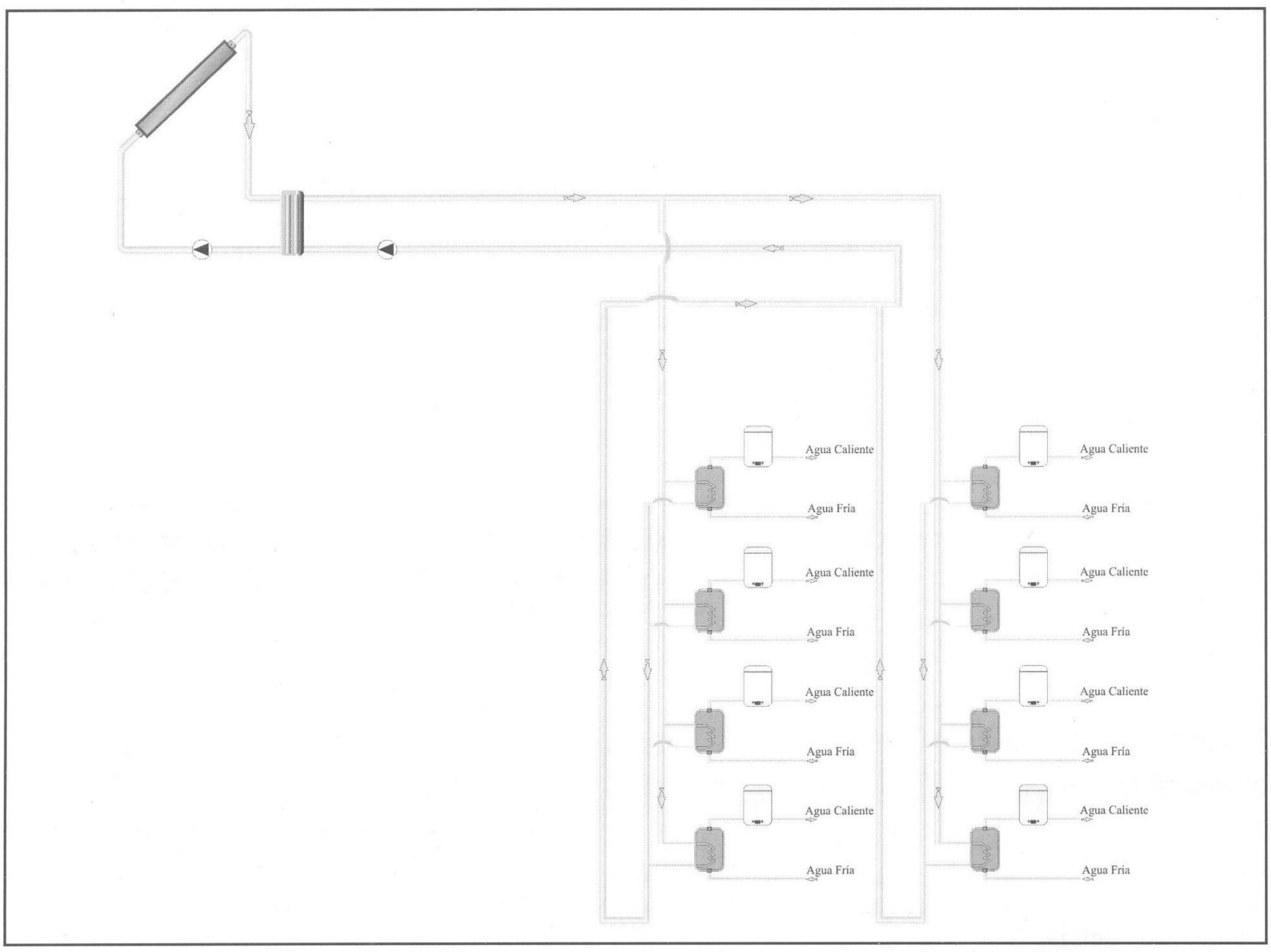


Figura 1.18: Instalación solar centralizada en captación, con sistemas de acumulación y apoyo individuales, de aplicación en edificios con consumo individual.

Se plantean diversas soluciones intermedias entre las que destaca el control de las bombas en función de la diferencia de temperaturas entre la salida y la entrada de captadores solares.

Los interacumuladores deben estar dimensionados para los consumos de cada vivienda, de forma que la energía térmica suministrada a cada vivienda dependa de las características de consumo de la misma.

Un caso particular de instalación con consumo individual lo constituye la configuración todo individual (captación, acumulación y apoyo) que, en determinados casos además de en las viviendas unifamiliares, puede resultar ser una de las opciones más adecuadas.

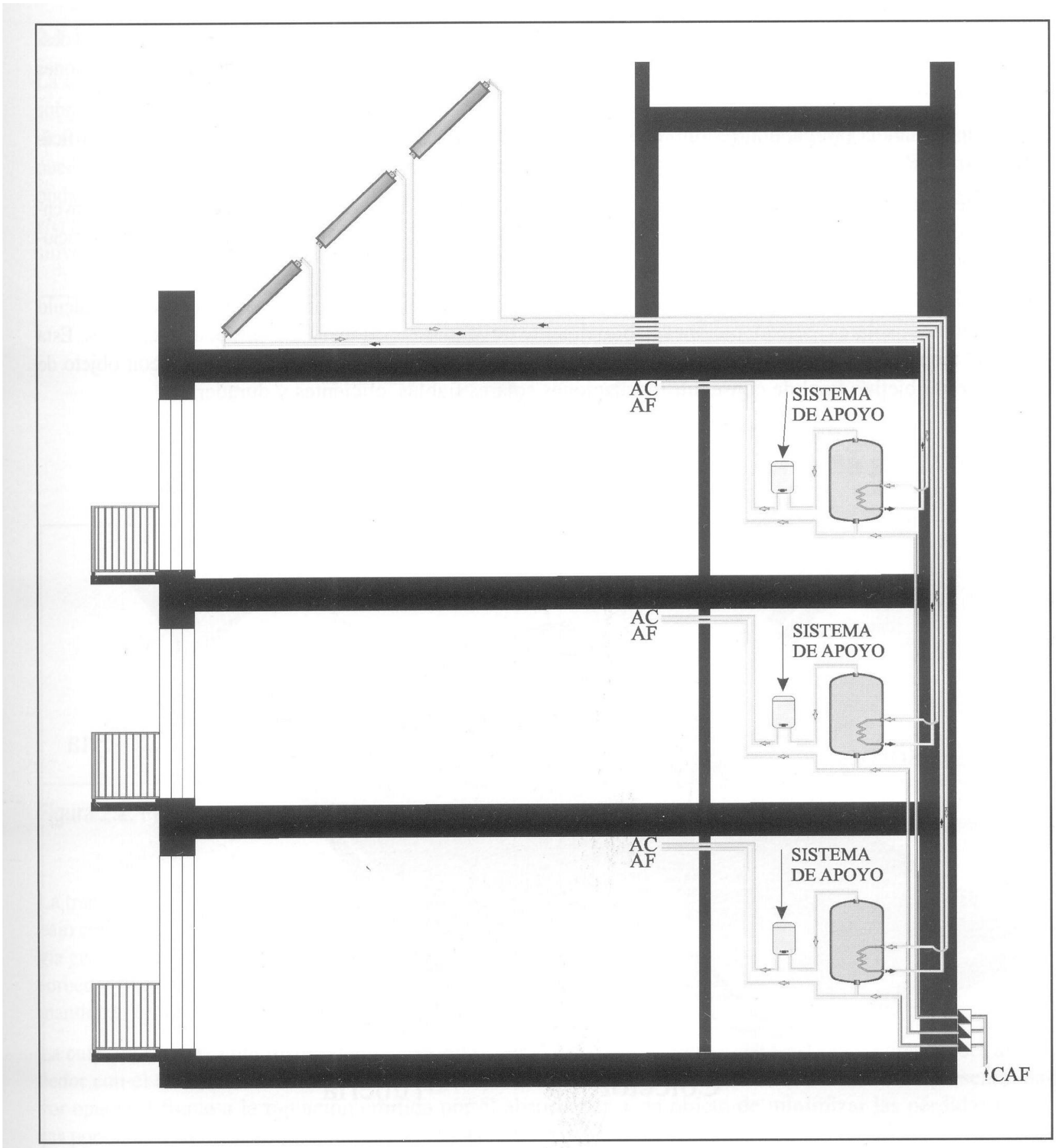


Figura 1.19: Instalación solar totalmente individual.

2 COMPONENTES

Se describen las características constructivas y funcionales del captador solar como elemento fundamental, específico y diferenciador de las instalaciones solares térmicas.

Sobre el resto de componentes de una instalación solar, y dado que habitualmente se utilizan elementos comunes a otras instalaciones térmicas, se realiza una revisión de los aspectos singulares considerados en base a:

- Las especiales condiciones de funcionamiento que lleva consigo una instalación solar. Entre estas destaca la variabilidad de la fuente de energía de entrada y por tanto, la modificación de las condiciones de funcionamiento: potencia, temperaturas, etc.
- La importancia otorgada al rendimiento de la instalación y a las causas que lo modifican (estratificación, equilibrados hidráulicos, pérdidas térmicas, etc.).

Realmente esta última circunstancia debería ser igualmente aplicable a todas las instalaciones térmicas convencionales pero, hasta ahora, habitualmente no ha sido así debido fundamentalmente a las diferentes consideraciones económicas realizadas sobre la energía convencional o renovable empleada.

En la actualidad, aunque en menor medida que hace pocos años, siguen tomándose en el diseño y cálculo de instalaciones solares consideraciones habitualmente utilizadas en las instalaciones convencionales. Esta "inercia" tecnológica ha de ser necesariamente vencida por parte de los técnicos del sector con objeto de contribuir al objetivo final de conseguir instalaciones solares fiables, eficientes y duraderas.

2.1 CAPTADOR SOLAR

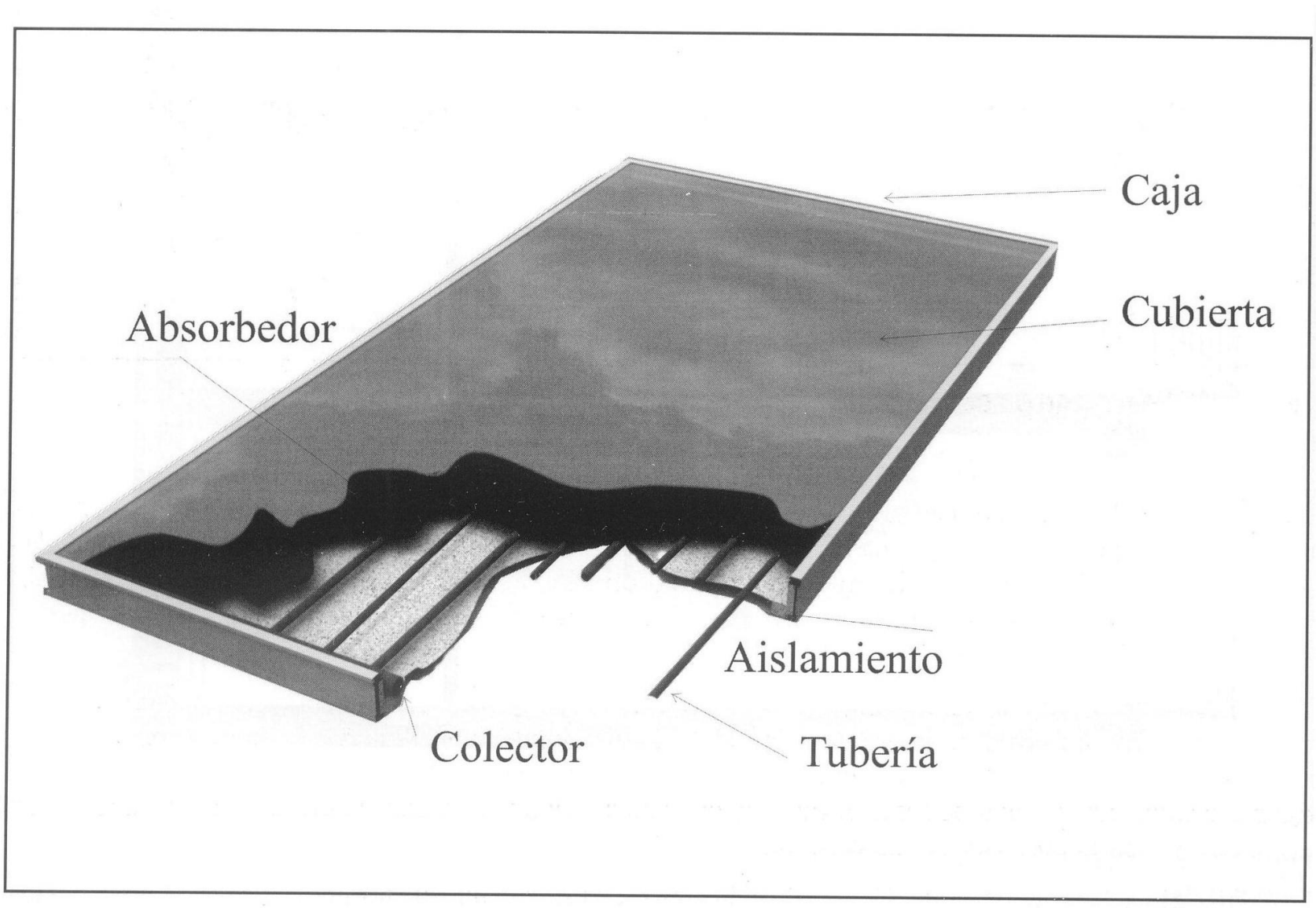


Figura 2.1: Esquema de captador solar plano típico.

El captador solar es un intercambiador de calor en el que la radiación solar se transforma en energía térmica aumentando la temperatura del fluido que circula a través de él. Además también se calienta el conjunto del captador.

Existen diversos tipos de captadores solares: planos con diferentes variantes (de vacío, CPC, etc), cilíndrico parabólicos, etc. En las instalaciones solares para producción de agua caliente sanitaria se emplea mayoritariamente el captador solar plano. En la Figura 2.1 se muestran los principales elementos de un captador solar plano típico.

2.1.1 Principio de funcionamiento

La radiación solar, de longitud de onda corta (0,2 - 3 mm), que atraviesa la cubierta transparente e incide sobre el absorbedor aumenta la temperatura de este último y de todos los elementos de su entorno (fluido de trabajo, etc.) . El absorbedor. El al calentarse, emite radiación térmica de onda larga (7 - 14 mm) que no puede salir al exterior, debido a que la cubierta transparente es opaca frente a esta radiación infrarroja de onda larga. Este fenómeno de selectividad transmisiva es el responsable de que se produzca el denominado *efecto invernadero* en el captador solar es decir, que la radiación solar entra en su mayor parte en el dispositivo y la radiación infrarroja que se genera en él, no puede salir.

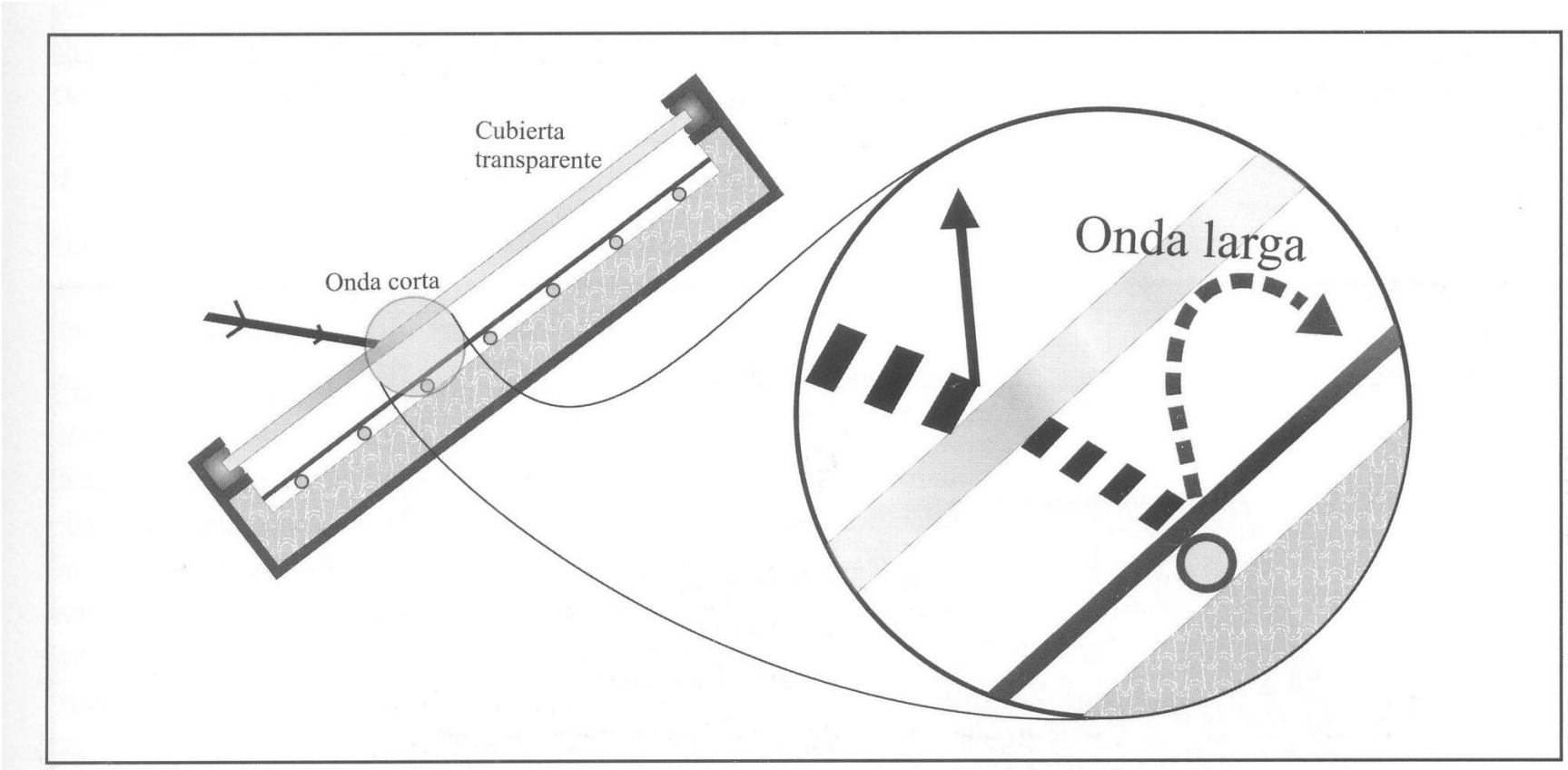


Figura 2.2: Fenómeno de selectividad transmisiva en un captador solar plano.

La transferencia de calor por conducción y convección que tiene lugar desde el absorbedor al fluido de trabajo consigue aumentar la energía interna del fluido; la circulación de éste produce la evacuación de la energía generada y la disminución de la temperatura del absorbedor. Esta disminución de la temperatura del absorbedor reduce las pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción del conjunto que se mantienen en niveles razonables.

La cubierta transparente disminuye las pérdidas por convección ya que evita el contacto directo del absorbedor con el aire ambiente. Las pérdidas por radiación disminuyen a medida que la cubierta presenta mayor opacidad frente a la radiación emitida por el absorbedor. Con objeto de minimizar las pérdidas térmicas por conducción a través de los laterales y la parte posterior de la carcasa, se coloca material aislante en los laterales y parte posterior del absorbedor.

Las pérdidas térmicas por convección y radiación en un captador plano son normalmente las más importantes y se producen en un porcentaje elevado por la cara anterior (dirigida a la radiación solar) del captador.

2.1.2 Elementos principales

En la sección transversal de la Figura 2.3 se muestran los principales elementos de un captador solar plano.

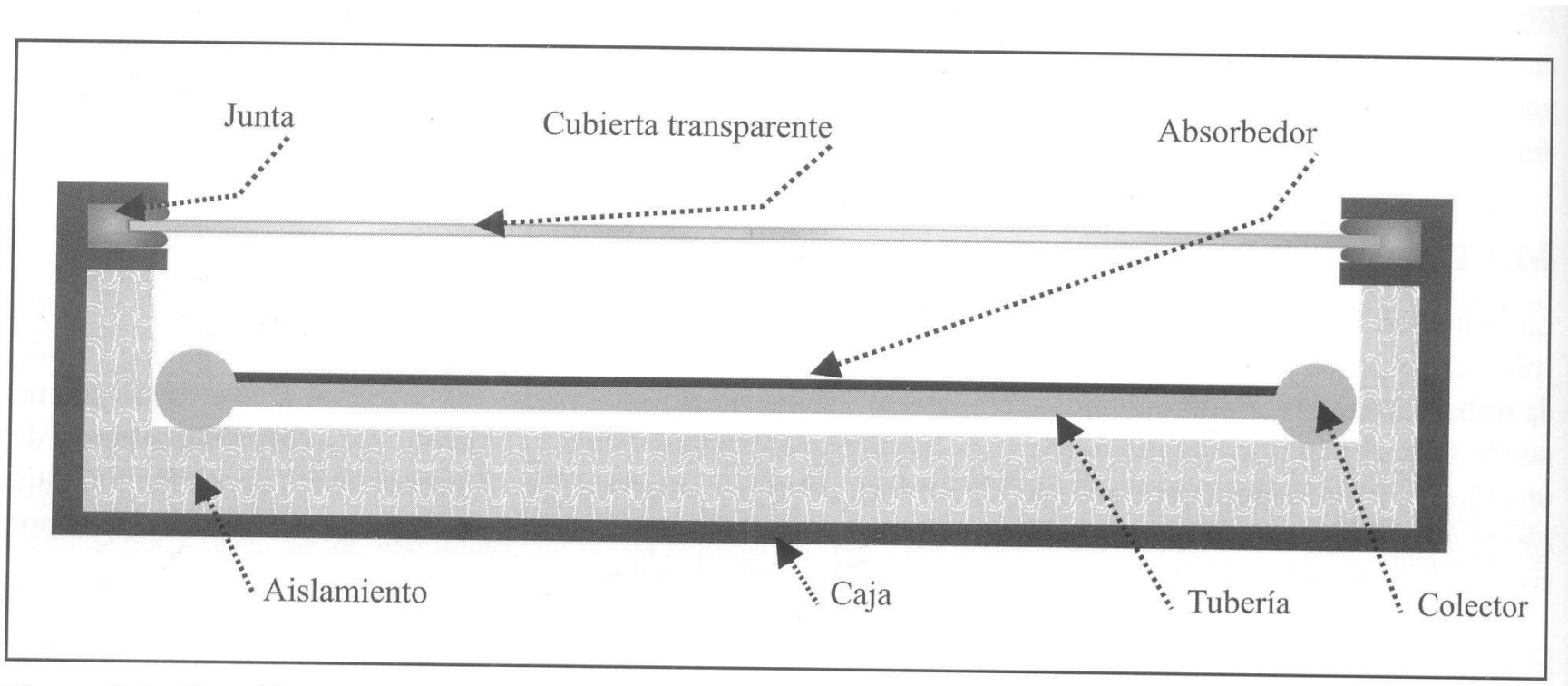


Figura 2.3 : Sección transversal de un captador solar plano.

a) Absorbedor

$$\text{Reflectancia } (\rho) = \frac{\text{Radiación Reflejada}}{\text{Radiación Incidente}}$$

$$\text{Absortancia } (\alpha) = \frac{\text{Radiación Absorbida}}{\text{Radiación Incidente}}$$

$$\text{Transmitancia } (\tau) = \frac{\text{Radiación Transmitida}}{\text{Radiación Incidente}}$$

$$\text{Emisividad } (\varepsilon) = \frac{\text{Radiación Emitida}}{\text{Radiación de un cuerpo negro a la misma temperatura}}$$

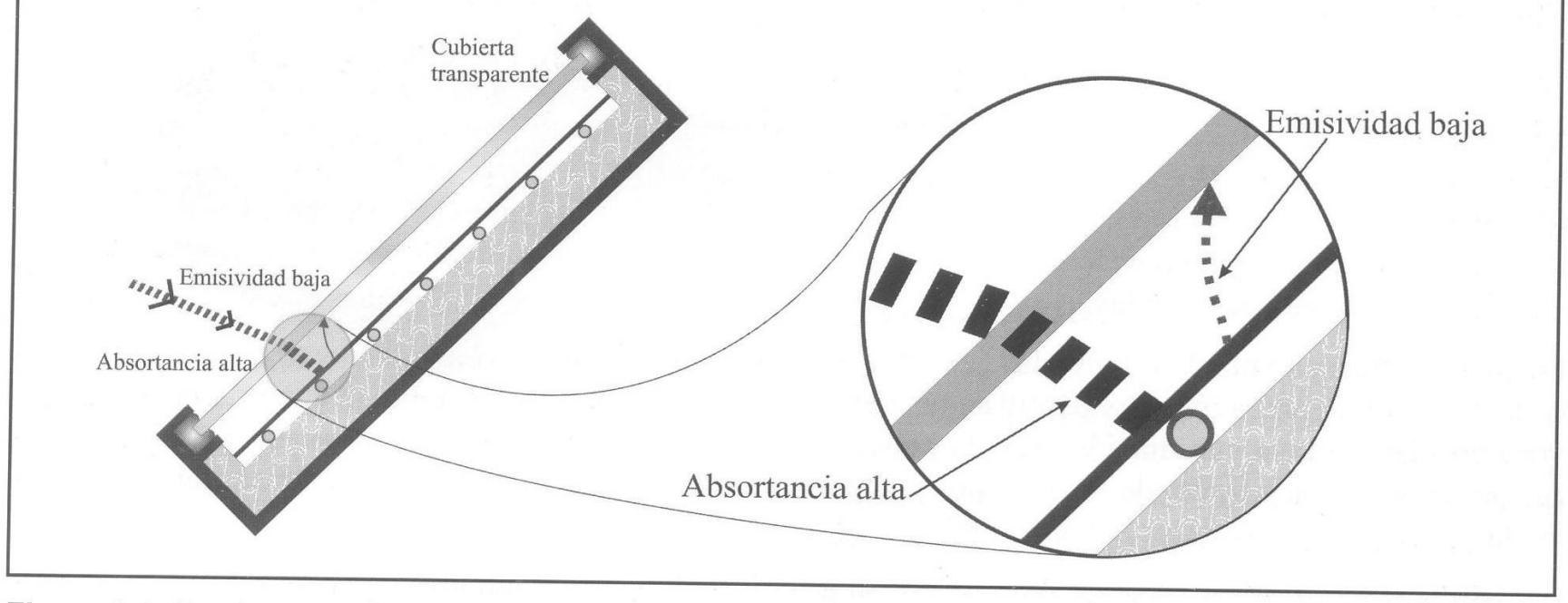


Figura 2.4: Fenómeno de selectividad absorbente de un captador solar plano.

Es el componente donde se produce la conversión de la radiación solar en energía térmica. Consiste en una superficie plana constituida por una lámina o varias aletas metálicas adheridas a un circuito hidráulico a través del cual circula el fluido de trabajo para evacuar la energía captada.

El material habitualmente empleado en la lámina o aletas que constituyen el absorbedor es cobre y, en algunos diseños, aluminio o acero. El cobre también es el material más empleado en las tuberías debido a sus adecuadas propiedades térmicas (destacando su alta difusibilidad) y mecánicas. Su comportamiento frente a la corrosión y su elevada durabilidad también lo hacen especialmente adecuado.

Las características ópticas del absorbedor (reflectancia, absortancia y emisividad) tienen una gran influencia en el rendimiento de conversión de la radiación solar incidente en energía térmica debido a que afectan directamente a las ganancias y pérdidas por radiación del captador solar. Estas características quedan definidas, además de por el tipo, forma y materiales del absorbedor, por el tratamiento exterior (negro o selectivo) del mismo.

En el tratamiento negro se busca aumentar la absortancia del absorbedor mediante la utilización de pinturas negras compuestas de pigmentos y disolventes que facilitan la adherencia de la pintura al absorbedor. Los tratamientos selectivos (mediante procesos de pulverización, electrodeposiciones de metales y subsiguiente oxidación, etc.) se caracterizan porque fundamentalmente pretenden conseguir disminuir la emisividad del absorbedor en las longitudes de onda (7-14 µm) en las que se emite la radiación infrarroja producida por el absorbedor, manteniendo elevada la absortancia en las longitudes de onda (0,2 - 3 µm) en las que se recibe la radiación solar que incide sobre el absorbedor. Es el efecto conocido como "selectividad absorbente".

i) Diseños típicos

Una de las características constructivas y funcionales más importantes del absorbedor es la que garantiza una adecuada transmisión térmica entre la superficie plana del absorbedor y el circuito de evacuación de calor, en el sentido de optimizar el contacto térmico entre ambos.

Existe una gran diversidad de modelos de absorbedores en función de la configuración del circuito hidráulico interno. En la actualidad el modelo más ampliamente utilizado es el absorbedor *en forma de parrilla de tubos* si bien también se emplean los absorbedores tipo *serpentín, de placa plana, etc.* El objetivo principal seguido, en cualquiera de estas configuraciones, es que en el absorbedor se optimice la captación, transmisión y evacuación de energía.

Figura 2.5 : Absorbedor en forma de parrilla de tubos.

Absorbedor en forma de parrilla de tubos

En este caso el absorbedor está constituido por varias tuberías paralelas conectadas a dos colectores (conductos de distribución) de mayor diámetro formando la denominada "parrilla de tubos".

La distancia de separación entre tuberías paralelas resulta del compromiso entre la maximización del calor transferido al fluido de trabajo y la minimización de los costes de producción. Normalmente esta distancia está en el rango de 10 a 12 cm. Este absorbedor se caracteriza por presentar una pérdida de carga relativamente pequeña (ya que el fluido circula a través de las tuberías paralelas además de por los dos conductos de distribución).

En esta configuración se ha de prestar especial atención al equilibrado hidráulico ya que al poder circular distintos caudales por cada tubería paralela, pueden aparecer desequilibrios hidráulicos y térmicos no deseables. La distribución del caudal de circulación a través del absorbedor depende de la relación entre la pérdida de carga en las tuberías paralelas y la correspondiente a los conductos de distribución. Para conseguir que los caudales de circulación a través de cada una de las tuberías paralelas sean prácticamente iguales, la pérdida de carga en los conductos de distribución ha de ser muy baja en comparación con la pérdida de carga en una de las tuberías paralelas del absorbedor.

Absorbedor tipo serpentín

En este caso una única tubería en forma de serpentín constituye el circuito hidráulico que forma parte del absorbedor por lo que todo el fluido de trabajo que circula a través del captador solar lo hace a través de esta única tubería. También se suelen incluir en este diseño dos colectores a los que se encuentra conectada la tubería en forma de serpentín.

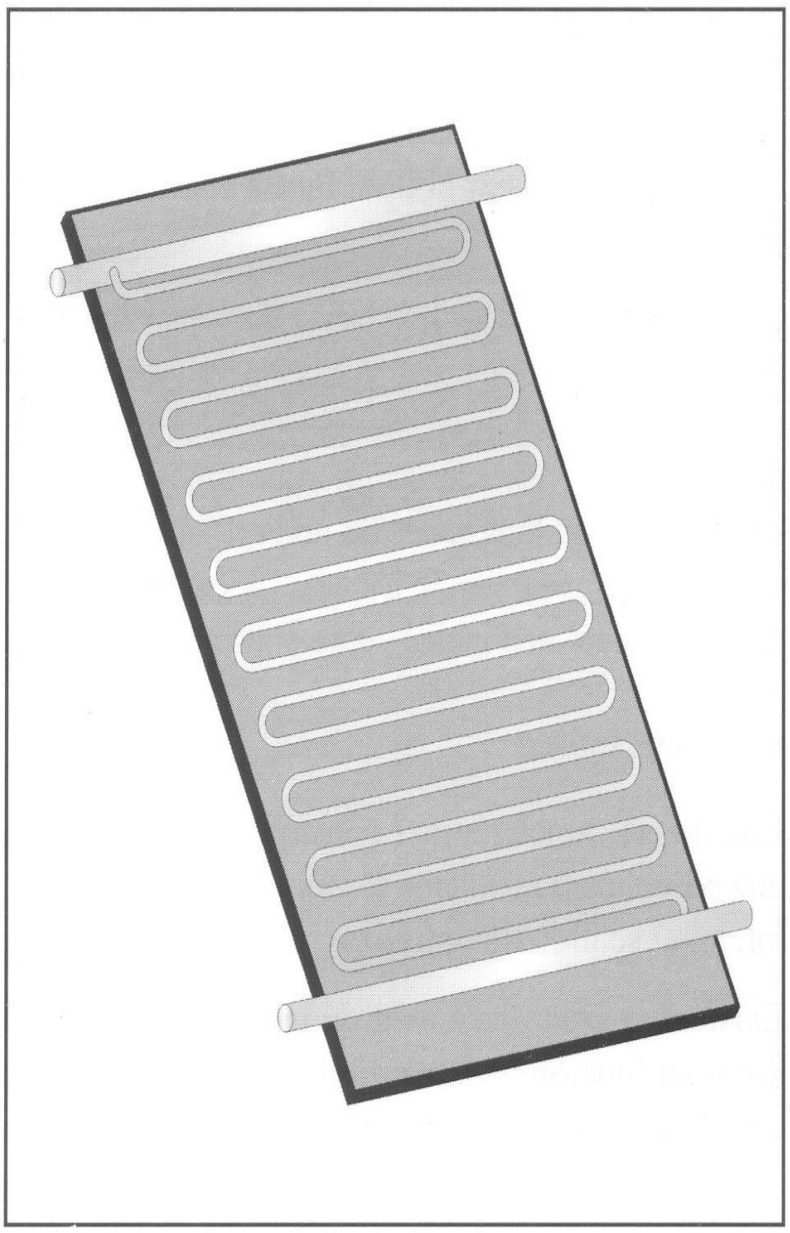


Figura 2.6: Absorbedor tipo serpentín.

En esta configuración el recorrido hidráulico es superior al del absorbedor en forma de parrilla por lo que, en caso de que la pérdida de carga unitaria (por metro lineal de tubería) a través del serpentín sea similar al de la tubería paralela del absorbedor de parrilla, la pérdida de carga total es superior.

El valor de la pérdida de carga unitaria depende del caudal de circulación y del diámetro de la tubería sin que se pueda generalizar a priori cómo son estos valores en términos comparativos entre ambos tipos de absorbedores (serpentín, parrilla de tubos).

También ha de tenerse en cuenta que los absorbedores tipo serpentín presentan pérdidas de carga adicionales debido a los cambios de dirección que se producen a lo largo del serpentín. Por el contrario las pérdidas de carga puntuales producidas por la unión entre el tubo serpentín y los colectores (inferior y superior) son normalmente inferiores a las pérdidas correspondientes a las uniones entre las tuberías paralelas y los colectores de distribución en el caso del absorbedor en forma de parrilla.

b) Cubierta transparente

Es un elemento plano de material transparente a la radiación solar que cumple los siguientes objetivos:

- Reducir las pérdidas térmicas del absorbedor por convección. La cámara de aire existente entre el absorbedor y la cubierta reduce las pérdidas por convección al evitar el contacto directo del absorbedor con el ambiente exterior y por encontrarse la cara exterior de la cubierta a una temperatura inferior a la del absorbedor.
- Reducir las pérdidas térmicas del absorbedor por radiación. Para esto, además de permitir que la radiación solar atraviese la cubierta, debe conseguir que la radiación emitida por el absorbedor no salga al exterior.
- Asegurar, conjuntamente con la carcasa, el cierre del captador y proteger al absorbedor frente a los agentes exteriores (humedad, etc.).

La cara frontal de la cubierta ha de presentar una alta transmitancia y baja reflectancia y absortancia respecto a la radiación solar (de onda corta). Sin embargo, la cara inferior ha de reflejar mayoritariamente (alta reflectancia) la radiación de onda larga emitida por el absorbedor (ver Figura 2.2) y presentar valores bajos de absortancia y transmitancia. Tanto el material de la cubierta como la geometría de la misma han de ser seleccionados en base a estos criterios.

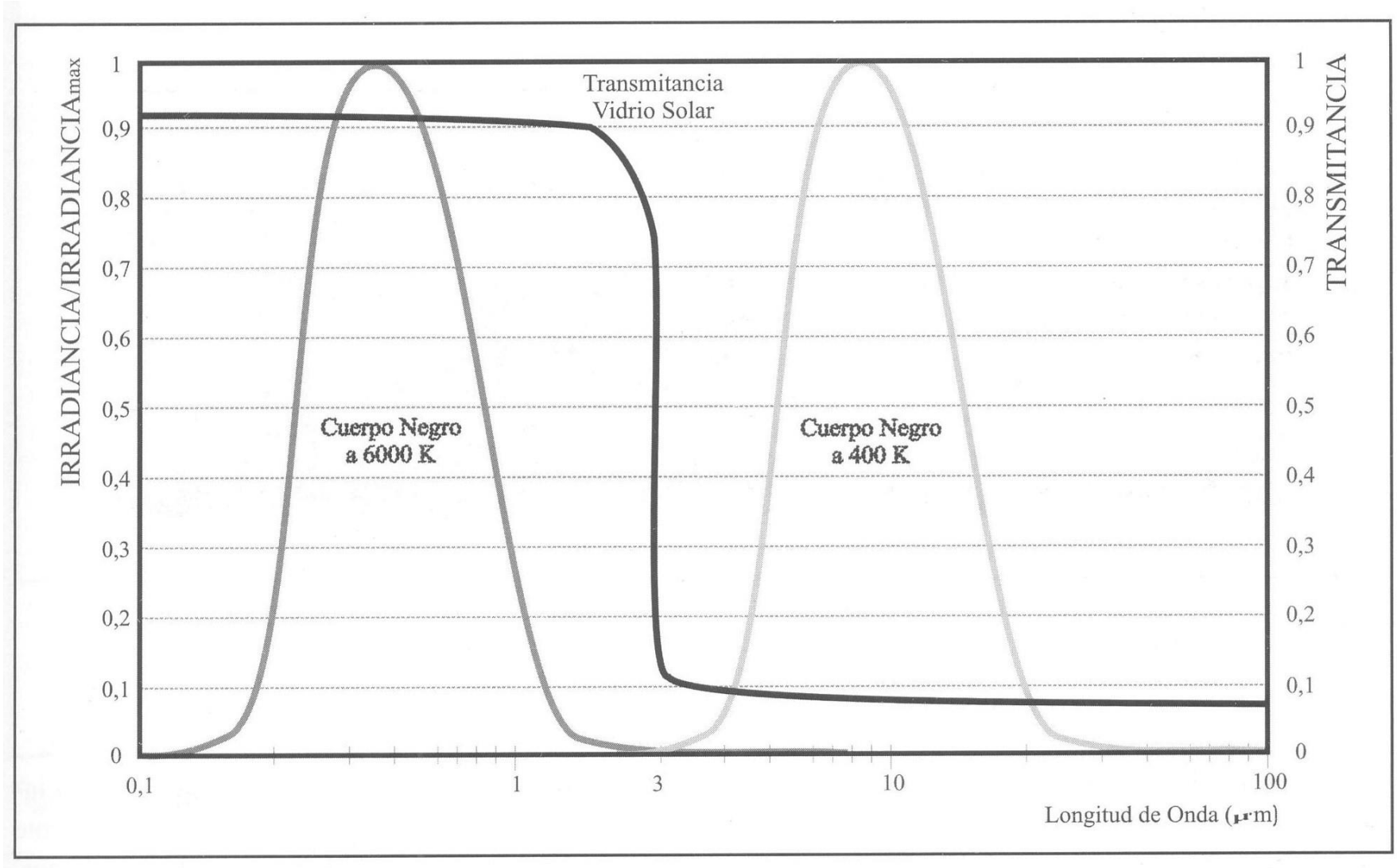


Figura 2.7: Distribución espectral de la radiación emitida por cuerpos negros y transmitancia del vidrio.

En la Figura 2.7 se representa la transmitancia de un vidrio solar en función de la longitud de onda y las distribuciones espectrales normalizadas de la radiación emitida por cuerpos negros a 6000 K (similar a la distribución espectral de la radiación solar) y a 400 K. Se observa que el cuerpo a 6000 K emite básicamente para longitudes de onda inferiores a 3 mm por lo que este vidrio deja pasar prácticamente toda la radiación emitida por el mismo. Sin embargo, para el cuerpo a 400 K este vidrio presenta un comportamiento diferente e impide que la radiación pase a través suya ya que el cuerpo emite básicamente para longitudes de onda superiores a 3 mm.

Las cubiertas transparentes deben tener las características de resistencia y durabilidad necesarias para que funcione a lo largo de su vida útil que, de hecho, es muy elevada cuando se trata de vidrios; deben considerase en el diseño la resistencia al viento, granizo, lluvia, radiación ultravioleta, etc. Habitualmente se utilizan las cubiertas de vidrio mucho más que las cubiertas de plástico transparente.

c) Aislamiento

Se coloca en los laterales y en el fondo de la carcasa para reducir las pérdidas térmicas por conducción. Los materiales utilizados deben comportarse adecuadamente frente a temperaturas elevadas (como mínimo la temperatura de estancamiento del captador) y no debe vaporizar dentro del rango de temperaturas de trabajo ya que si lo hiciera podrían disminuir las propiedades ópticas de la cubierta y/o del absorbedor. Además de por el efecto de la temperatura, el material aislante se puede deteriorar por la entrada de agua en el interior del captador que puede llevar a incrementos de volumen del material aislante que deformen el captador, a la pérdida de sus propiedades aislantes, etc.

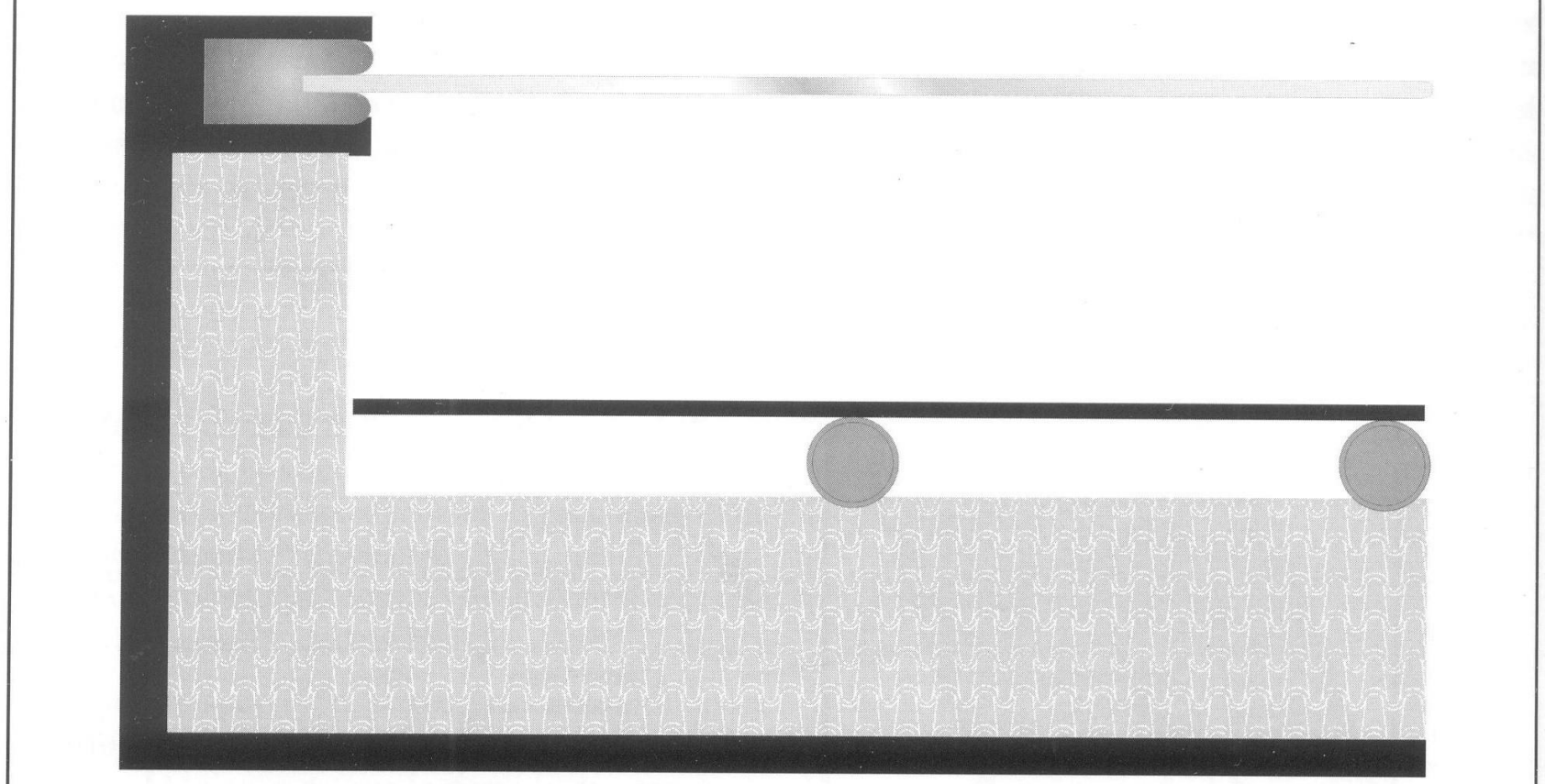


Figura 2.8: Detalle de captador solar plano.

d) Carcasa o caja

Junto con la cubierta, constituye el contenedor del resto de componentes del captador, los protege de la intemperie y da rigidez al conjunto. El diseño de la carcasa debe presentar resistencia mecánica suficiente para soportar tanto las condiciones de montaje como las de uso, y el material debe tener un buen comportamiento frente al ambiente exterior y a las condiciones de funcionamiento.

El diseño del captador debe prever la distinta dilatación térmica de todos los materiales que lo componen; en particular se deben incorporar juntas elásticas entre la cubierta y la carcasa. El material de estas juntas debe ser resistente a la radiación solar, altas temperaturas y humedad. Su principal característica debe ser mantener esas buenas propiedades durante mucho tiempo.

Es conveniente hacer hincapié en dos características globales importantes de un captador solar térmico:

- Su alta durabilidad manteniendo sus propiedades fundamentales.
- Su peso lo más bajo posible que facilita el montaje y disminuye las cargas sobre las cubiertas sobre las que se debe montar.

2.1.3 Caracterización del funcionamiento

Los flujos energéticos que tienen lugar en un captador solar se muestran en la Figura 2.9:

El balance energético en un captador solar establece que la energía útil captada es igual a la energía solar absorbida menos las pérdidas térmicas del mismo. La energía solar absorbida es proporcional a la irradiancia solar, G en W/m^2, incidente sobre el plano del captador de área A y depende de la transmitancia de la cubierta transparente τ y de la absortancia del absorbedor α; las pérdidas se pueden considerar proporcionales a la diferencia entre una temperatura representativa del captador Tc con la del ambiente T_{amb} a través de un coeficiente global de pérdidas térmicas U_L. También resulta importante considerar la temperatura equivalente el entorno del captador (la bóveda celeste y las

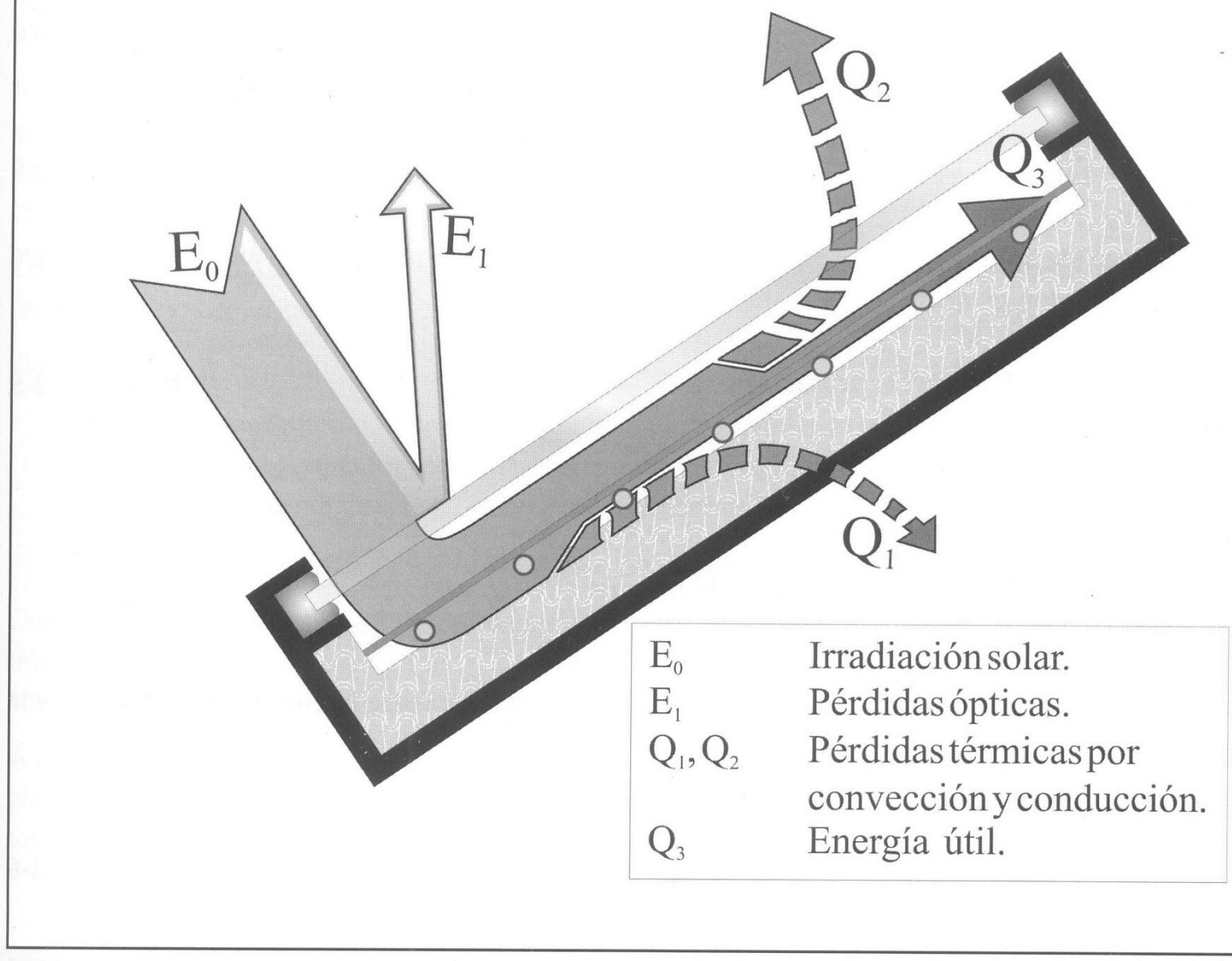


Figura 2.9: Balance energético en un captador solar plano.

superficies posterior y lateral) en cuanto a las pérdidas por radiación infrarroja. De esta forma, y en primera aproximación, la energía útil real aportada por el captador (Q_u) se puede expresar mediante la ecuación:

$$Q_u = G \cdot A \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_L \cdot A \cdot (T_C - T_{amb}) \qquad \textbf{Ecuación 2-1}$$

Con objeto de considerar la eficiencia de la transferencia de calor entre el absorbedor (captador) y el fluido de trabajo, se define el factor de eficiencia F del captador como el cociente entre la energía útil obtenida y la energía que se obtendría si la temperatura del captador fuese igual a la temperatura representativa del fluido de trabajo (T_f).

$$F = \frac{Q_u}{G \cdot A \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_L \cdot A \cdot (T_f - T_{amb})} \qquad \textbf{Ecuación 2-2}$$

En el caso ideal de que la resistencia térmica a la transferencia de calor fuese nula, las temperaturas T_c y T_f serían iguales y F sería la unidad. En realidad F siempre es positivo y menor que la unidad. Por tanto:

$$Q_u = F \cdot A \cdot \left[G \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_L \cdot \left(T_f - T_{amb}\right)\right] \qquad \textbf{Ecuación 2-3}$$

Este factor F toma diversos valores dependiendo de la temperatura representativa del fluido considerada, que puede ser la de entrada al captador (T_e), la de salida (T_s) o la media de ambas ($T_m = (T_e + T_s)/2$). Se emplean con más frecuencia T_e y T_m.

En el análisis mostrado a continuación se considera como temperatura representativa del fluido la temperatura de entrada T_e. En este caso el factor de eficiencia se denota como F_R, expresándose la energía útil real captada:

$$Q_u = F_R \cdot A \cdot [G \cdot (\tau \cdot \alpha) - U_L \cdot (T_e - T_{amb})] \qquad \textbf{Ecuación 2-4}$$

La energía útil conseguida en el captador se emplea en calentar el caudal másico del fluido de trabajo que circula a través del captador, es decir en aumentar su entalpia[1]. Por tanto:

$$Q_u = m \cdot C_p \cdot (T_s - T_e) \qquad \textbf{Ecuación 2-5}$$

Siendo:

m: caudal másico del fluido de trabajo

$C_{p:}$ calor específico a presión constante del fluido de trabajo[2]

El rendimiento (η) de un captador solar plano se define como el cociente entre la energía útil generada y la radiación solar incidente sobre el captador:

$$\eta = \frac{Q_u}{G \cdot A} = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)}{G \cdot A} = F_R \cdot (\tau \cdot \alpha) - F_R \cdot U_L \cdot \frac{(T_e - T_{amb})}{G} \qquad \textbf{Ecuación 2-6}$$

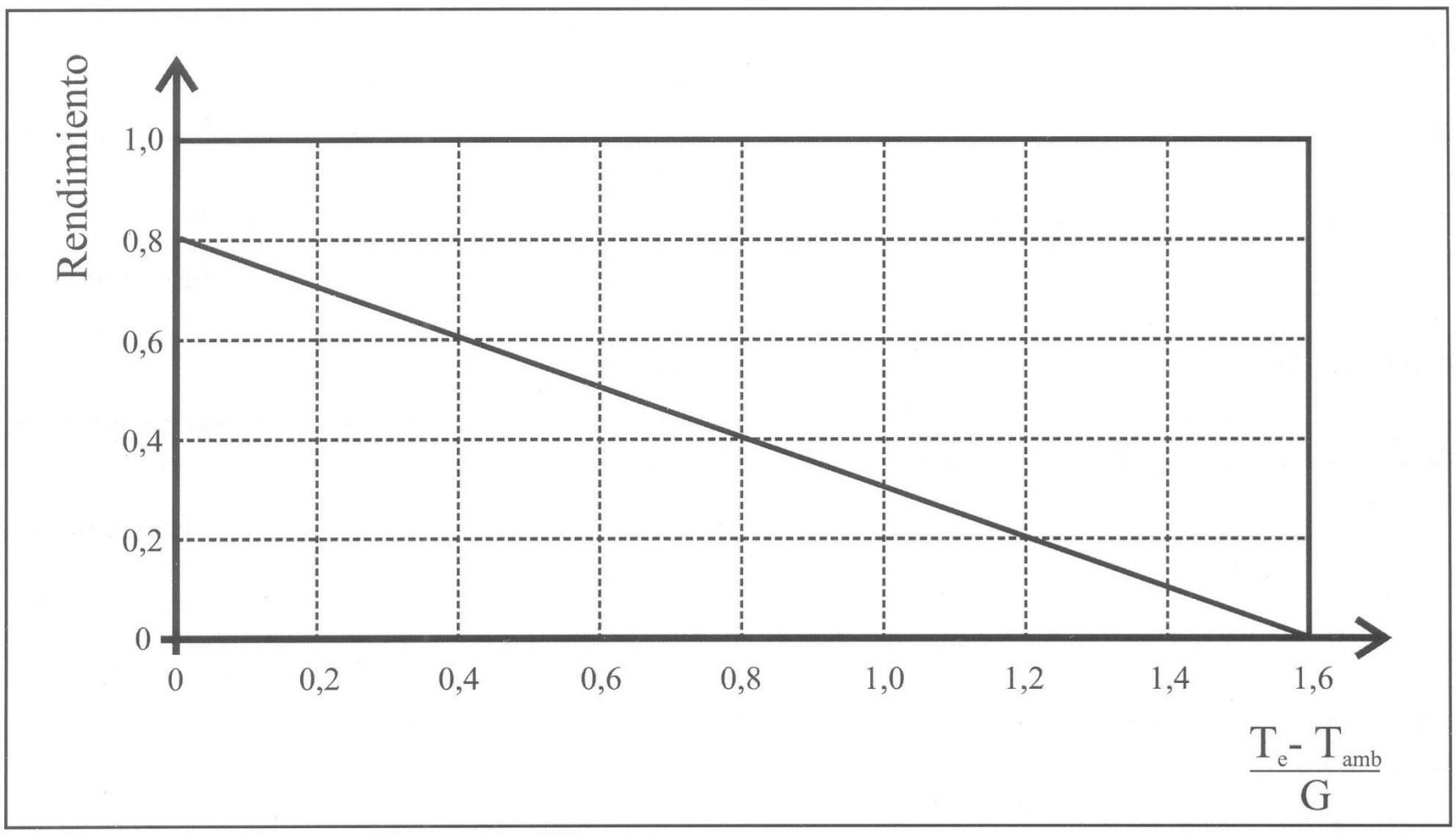


Figura 2.10: Curva de rendimiento de un captador solar plano.

[1] o su energía interna $mc_v\Delta T$ si el fluido no circula en el intervalo de tiempo considerado.
[2] cuando el fluido está en forma líquida, prácticamente igual al de volumen constante-

Figura 2.10: Curva de rendimiento de un captador solar plano.

Por tanto, para un intervalo de temperaturas del fluido de trabajo en el que se pueda considerar U_L prácticamente constante, el rendimiento instantáneo es función lineal del término $(T_e-T_{amb})/G$.

En la Figura 2.10 se observa que para una irradiancia G dada, a medida que aumenta la diferencia de temperaturas entre el captador y el ambiente, disminuye el rendimiento del captador por lo que interesa destacar que, para las mismas condiciones externas de irradiancia y temperatura ambiente, el rendimiento de un captador solar disminuye cuando aumenta la temperatura del fluido de entrada al mismo.

Dado que los ensayos instantáneos de los captadores se hacen en régimen de circulación cuasiestacionaria, las expresiones anteriores que se emplean en la práctica son las 2-4, 2-5 y 2-6.

De la función de rendimiento se obtienen los siguientes parámetros característicos de un captador solar:

- $F_R.(\tau\alpha)$. Factor óptico o factor de ganancia. Es el rendimiento del captador cuando la diferencia de temperaturas entre el captador y el ambiente es cero. También se conoce como rendimiento óptico del captador y se representa como η_0, siendo su valor del orden de 0,8.
- $F_R \cdot U_L$. Factor de pérdidas. Es la pendiente de la recta de rendimiento.

Otro parámetro característico del captador es el que se obtiene para la intersección de la curva de rendimiento con el eje de abcisas y que, para unas determinadas irradiancia incidente y temperatura ambiente, corresponde a la temperatura máxima que se puede alcanzar en el captador solar.

A medida que se alcanzan temperaturas elevadas en el captador solar se pueden cometer errores inaceptables modelando las pérdidas térmicas exclusivamente mediante el coeficiente lineal y constante UL. En estos casos es necesario expresar la curva de rendimiento mediante la siguiente ecuación de segundo orden:

$$\eta = \eta_0 - U_{L,1} \cdot \frac{(T_e - T_{amb})}{G} - U_{l,2} \cdot \frac{(T_e - T_{amb})^2}{G} \qquad \textbf{Ecuación 2-7}$$

En la expresión anterior las pérdidas térmicas quedan modeladas matemáticamente mediante dos coeficientes (lineal $U_{L,1}$ y cuadrático $U_{L,2}$) de transferencia de calor. Evidentemente, a medida que estos valores son más altos disminuye el rendimiento del captador cuando el término $(T_e-T_{amb})/G$ aumenta.

En un análisis térmico más preciso habría que tener en cuenta un término de pérdidas por radiación de onda larga a la temperatura del captador en T^4 frente a su entorno, tanto la bóveda celeste con sus características radiativas más o menos conocidas como con la cubierta sobre la que se apoya el captador.

En general, la potencia térmica útil captada P_c que se puede extraer o evacuar de un campo de captadores solares se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$P_C = \eta \cdot A \cdot G \qquad \textbf{Ecuación 2-8}$$

Que alcanza su valor máximo cuando son máximos el rendimiento ($\eta = \eta_0$) y la irradiancia G. La potencia térmica P_c es una función que depende de parámetros climáticos (irradiancia, temperatura ambiente y del entorno del captador) y de los parámetros de funcionamiento del sistema de captación solar: área de captadores, curva de rendimiento (factor óptico, coeficientes de pérdidas térmicas), etc.

2.1.4 Orientación, inclinación y sombras

Uno de los objetivos básicos que se debe plantear en una instalación solar es el de maximizar su producción energética durante el periodo de utilización. Para conseguir esto, entre otros aspectos como la variación de la demanda de energía, se ha de tener en cuenta que en un determinado periodo de tiempo y para cualquier localidad, la

radiación solar incidente sobre los captadores solares depende de la orientación y del ángulo de inclinación sobre el plano horizontal que presenten estos captadores.

En la Figura 2.11 se visualizan las trayectorias aparentes del sol en relación a una instalación solar situada en la cubierta de un edificio en días determinados y representativos del año (solsticios de verano e invierno y equinoccios de primavera y otoño). Los demás días del año el sol recorre trayectorias aparentes intermedias entre las representadas.

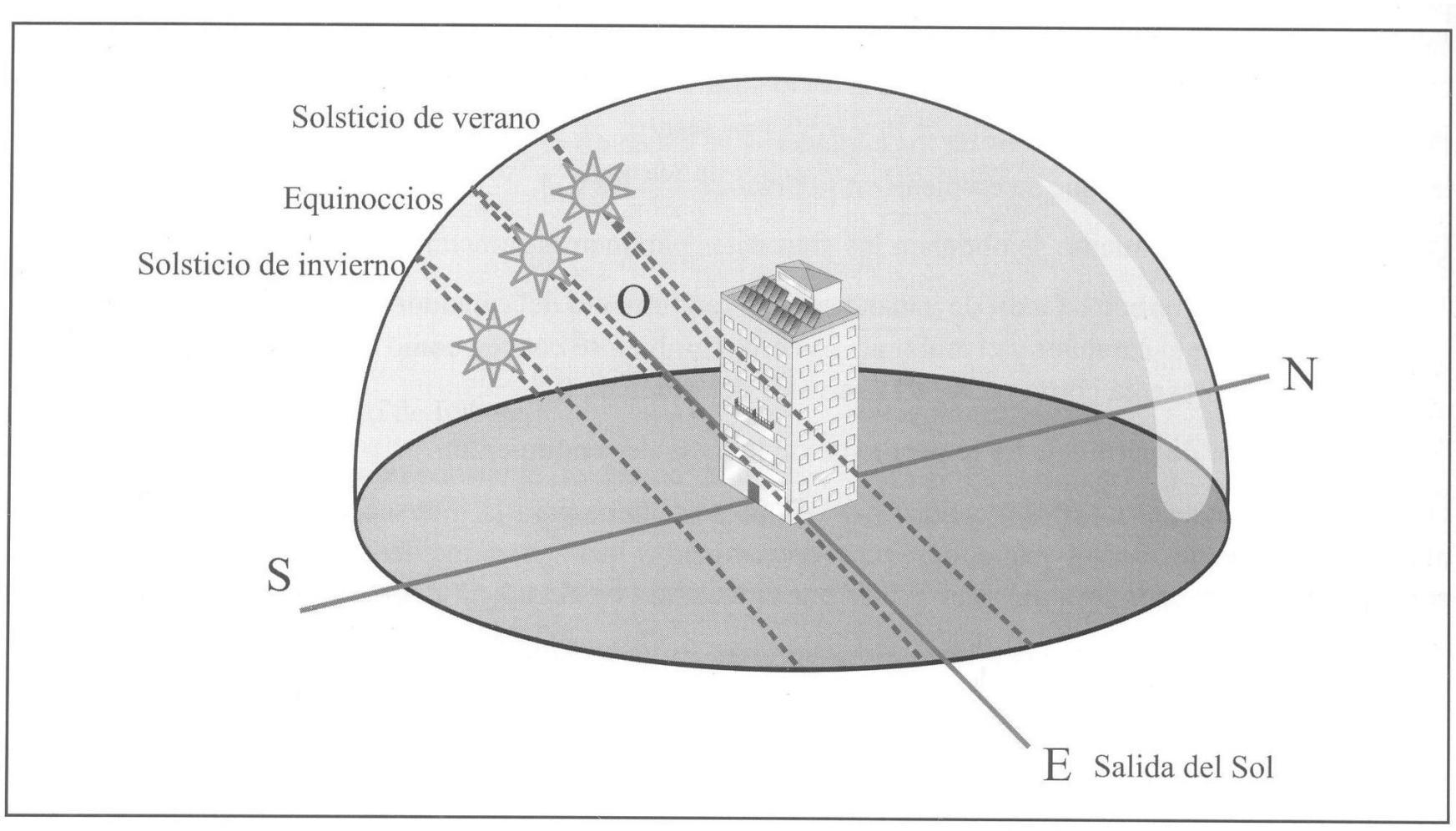


Figura 2.11: Posición del sol en días representativos del año.

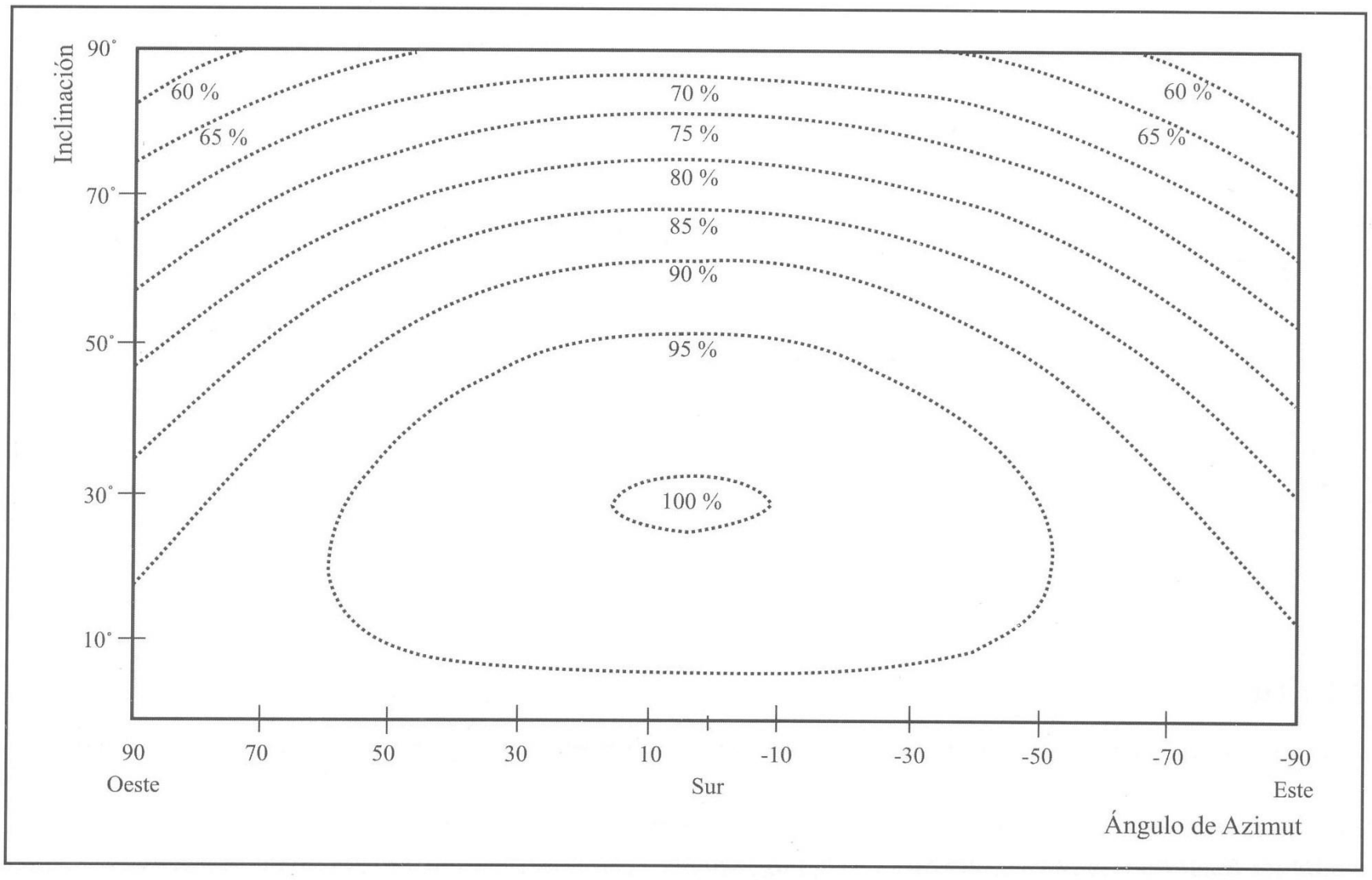


Figura 2.12: Valores porcentuales sobre el máximo de la irradiación global anual en una superficie inclinada.

La radiación solar en una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar es mayor que en la misma superficie colocada en cualquier otra posición. Al variar el azimut y la altura solar a lo largo de un día y con el día del año, el ángulo de incidencia de la radiación óptimo en una superficie dada no es constante. La situación óptima se obtendría con una superficie cuya inclinación y orientación variara constantemente. Sin embargo, en las instalaciones solares térmicas de baja temperatura los captadores solares adoptan una posición fija por lo que ha analizarse cuidadosamente la colocación de los captadores para optimizar el comportamiento de la instalación solar.

En la Figura 2.12 se muestra cómo varía porcentualmente la irradiación solar anual incidente sobre una superficie en Madrid al variar su orientación y/o inclinación. Esta figura es prácticamente extensible a cualquier otra población española.

En la figura anterior se observa que para cualquier inclinación la orientación para la que se consigue el valor máximo de irradiación global anual es la sur. Sin embargo, cuando la inclinación de la superficie no es muy elevada variaciones en ± 50º respecto del sur geográfico no suponen disminuciones superiores al 5% de la irradiación global anual por lo que generalmente se admiten sin grandes reservas que los captadores solares se instalen orientados dentro de este rango (sur ± 50º).

Respecto al ángulo de inclinación se observa que para aproximadamente entre 10º y 50º de inclinación sobre el plano horizontal no se producen reducciones significativas del valor de la irradiación anual (inferiores al 5% sobre el máximo). De la figura anterior también se deduce que a medida que los captadores se desorientan respecto del sur el ángulo de inclinación de estos ha de ser inferior para evitar reducciones más importantes.

Se ha de destacar que dependiendo de la época del año las variaciones en la irradiación global debidas a cambios en la inclinación sí pueden ser significativas. En la siguiente figura correspondiente a Sevilla, para la orientación sur, se muestra para diferentes inclinaciones el valor de irradiación global diaria media para cada mes. Se observa que dependiendo del mes del año considerado el ángulo de inclinación más favorable (aquel que recibe mayor radiación solar) varía.

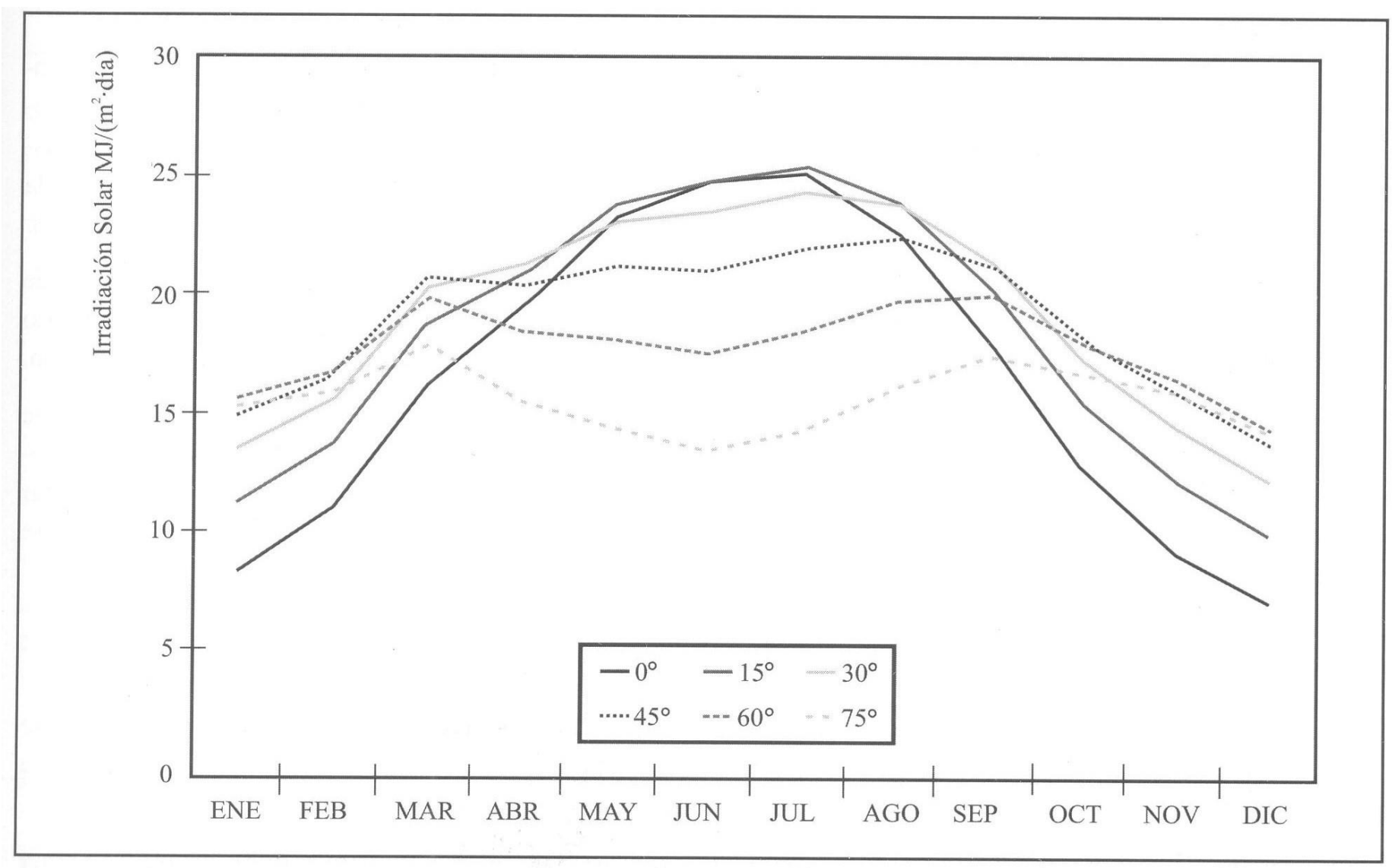


Figura 2.13: Variación diaria media mensual de la irradiación global con el ángulo de inclinación sobre el plano horizontal

Para determinar la inclinación más adecuada de los captadores solares se ha de decidir previamente el criterio de optimización a seguir en el proceso de cálculo de la instalación (maximización de la energía generada anualmente, mantenimiento de un nivel mensual mínimo de energía aportada, etc.) así como conocer la curva de demanda de energía prevista.

El ángulo de inclinación para el que se consigue maximizar la radiación solar captada a lo largo del periodo anual es aquel que coincide con la latitud de la localidad en cuestión. Sin embargo, existen otros factores (variabilidad de la curva de la demanda de energía, etc.) que determinan que puede interesar emplear una inclinación diferente a la de la latitud del lugar. Es decir, la inclinación que maximiza la radiación solar captada puede ser diferente de la inclinación que maximice la producción energética útil de la instalación solar

Al aumentar la inclinación de los captadores se maximiza la cantidad de radiación solar recibida por estos durante el periodo invernal. Por tanto, esta medida se suele adoptar en los casos en los que la aplicación necesite priorizar la época invernal. En este caso, habitualmente se utilizan inclinaciones alrededor de 10-15º superiores a la latitud.

En caso de maximizar la radiación solar durante el verano se ha de disminuir el ángulo de inclinación los captadores respecto de la latitud (en torno a 10-15º menos).

Sombras

Para optimizar la radiación solar global incidente sobre los captadores solares se ha de reducir el campo de sombras arrojado sobre estos. En el análisis del campo de sombras arrojado se ha de tener en cuenta el crecimiento de árboles, construcciones anexas, etc.

La evaluación del campo de sombras arrojado por los diversos obstáculos sobre los captadores solares se recomienda realizarla de forma conservadora por lo que normalmente se toma como referencia el mediodía solar del solsticio de invierno (21 de diciembre), instante para el que el sol alcanza su menor elevación (es mínima la altura solar máxima del día).

Entre los criterios generales empleados se encuentra el de permitir la reducción del 5-10% del área de captadores solares al mediodía solar del solsticio de invierno. Si se pretende ser más restrictivo basta con reducir el porcentaje anterior hasta el 0%. Este último criterio se emplea habitualmente en el cálculo de la distancia de separación entre filas de captadores orientadas al sur. Esta distancia depende por tanto de la localidad de la instalación (determina la altura solar) y de la inclinación y altura de los captadores solares.

Debido a que durante el periodo invernal la contribución energética de la instalación solar a la cantidad total de energía aportada anualmente por esta es relativamente escasa se permite una cierta relajación en este criterio (como máximo hasta el 15%) ya que estas sombras no afectan drásticamente al funcionamiento de la instalación.

El criterio definitivo sobre las sombras en los captadores solares ha de ser tomado en cada instalación de acuerdo a las características particulares de la misma. Para realizar un estudio detallado de las sombras arrojadas se ha de analizar la altura solar, el acimut en periodos cortos de tiempo alrededor del mediodía solar (al menos durante las 3 horas anteriores y posteriores al mediodía solar). A partir de esta información se puede optimizar la colocación de los captadores solares.

2.1.5 Conexionado

El diseño habitualmente modular del sistema de captación de una instalación solar térmica requiere que se dedique especial atención a resolver la distribución de los captadores solares y su conexionado de forma que se garantice que son similares las condiciones de funcionamiento de todos ellos.

Conseguir una distribución uniforme de caudales en todos los captadores es imprescindible para obtener saltos de temperatura homogéneos que proporcionen rendimientos similares en cada captador y, por tanto, el mejor rendimiento global.

Por ello, el diseño de un sistema de captación solar requiere su correcto equilibrado hidráulico y que dichas condiciones se mantengan inalterables en el tiempo.

A continuación se analizan las situaciones de conexionado más habituales que se plantean al utilizar captadores solares del rango de 2 m^2 (entre 1,5 y 2,5) y que disponen de cuatro bocas de conexión (cada una de ellas cercana a uno de los cuatro extremos del captador).

A efectos de diseño de un campo de captadores se analiza, en primer lugar, el diseño de las baterías y, posteriormente, el del conjunto de baterías. Se denomina batería al conjunto de captadores, normalmente instalados sobre una estructura común, interconectados entre ellos de forma que exteriormente se comporte a todos los efectos como un único captador de mayor tamaño. La configuración de una batería tiene que garantizar que todos los captadores que la componen funcionan igual.

a) Agrupación de captadores en baterías

Cuando se interconectan varios captadores entre sí para formar una batería normalmente se pretende hacer circular el mismo caudal de fluido a través de cada captador siendo el caudal total suma de los caudales individuales que circulan por cada captador. Por este motivo se utiliza el conexionado en paralelo y, en función de que los colectores de distribución sean exteriores o interiores, se diferencia entre las siguientes dos posibles formas de conexión:

i) Paralelo exterior

En este primer caso (Figura 2.14) para conseguir una distribución uniforme de caudales en los distintos captadores debe realizarse un diseño y dimensionado adecuado de los colectores distribuidores exteriores de forma que las pérdidas de carga de todos los caminos hidráulicos posibles sean prácticamente idénticas.

Especial cuidado debe aplicarse a las pérdidas de carga singulares debidas a obstrucciones no deseadas (rebabas de soldadura, etc.) y accesorios de conexión, que pueden afectar considerablemente al equilibrado hidráulico si son significativas en comparación con las pérdidas de carga de los colectores de distribución internos y del resto de tuberías de evacuación de los captadores (tuberías paralelas, serpentín, etc.).

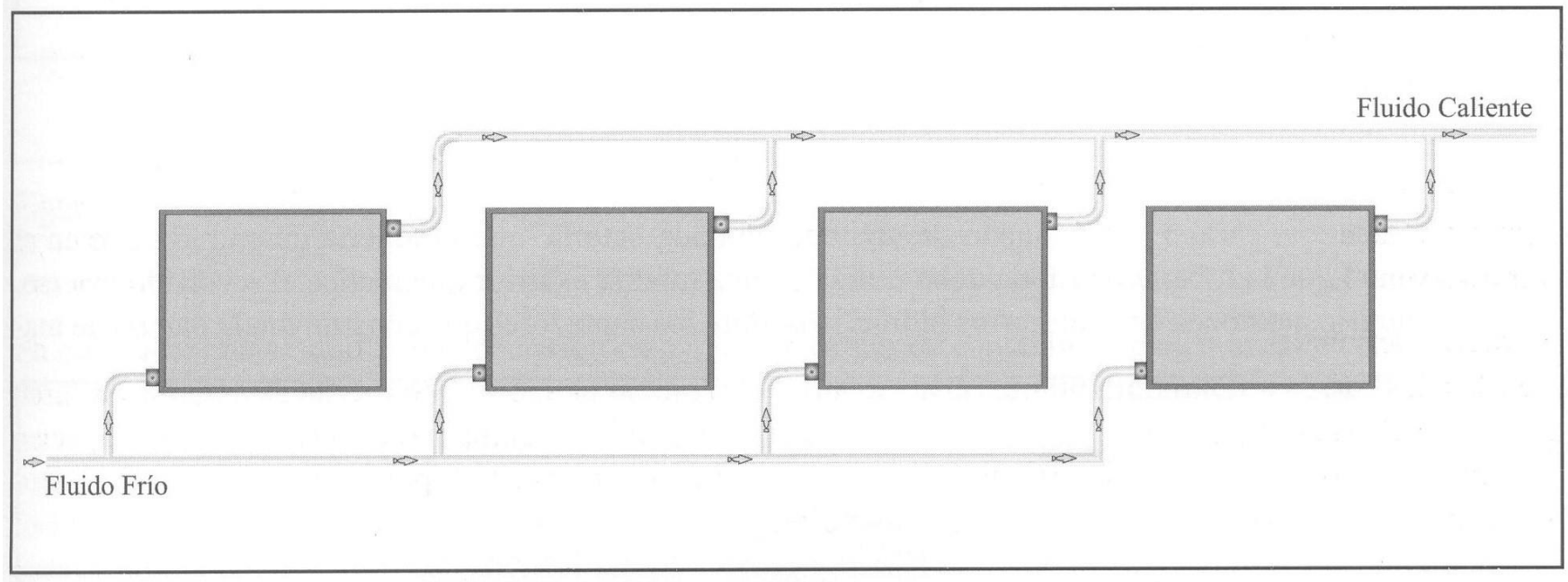


Figura 2.14: Conexionado en paralelo con colectores distribuidores exteriores

ii) Paralelo interior

En el caso de conexionado con colectores distribuidores interiores (Figura 2.15) los captadores presentan la posibilidad de conectarse en paralelo entre sí sin necesidad de utilizar tuberías exteriores lo que disminuye el coste de

instalación. Para ello, los captadores disponen de tuberías (colectores) en la parte inferior y superior con diámetros superiores a las del resto del absorbedor (tuberías paralelas de los absorbedores en forma de parrilla, tubería en forma de serpentín, etc.).

Funcionalmente, el paralelo interior es similar al exterior con un diseño de tuberías de sección constante. Para minimizar el desequilibrio hidráulico se ha de asegurar que la pérdida de carga asociada a los colectores distribuidores no sea significativa en relación con la del resto de tuberías del absorbedor (tuberías paralelas, serpentín) de forma que estas últimas sean las que mantengan la autoridad del circuito en términos de pérdida de carga.

La relación de pérdidas de carga entre la de los colectores distribuidores y la de las tuberías del absorbedor es la que limita el caudal de agua que puede circular por una batería y, por tanto también, el número de captadores que se pueden conectar en paralelo interior.

Para un determinado diámetro de los colectores distribuidores, el número de captadores que se pueden conectar en paralelo interior es, por tanto, función del caudal de circulación y del diámetro de las tuberías del absorbedor. Se recomienda que la pérdida de carga en estos colectores distribuidores sea muy baja en comparación con la pérdida de carga total en cada captador. A medida que disminuye el porcentaje de la pérdida de carga total en el sistema de captación que es debida a los colectores distribuidores aumenta el número de captadores que se puede conectar de acuerdo a esta configuración. En estos casos al ser la pérdida de carga en el interior de cada captador muy superior a la de los colectores distribuidores, cada captador se convierte en la autoridad o elemento controlante en el sistema de captación facilitándose de esta forma que se consiga una distribución uniforme del caudal de circulación entre los distintos captadores que constituyen la batería.

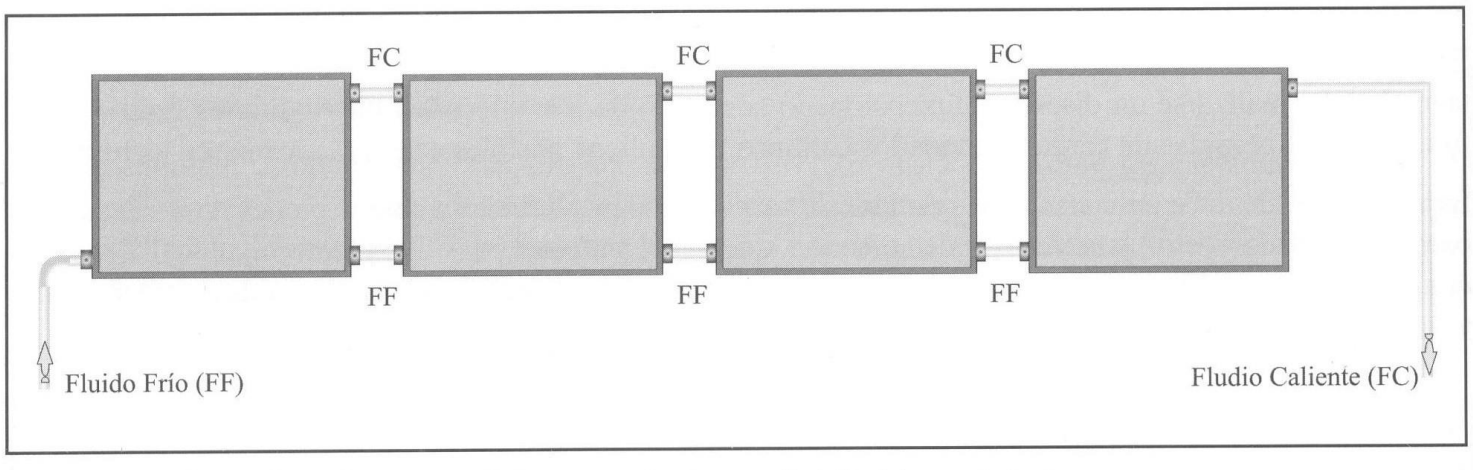


Figura 2.15: Conexionado en paralelo con colectores distribuidores interiores

Cuando se requiera, para el conexionado de una determinada batería, que la tubería de entrada esté en el mismo extremo que la tubería de salida debe utilizarse una tubería exterior que realice el recorrido inverso. En caso contrario, aparecen desequilibrios hidráulicos entre los captadores que constituyen la batería de manera que circula

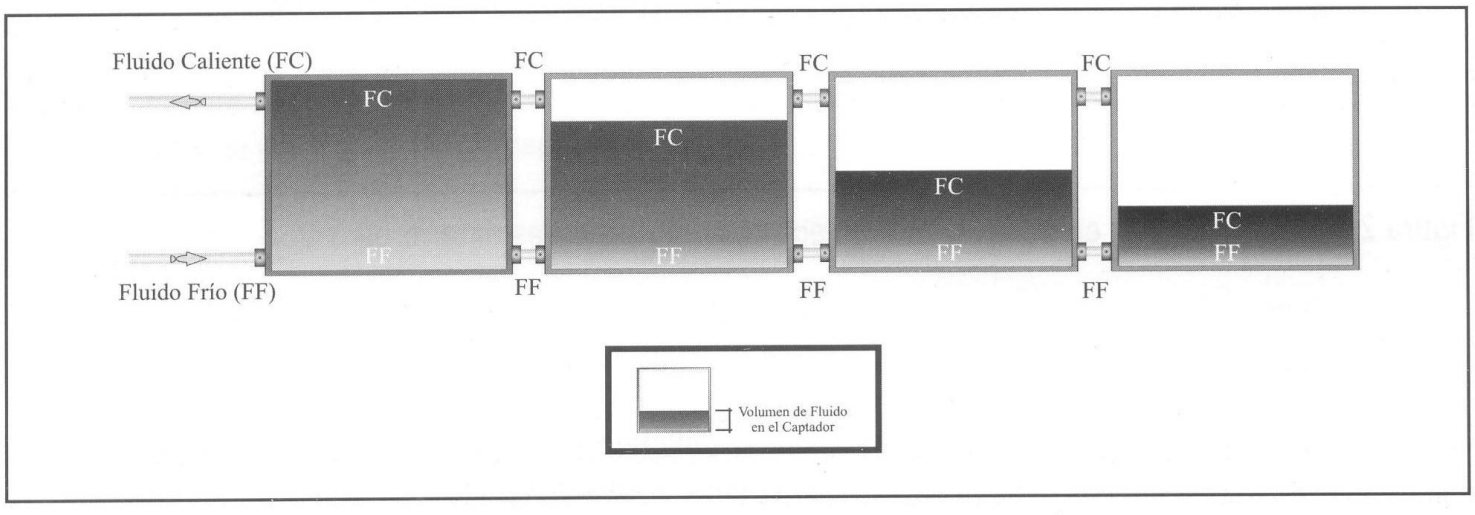


Figura 2.16: Batería de captadores no equilibrada.

mayor caudal por los captadores más cercanos a las tuberías de entrada y salida y menor caudal por los más lejanos. Esta situación provoca que no exista homogeneidad de temperaturas a lo largo de la batería ya que los saltos de temperatura alcanzados en cada captador son diferentes y por tanto no funcione de forma óptima la instalación.

En la Figura 2.16 se representa esta última situación de forma gráfica. Por los captadores más alejados de las tuberías de entrada y de salida circula menos fluido (representado por la disminución del volumen contenido en cada captador). Sin embargo el fluido contenido en estos captadores más alejados alcanza mayores temperaturas (simbolizado por la mayor cantidad porcentual de fluido de color más oscuro).

b) Agrupación de baterías

Las baterías de captadores solares se pueden conectar entre sí en paralelo o en serie. Se recomienda que las baterías a conectar sean iguales ya que de otra forma para que presenten el mismo comportamiento (iguales saltos de temperatura) se han de tomar medidas particulares (regulación de caudales, etc.).

i) Conexión en paralelo

Cuando se necesita conectar baterías de captadores en paralelo entre sí se realiza siguiendo el esquema de la Figura 2.17. Con el conexionado en paralelo se distribuye un determinado caudal de circulación por las distintas baterías de forma que el caudal total es suma de las caudales individuales de cada batería. Se considera como pérdida de carga la correspondiente al circuito que se puede establecer a través de las distintas baterías que presente mayor pérdida de carga.

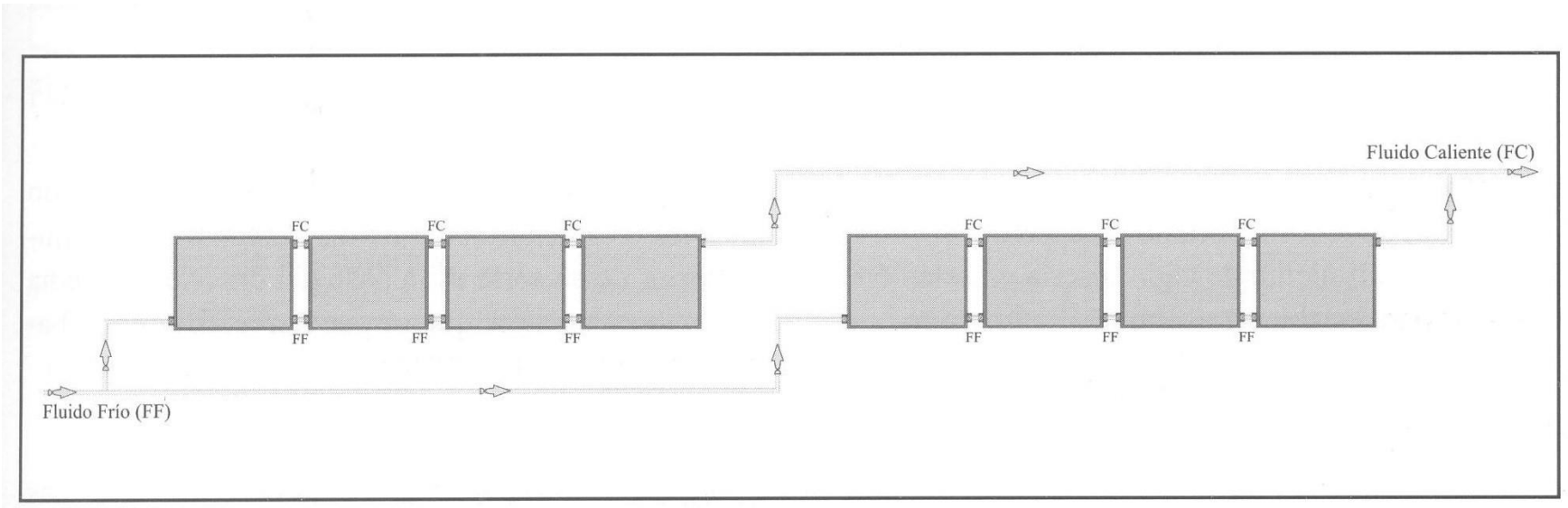


Figura 2.17: Conexionado en paralelo de 2 baterías de captadores.

En este caso, que es similar a la conexión en paralelo exterior de captadores, para que exista equilibrado hidráulico también se ha de cumplir que la pérdida de carga de cada camino hidráulico sea idéntica. Para que no afecte al equilibrado los desajustes en el diseño, dimensionado y montaje de los circuitos de conexión, para cualquier posible camino hidráulico la pérdida de carga de la batería de captadores debe ser significativa en relación con la pérdida de carga total del sistema de captación. En este sentido se recomienda que, para cualquier camino hidráulico posible, la pérdida de carga de las tuberías de conexión a la batería de captadores que forma parte del camino elegido sea muy baja (máximo del 30%) en comparación con la pérdida de carga total del sistema de captación.

ii) Conexión en serie

Mediante este tipo de conexión (ver Figura 2.18) el mismo fluido y caudal de circulación pasa a través de las baterías conectadas entre sí. Por tanto, el caudal total es igual al caudal que circula por cada una de las baterías y la pérdida de carga del circuito corresponde a la suma de la pérdida de carga de cada una de las baterías conectadas entre sí.

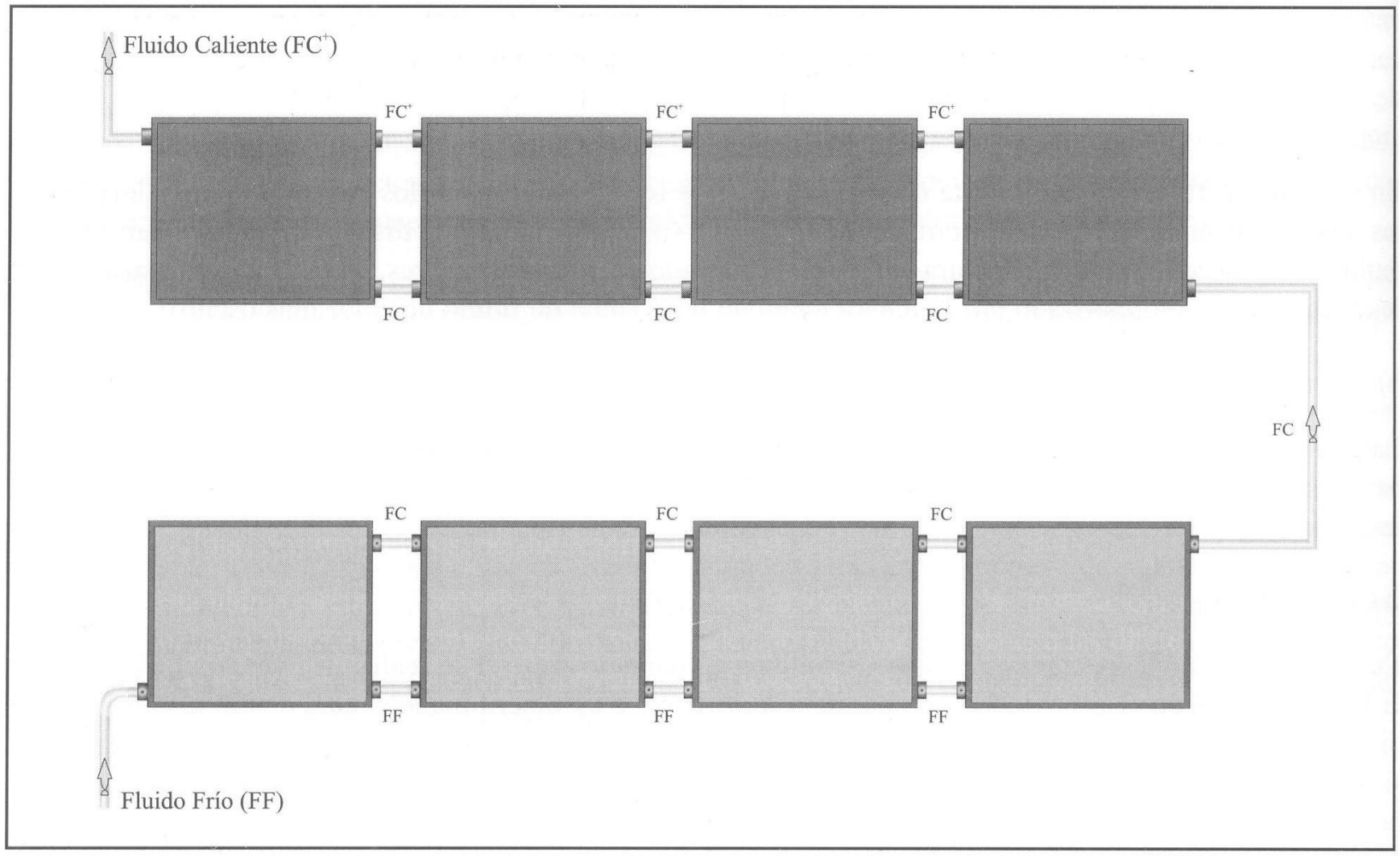


Figura 2.18: Conexionado en serie de 2 baterías de captadores.

El fluido se va calentando a medida que pasa por cada batería por lo que, para un mismo caudal y de acuerdo a la función de rendimiento de un captador solar, va disminuyendo el rendimiento de los mismos. Esta disminución de rendimiento de cada batería en relación con la anterior de su serie es la base del criterio que se ha de seguir para establecer el límite al número máximo de conexiones en serie que se pueden realizar entre baterías. Este límite depende fundamentalmente del rendimiento del captador y de los caudales en circulación.

c) Campo de captadores

En grandes instalaciones se pueden emplear todos los tipos de conexionado mostrados anteriormente: las baterías de captadores normalmente se encuentran constituidas por captadores conectados en paralelo interior entre sí y las baterías se conectan entre sí en serie o en paralelo. Las agrupaciones de baterías pueden conectarse de forma mixta (serie/paralelo).

Los factores fundamentales que deben considerarse en el diseño del campo de captadores son los siguientes:

- la selección del número de captadores de cada batería
- la distribución homogénea de baterías para facilitar el trazado hidráulico equilibrado
- la modulación del campo en subcampos o agrupaciones de baterías
- la configuración del circuito hidráulico y la longitud de tuberías utilizadas

Cuando se requiera, para un determinado campo de captadores, que la tubería de salida termine en el mismo extremo que la tubería de entrada (que es la situación más habitual que se presenta para la conexión de un sistema de captación con la centralización del resto de componentes) pueden utilizarse las siguientes opciones con objeto de equilibrar hidráulicamente el sistema de captación:

- Empleo de una tubería exterior que realice el recorrido inverso (ida o retorno invertido) para que los caminos hidráulicos sean iguales tal como se muestra en la Figura 2.19.

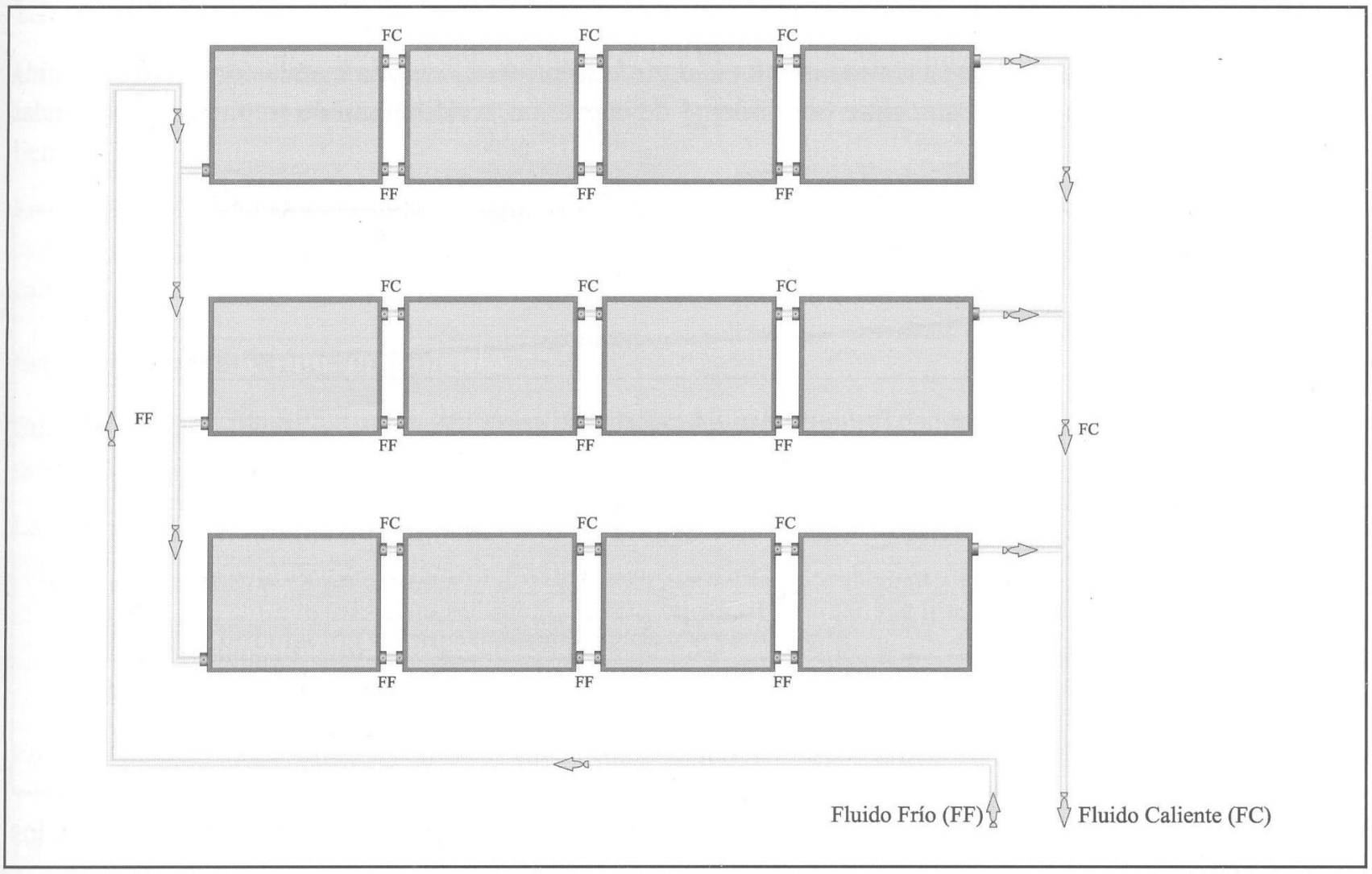


Figura 2.19: Conexionado en paralelo de baterías con ida invertida.

- Instalación de válvulas de equilibrado hidráulico que permitan regular el caudal de circulación en cada una de las baterías.

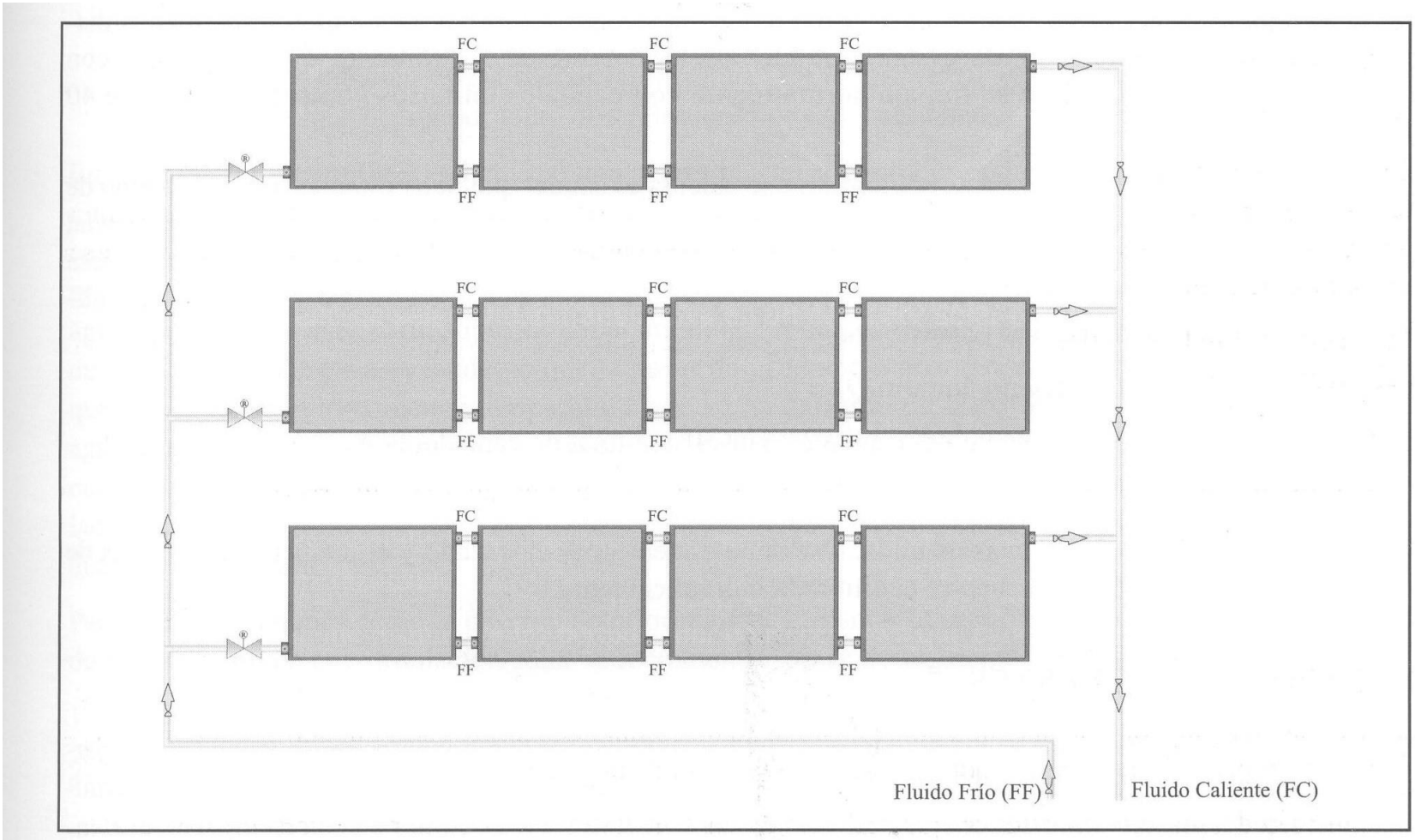


Figura 2.20: Conexionado en paralelo de baterías mediante válvulas de equilibrado.

2.1.6 Cálculo de caudales de circulación

El establecimiento del caudal de funcionamiento en el circuito primario de una instalación es una solución de compromiso, fundamentalmente, entre rendimiento de captación, rendimiento de acumulación, pérdidas térmicas y consumo eléctrico.

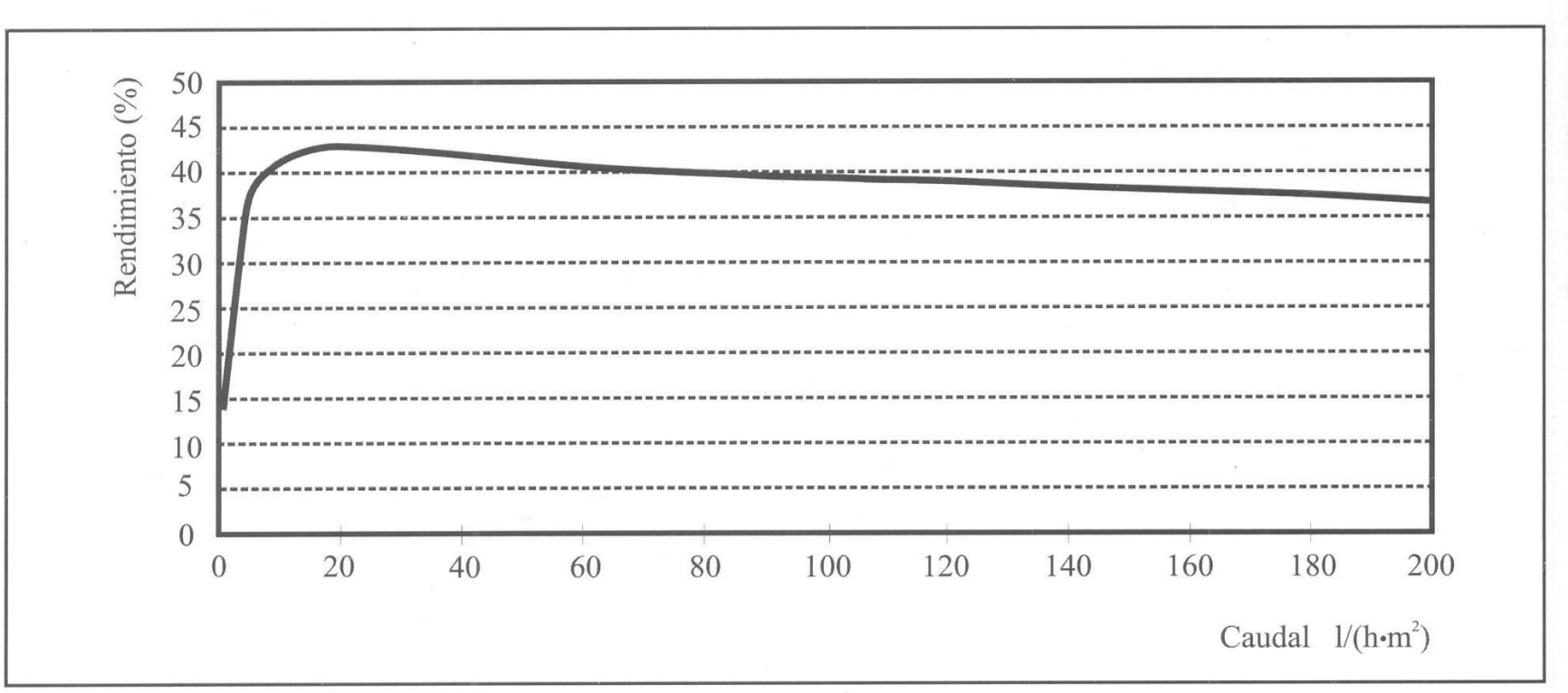


Figura 2.21: Rendimiento de una instalación solar en función del caudal de circulación a través de los captadores solares.

En la Figura 2.21 se observa que el rendimiento máximo de una instalación se consigue para un caudal en el circuito primario de aproximadamente 20 l/h por m^2 de captador solar (rango de caudal bajo). Al reducirse este caudal unitario (por área de captación solar) se produce un descenso brusco del rendimiento mientras que trabajando con caudales mayores se producen solamente pequeñas disminuciones de rendimiento. Para evitar la reducción apreciable de rendimiento que se alcanza con caudales excesivamente bajos se trabaja normalmente con caudales unitarios comprendidos entre 40 y 60 l/(h.m^2).

Una vez seleccionado el caudal de diseño unitario se calcula el caudal que debe circular por cada tramo de tubería del circuito hidráulico para conseguir un adecuado equilibrio hidráulico en la instalación. El caudal de diseño global de la instalación se determina a partir del caudal de diseño unitario y es función del área de captadores solares. A efectos prácticos, el proceso de cálculo del caudal de diseño global (Q_D) del circuito primario de una instalación consiste en:

1. Seleccionar el caudal de diseño unitario Q_d.
2. El caudal Q_D es igual al producto del caudal Q_d por el área total de captadores A

$$Q_D = Q_d \cdot A$$

Si el circuito hidráulico forma más de un lazo se debe dimensionar el trazado y el diámetro de tuberías de manera que la instalación se encuentre equilibrada hidráulicamente.

2.2 OTROS COMPONENTES

En este apartado se indican las principales características del resto de componentes que pueden formar parte de una instalación solar térmica los cuales son también empleados en otros tipos de instalaciones térmicas, por lo que aquí sólo se consideran aquellos aspectos singulares a los que se ha de prestar especial atención debido a las condiciones especiales de funcionamiento de las instalaciones solares.

2.2.1 Acumulador

Una instalación solar térmica para producción de agua caliente sanitaria requiere de un sistema de acumulación de energía que permita acoplar en el tiempo la oferta de radiación solar y la demanda de agua caliente.

La acumulación debe almacenar energía térmica con la mayor eficiencia posible; dentro del término eficiencia se engloban la calidad de la estratificación de temperaturas (distribución vertical de temperaturas alcanzada en un acumulador) y las pérdidas térmicas.

Estratificación de temperaturas

Cuando un acumulador se encuentra estratificado la temperatura del acumulador es una función de su altura vertical, decreciendo la temperatura de la parte superior a la inferior.

La calidad de la estratificación queda configurada por los procesos de:

- Calentamiento o carga térmica
- Mezcla por circulación interna o durante la descarga térmica
- Degradación por transferencia térmica

En estos procesos tienen gran importancia la configuración del acumulador, la situación de las conexiones y las velocidades de circulación del fluido en el interior.

La eficiencia de una instalación solar aumenta al hacerlo la estratificación de temperaturas alcanzada en el acumulador porque:

- Cuando existe consumo de agua caliente, al estar el agua más caliente en la parte superior, es ésta la que va primero hacia el consumo consiguiéndose por tanto trasvasar el agua a mayor temperatura y retardar, en su caso, la activación del sistema de apoyo.
- El agua almacenada en la parte inferior se encuentra a inferior temperatura por lo que el agua que va desde el acumulador hasta los captadores o el fluido de trabajo que va desde el intercambiador hacia los captadores también está a menor temperatura. En ambas situaciones la temperatura de entrada a captadores es más baja y por tanto el rendimiento de éstos aumenta.

En las instalaciones solares es habitual que se produzcan situaciones en las que, en caso de emplear acumuladores convencionales, se disminuya rápidamente la estratificación de temperaturas previamente alcanzada en el acumulador. Esto es debido a que habitualmente se produce la entrada de agua caliente procedente de captadores por la parte superior del acumulador y hay bastantes ocasiones en las que el agua contenida en esta parte superior del acumulador se encuentra a mayor temperatura que la del agua de entrada. En este caso es evidente que, a pesar de producirse una ganancia neta de energía térmica ya que se sustituye agua a menor temperatura que se ha extraído de la parte inferior del acumulador por agua a mayor temperatura que se introduce en la parte superior del acumulador, disminuye la estratificación de temperaturas en el acumulador ya que tiene lugar una mezcla en la parte superior del acumulador entre el agua más caliente previamente almacenada y el agua de menor temperatura que se introduce en esta región.

Para evitar situaciones como la descrita anteriormente y aumentar la estratificación alcanzada en el sistema de acumulación de una instalación solar se recomienda tomar las siguientes medidas:

1) Emplear acumuladores de configuración vertical.
2) Incorporar dispositivos (deflectores, tubos difusores, etc.) en las tuberías de entrada al acumulador que reduzcan la velocidad de entrada del agua.

3) Situar correctamente las tuberías de conexión. En este sentido se recomienda que:

- la tubería de entrada de agua fría descargue al acumulador por la parte inferior del mismo. Con esto se consigue además de mejorar la estratificación de temperaturas aumentar el volumen útil del acumulador que participa en los procesos de carga y descarga térmica.
- la tubería de salida al consumo tome el agua de la parte superior del acumulador.
- la disposición de las diversas tuberías de entrada y de salida facilite el proceso de calentamiento en todo el acumulador. Para ello se han de emplear sistemas de carga térmica al acumulador que permitan que el agua caliente, procedente de los captadores solares o de un intercambiador exterior, se introduzca a la cota que le corresponda en función de su temperatura (Figura 2.24). También la tubería de ida hacia estos componentes (captadores o intercambiador) debe tomar el agua de la parte inferior del acumulador.

i) Tipos y configuraciones.

Básicamente los acumuladores de las instalaciones solares son similares a los empleados en las instalaciones térmicas convencionales: *acumuladores de inercia* en los circuitos cerrados y *convencionales de producción de agua caliente sanitaria* en los circuitos de consumo.

En la siguiente figura se muestran ejemplos de acumuladores directos e indirectos (interacumuladores).

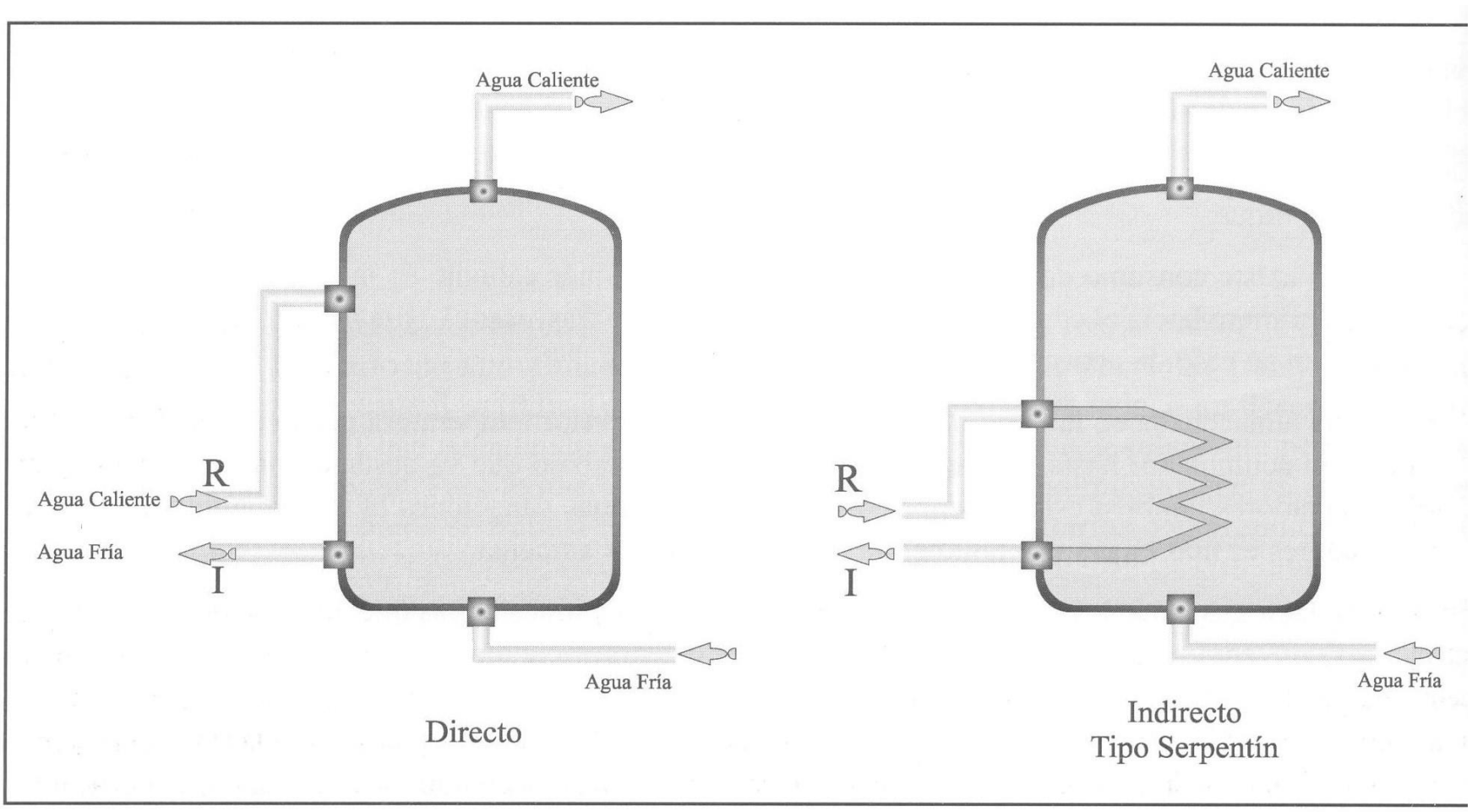


Figura 2.22: Acumuladores directos e indirectos.

Es siempre recomendable utilizar acumuladores esbeltos, es decir con un valor alto de la relación *altura/diámetro*, ya que favorecen la estratificación de temperaturas. Sin embargo, al aumentar esta relación *altura/diámetro* aumentan las pérdidas térmicas en el acumulador por lo que el cociente seleccionado debe ser el resultado de la solución de compromiso entre estos dos aspectos.

ii) Conexiones

Como en cualquier instalación convencional de producción de agua caliente sanitaria la tubería de entrada de agua fría debe descargar en la parte inferior del acumulador y la tubería de salida de agua caliente debe tomar el agua de la parte más alta del acumulador.

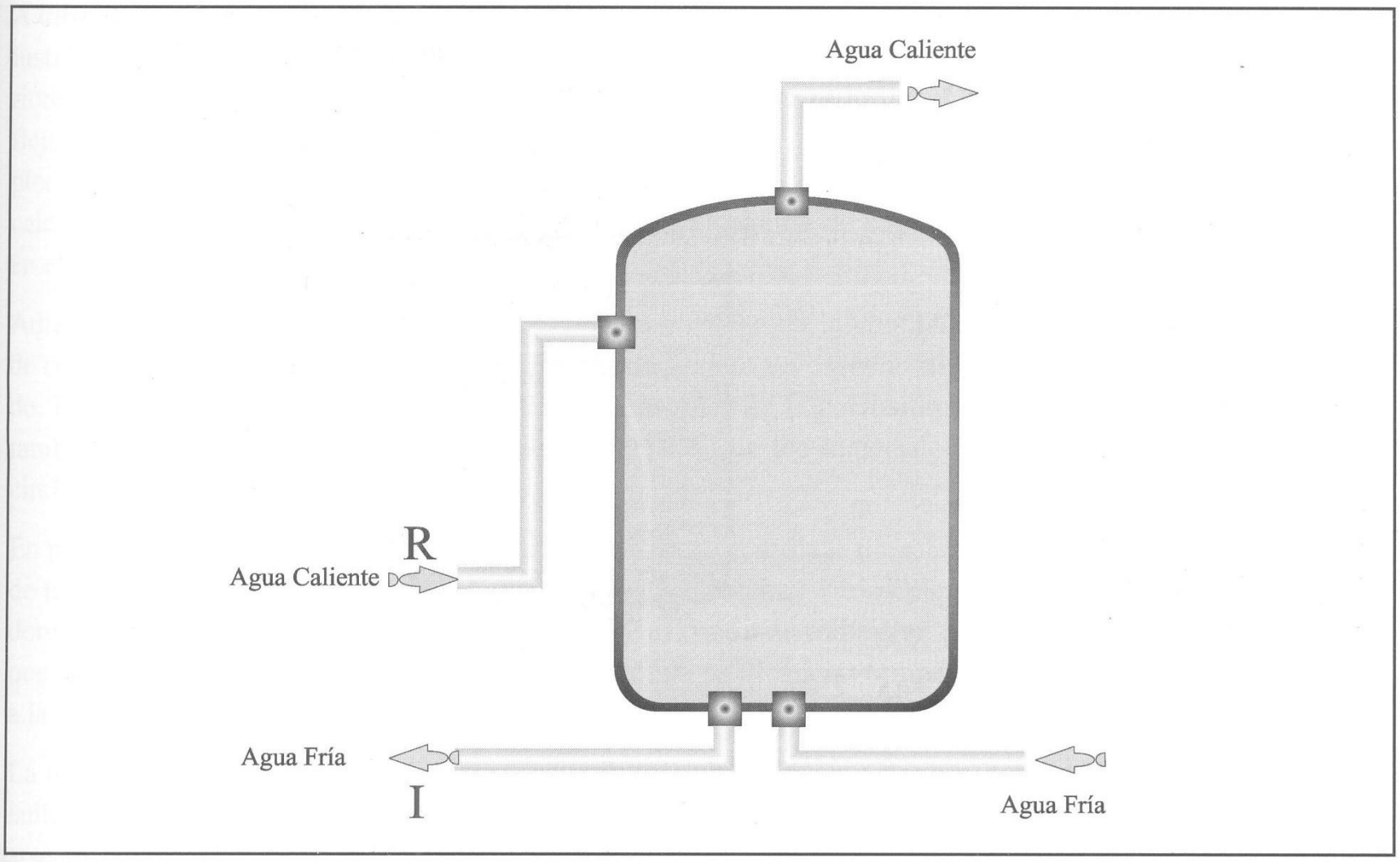


Figura 2.23: Situación tuberías de conexión en acumulador directo.

En los acumuladores directos la tubería de ida (I) hacia el sistema de captación o hacia un intercambiador exterior debe tomar el agua de la parte inferior. A medida que aumenta la cota de esta tubería aumenta el volumen de la región "inactiva" o parte del acumulador que a efectos de funcionamiento de la instalación solar no participa en el proceso de carga térmica del acumulador; este volumen del acumulador es conocido como volumen muerto o capacidad muerta y sólo es calentado por conducción de calor. Por tanto para aumentar el volumen del acumulador que participa en el proceso de carga térmica (volumen útil) esta tubería de ida ha de tomar el agua de la parte más baja del acumulador.

Tras experimentar un proceso de calentamiento en el captador solar o, en su caso, en el intercambiador exterior el agua caliente de retomo al acumulador (R) puede presentar valores muy diferentes de temperatura debido a que la fuente energética es variable (radiación solar) por lo que, en caso de considerarse solamente que esta tubería permita la entrada de agua caliente por la parte superior (se recomienda entre el 50% y el 75% de la altura del acumulador) y no tomarse algún tipo de medida especial, puede entrar a temperatura inferior a la de la región del acumulador donde se va a producir la descarga del agua de retorno. Por este motivo siempre es recomendable utilizar algún tipo de mecanismo estratificador que permita que el agua caliente de entrada o de retomo (R) pueda descargar a diversas cotas en el acumulador, de forma que entre en la región que le corresponda de acuerdo a su temperatura.

Uno de estos dispositivos estratificadores se esquematiza en la Figura 2.24. La tubería de retorno (R) se encuentra conectada directamente a un tubo situado en el interior del acumulador con una serie de orificios dispuestos a lo largo del tubo a través de los cuales se produce la descarga del agua de la tubería de retorno. Cada uno de estos orificios dispone de elementos que actúan a modo de válvulas de retención de manera que cuando el agua de entrada está más caliente que la del agua que rodea exteriormente este dispositivo y, por tanto, tiene menor densidad y presión, este elemento impide la descarga de agua al acumulador. Sin embargo, cuando se igualan las temperaturas en el interior y en el exterior este elemento permite que el agua de retomo entre en el acumulador en su correspondiente "estrato térmico". De este modo se consigue producir estratificación en el proceso de carga del acumulador, evitar mezclas de agua a muy diferentes temperaturas y disponer siempre del agua más caliente en la parte superior del acumulador.

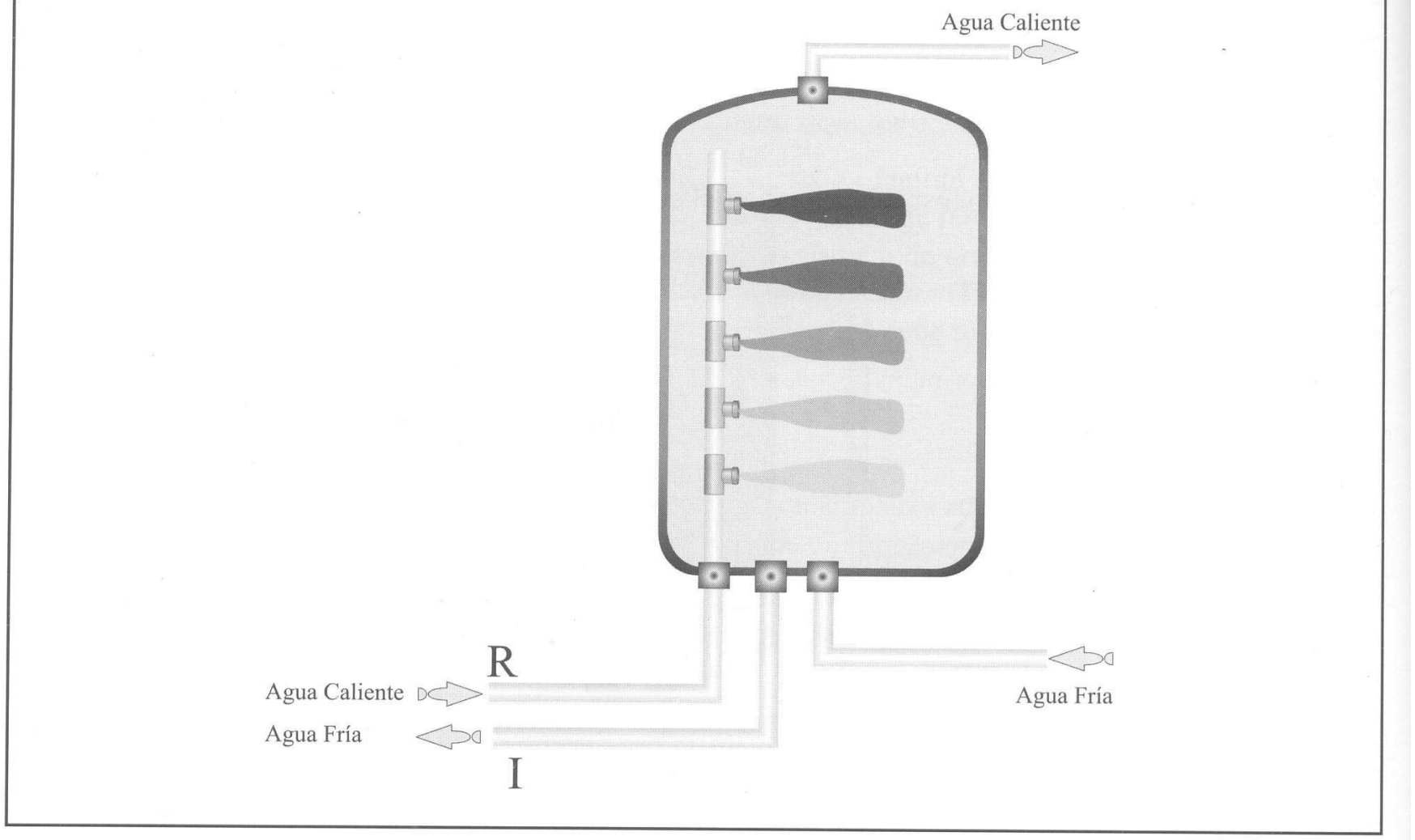


Figura 2.24: Ejemplo de dispositivo estratificador en el interior de un acumulador.

En los interacumuladores la tubería de agua fría de ida (I) también ha de estar situada en la región inferior del acumulador para aumentar el volumen del acumulador que participa en el proceso de carga térmica.

A medida que el intercambiador se sitúa en la parte más inferior del acumulador se optimiza la transferencia de energía en forma de calor al agua contenida en el acumulador ya que se encuentra en contacto con el agua más fría. En este sentido la posición de la tubería de retorno (R) se ha de adaptar a las conexiones del intercambiador que se recomienda situar en la parte más baja posible del acumulador (ver Figura 2.22).

Pérdidas térmicas

Los valores de temperatura en una instalación solar térmica varían continuamente pudiendo llegar a alcanzarse valores elevados en los acumuladores (superiores a 100 ºC). Estos valores dependen de las características de la instalación, localidad, sistema de control, etc. Por tanto los materiales y protecciones interiores empleados en los acumuladores han de seleccionarse considerando los niveles máximos de temperatura que se pueden llegar a alcanzar en ellos.

Para disminuir las pérdidas térmicas ha de cubrirse toda la superficie exterior del acumulador, tuberías y bocas de conexión con material aislante adecuado que, en caso de que el acumulador esté situado al exterior, ha de ser también resistente a la humedad y a la radiación solar, o se ha de colocar sobre él algún tipo de recubrimiento exterior resistente a estos dos factores. También se recomienda emplear acumuladores en los que el cociente entre la superficie exterior y el volumen sea bajo; en este sentido resulta más adecuado el empleo de un único acumulador frente a varios.

2.2.2 Intercambiador de calor

En las instalaciones solares se pueden emplear intercambiadores de calor para aislar e independizar el circuito primario, independizar el circuito de consumo y, en algunas configuraciones, realizar ambas funciones a la vez..

A diferencia de una instalación convencional en la que la temperatura de entrada se encuentra fijada, en una instalación solar esta temperatura varía continuamente y puede llegar a alcanzar valores muy altos (superiores a

150 ºC en los captadores solares). Estos valores alcanzados en el circuito primario pueden tener reflejo en los circuitos secundario y/o terciario donde también se pueden alcanzar valores elevados. El empleo de un intercambiador que separe el circuito primario del agua de consumo limita las deposiciones calcáreas en el circuito primario, especialmente en el sistema de captación, a la cantidad de cal contenida en el volumen de agua que circula por este circuito.

Adicionalmente, la utilización de un intercambiador presenta la ventaja adicional de disminuir los riesgos de corrosión en los circuitos cerrados ya que el contenido de oxígeno disuelto en agua se encuentra limitado. Este oxígeno es uno de los principales responsables de la corrosión en el sistema de captación, si bien también se han de tomar precauciones en la selección de los materiales empleados en el correspondiente circuito.

En particular, la separación del circuito primario permite utilizar mezclas anticongelante-agua como fluido de trabajo en el circuito primario. De esta forma, ya que hay varios elementos situados al exterior (captadores solares, etc.) se puede evitar fácilmente que el fluido de trabajo se congele en el circuito primario aunque la instalación se encuentre en localidades donde se alcancen temperaturas ambientes bajas (inferiores a las de congelación del agua).

La independencia del circuito de consumo evita la contaminación de éste debido al empleo de anticongelantes, utilización de acumuladores u otros materiales no aptos para agua potable, etc. que pueden emplearse en circuitos cerrados de calentamiento (primario, secundario y/o terciario).

Tipos de intercambiadores

Los intercambiadores pueden encontrarse incorporados en el acumulador o ser externos al acumulador (independientes).

El uso de uno u otro tipo está condicionado fundamentalmente por razones técnico-económicas. Como regla general, a medida que aumenta el tamaño de una instalación solar se utilizan con mayor frecuencia los intercambiadores externos (normalmente de placas) ya que aumenta la relación eficiencia/coste de estos. En la actualidad se utilizan habitualmente intercambiadores de placas a partir de volúmenes de acumulación superiores a 1000 litros ya que se reduce porcentualmente el coste extra que implica la utilización de estos intercambiadores: bomba de circulación, etc.

Al seleccionar los intercambiadores se ha de prestar especial atención al rango de presiones y temperaturas de trabajo que se puede alcanzar en los diversos circuitos donde se encuentren instalados. Especial cuidado, debido a que alcanzan temperaturas más elevadas, se ha de tomar en el circuito primario. Algunas de las circunstancias que pueden producirse en caso de superarse las temperaturas y/o presiones de trabajo son alteraciones de las juntas de conexión en intercambiadores de placas, abombamientos en intercambiadores de doble envolvente, etc.

Caracterización del funcionamiento

Las condiciones de diseño a utilizar en el dimensionado deben tener en cuenta que en las instalaciones solares puede variar continuamente la temperatura de entrada a los intercambiadores. Este efecto es especialmente acusado en el intercambiador que independiza el circuito primario debido a que la corriente de entrada al intercambiador procede directamente de los captadores solares que pueden experimentar variaciones rápidas en el valor de la irradiancia incidente sobre los mismos y por tanto en el valor de la temperatura del fluido a la salida de los captadores. Por este motivo los comentarios siguientes están referidos al intercambiador que independiza el circuito primario y en particular a intercambiadores exteriores: -

1. Al dimensionar el intercambiador exterior que independiza el circuito primario se ha de tener en cuenta que este ha de transferir toda la potencia térmica generada en el sistema de captación. En este sentido se considera habitualmente un rango de potencia térmica por m^2 de captador solar comprendido entre 500 y 600 W/m^2.

2. En este dimensionado se han de seleccionar los caudales de los circuitos primario y secundario de forma que las capacidades caloríficas de ambos fluidos ($\dot{m} \cdot C_p$), sean similares en ambos circuitos y, en cualquier caso, nunca sea inferior la capacidad calorífica del circuito primario.
3. Con objeto de disminuir la potencia eléctrica de bombeo se ha de minimizar la pérdida de carga del intercambiador, que debe ser inferior a 2 mca.

El intercambiador que independiza el circuito de consumo no presenta ninguna particularidad especial salvo que en determinados casos el agua procedente del acumulador de inercia pueda encontrarse a valores especialmente altos o bajos. También se recomienda cumplir con las consideraciones 2 y 3 anteriores.

2.2.3 Bomba de circulación

Se emplea en una instalación de circulación forzada para hacer circular el fluido contenido en el circuito primario y, caso de existir, también en el del secundario y/o en el del terciario.

En una instalación solar se pueden alcanzar temperaturas muy elevadas por lo que, especialmente en el circuito primario, la bomba debe instalarse en la zona más fría (tubería de ida hacia los captadores solares en el circuito primario). Incluso en esta tubería se pueden alcanzar picos de temperatura máxima de hasta 130 ºC por lo que deben tomarse las medidas correspondientes para soportarlos, a pesar de que estos picos suelen aparecer con poca frecuencia y se mantienen durante poco tiempo (segundos o escasos minutos).

Por otra parte, debido a la aleatoriedad de la radiación solar las bombas pueden experimentar arranques y paradas frecuentes por lo que han de estar preparadas para responder adecuadamente frente a estas situaciones.

Al ser variable la radiación solar a lo largo del día, y por tanto la fuente energética usada en las instalaciones solares, puede resultar adecuado utilizar bombas de caudal variable siempre que éstas se mantengan funcionando dentro de niveles aceptables de eficiencia. Estas bombas presentan la capacidad de regular y controlar el caudal de circulación variando la velocidad de la bomba por lo que permiten modificar el salto de temperaturas del fluido de trabajo a través del sistema de captación, controlar los saltos térmicos de los fluidos a ambos lados de los intercambiadores externos, etc.

Dada una instalación, al aumentar la pérdida de carga en la misma aumenta el consumo de energía eléctrica de la bomba. Para optimizar el balance energético de una instalación este consumo eléctrico ha de minimizarse por lo que se recomienda tomar medidas encaminadas a reducir la pérdida de carga (utilización de diámetros mayores de tuberías, etc.). En la Figura 1.4 se muestra que el consumo eléctrico normalmente es muy bajo en comparación con la energía térmica aportada por la instalación solar; en particular, para instalaciones mayores de 50 m^2 el consumo de energía eléctrica supone menos del 5% de la energía térmica aportada por la instalación.

La norma UNE ENV 12977 fija el límite máximo de la potencia eléctrica de la bomba del circuito primario inferior al 1 ó 2% (dependiendo del tipo de instalación a medida, grande o pequeña) de la mayor potencia térmica que pueden suministrar los captadores solares. Este valor máximo se obtiene a partir de la Ecuación 2-8, quedando:

$$\boldsymbol{P_{C,max} = \eta_0 \cdot A \cdot G_{ref}} \qquad \textbf{Ecuación 2-9}$$

siendo:

$P_{C,max}$ = potencia térmica máxima (W)

η_0= factor de ganancia o rendimiento óptico del captador

A = área total de los captadores solares (m^2).

G_{ref} = Irradiancia solar de referencia igual a 1000 W/m^2

2.2.4 Vaso de expansión

En las instalaciones solares normalmente se utilizan vasos de expansión cerrados, por lo que el fluido del circuito no se encuentra en comunicación directa con la atmósfera. En estas instalaciones se pueden alcanzar valores de temperatura muy elevados (> 150 ºC en los captadores solares) por lo que, además de instalarse en la parte más fría del circuito primario, se han de emplear vasos con membranas elásticas que trabajen adecuadamente frente al mayor valor de temperatura que se pueda alcanzar en el vaso y, en caso de emplear fluidos anticongelantes utilizar membranas especiales. Se recomienda instalar el vaso de expansión de forma que el fluido de la instalación esté en la parte superior y el gas en la inferior consiguiéndose de esta forma disminuir la temperatura del fluido líquido en contacto con la membrana elástica debido a la estratificación de temperaturas que presenta este líquido; por tanto con esta medida la membrana está en contacto con el líquido más frío. Por este mismo motivo se recomienda que la tubería de conexión (ramal o línea de expansión) entre el circuito y el vaso no se aísle térmicamente. En algunos casos, para evitar temperaturas elevadas en la membrana se intercala en el ramal de expansión un acumulador entre el circuito y el vaso de expansión (ver Figura 2.25).

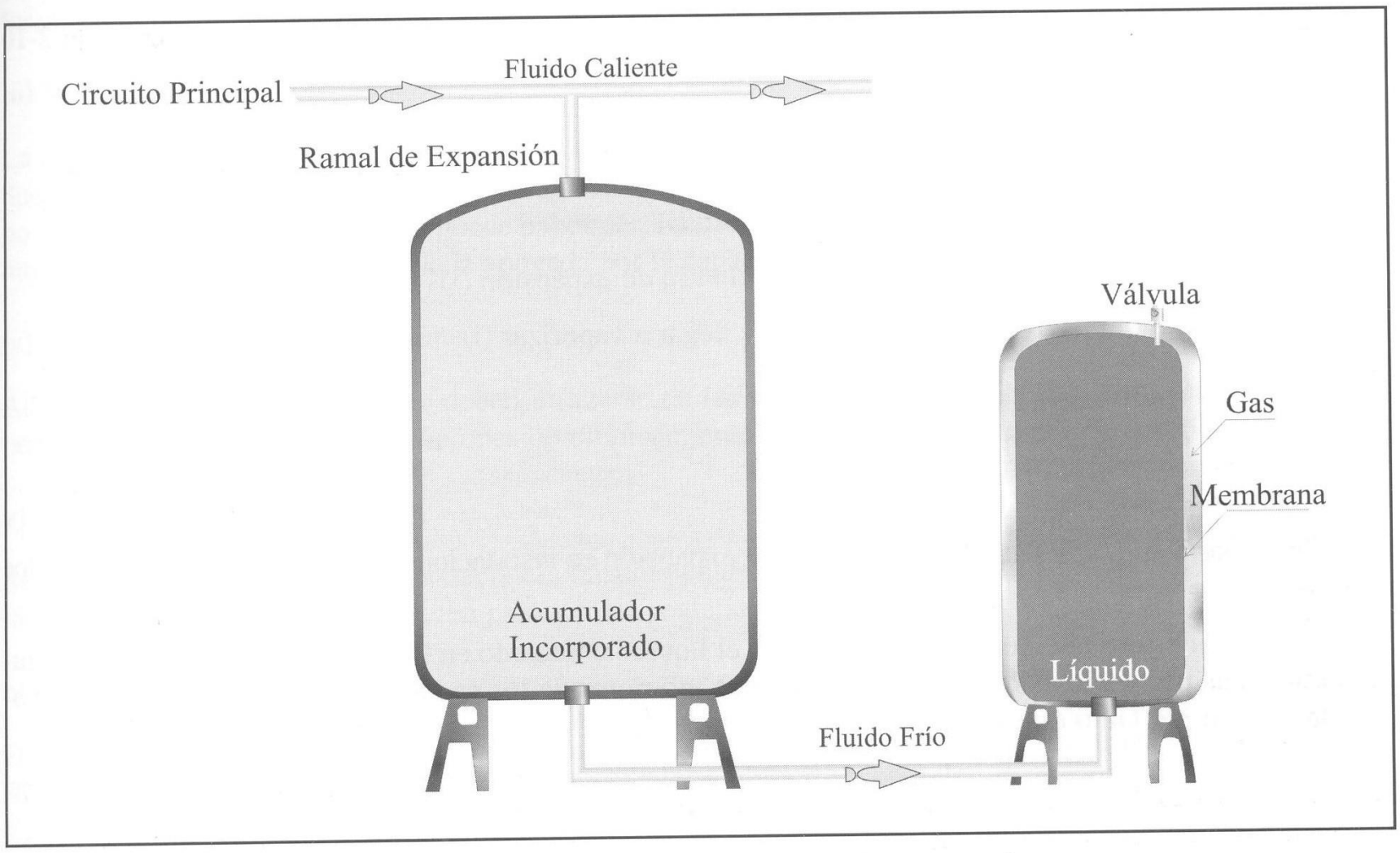


Figura 2.25: Instalación de vaso de expansión con acumulador incorporado.

Para evitar la posible succión de aire en la instalación, el vaso de expansión ha de trabajar a una presión mínima que garantice que la presión en el punto más alto de la instalación sea superior (alrededor de 0,5 bar) a la atmosférica.

Debido a los altos valores de temperatura que se pueden alcanzar en los captadores solares se puede formar vapor en la instalación cuya expansión ha de ser compensada. Por este motivo los vasos de expansión de las instalaciones solares han de tener un volumen útil superior al de las instalaciones convencionales ya que en estas últimas, al limitarse normalmente la temperatura máxima en el sistema de producción convencional a valores relativamente bajos (80-90 ºC), no se genera vapor a las presiones habituales de trabajo.

Se ha de prestar especial atención al fenómeno de formación de vapor en el circuito primario de una instalación solar en caso de emplear fluidos anticongelantes con objeto de evitar la posible fuga del mismo a través de la válvula de seguridad que debe ser repuesta con nuevo fluido anticongelante (con el consiguiente aumento de coste).

Para evitar la formación de vapor se pueden tomar diversas medidas como la de aumentar la presión de trabajo en el circuito. Con esta medida se consigue aumentar la temperatura de ebullición de manera que, dependiendo de la temperatura máxima que se puede alcanzar en captadores y de la presión máxima de trabajo, no se pueda generar vapor en la instalación.

Singularidades de cálculo

Cuando se toman medidas que aseguran que el fluido de trabajo no se evapora en el circuito primario, el cálculo del volumen útil del vaso de expansión se realiza de forma similar al habitualmente empleado en las instalaciones convencionales (ver instrucción UNE 100-155).

Sin embargo, cuando en el circuito primario pueden alcanzarse condiciones en las que se puede producir la vaporización del fluido contenido en los captadores solares el proceso de cálculo del vaso de expansión cerrado ha de tener en cuenta este fenómeno de formación de vapor. En este caso, en el circuito primario se propone realizar el cálculo del vaso de expansión de acuerdo a la siguiente expresión (Hausner & Fink, 2002):

$$V_t = \left(V \cdot C_e + V_{min} + V_{vap}\right) \cdot C_p \qquad \textbf{Ecuación 2-10}$$

siendo:

$\mathbf{V_t}$ Volumen total del vaso de expansión (l)

$\mathbf{V}$ Contenido total del fluido de trabajo en el circuito (l)

$\mathbf{V_{min}}$ Contenido mínimo del fluido de trabajo en el vaso de expansión (l)

$\mathbf{V_{vap}}$ Contenido de fluido en el circuito que puede llegar a vaporizar (l)

$\mathbf{C_e}$ Coeficiente de expansión o dilatación del fluido

$\mathbf{C_p}$ Coeficiente de presión

Las diferencias respecto al cálculo de los vasos de expansión en instalaciones convencionales radican en los términos $\mathbf{V_{vap}}$ y $\mathbf{V_{min}}$.

En las instalaciones solares se considera que todo el líquido contenido en los captadores solares y en las tuberías situadas por encima de la menor de las cotas inferiores de los captadores solares puede llegar a vaporizar, siendo por tanto este valor V_{vap}.

El término V_{min} corresponde al volumen de líquido mínimo que ha de contener el vaso de expansión en las condiciones de mínima temperatura en la instalación para evitar posibles succiones de aire.

2.2.5 Otros componentes hidráulicos

a) Tuberías y aislamientos

Debido a los altos niveles de presiones y temperaturas que se pueden alcanzar en una instalación solar se recomienda utilizar tuberías y elementos de conexión metálicos en el circuito primario. Estas tuberías y accesorios de conexión han de ser compatibles con el resto de elementos que constituyen la instalación solar y con el tipo de fluido empleado, resistentes a la corrosión, presentar buena estabilidad térmica y mecánica, etc.

La singularidad más evidente de los materiales aislantes radica en que, debido a que en muchos casos se encuentran situados en tramos exteriores, han de comportarse adecuadamente frente a la radiación solar, humedad, corrosión y han de ser resistentes a las acciones de la fauna (pájaros, roedores, etc.). En este último caso es especialmente recomendable la utilización de elementos de protección (chapa de aluminio, etc.).

b) Válvulas

Habitualmente se utilizan las mismas válvulas empleadas en las instalaciones térmicas convencionales (ver DTIE 4.01) si bien debe prestarse especial atención a su comportamiento frente a las temperaturas y presiones máximas de trabajo y a su protección respecto del ambiente exterior (efecto de la radiación, humedad, etc.).

A continuación se describen algunas singularidades en el empleo de válvulas en las instalaciones solares:

i) Válvulas de corte

En el campo de captadores se utilizan para poder independizar las agrupaciones de baterías que se hayan establecido facilitando la realización de operaciones de mantenimiento.

ii) Válvulas de regulación

Son de especial aplicación para regular el caudal de circulación del fluido de los distintos ramales, circuitos, etc.

iii) Válvulas de retención

La aplicación singular en las instalaciones solares es para evitar los flujos inversos no deseados que se producen, cuando las configuraciones de los circuitos lo permiten, entre acumulador y captadores. En caso de no tomar precauciones adecuadas puede haber pérdidas térmicas significativas producidas por un efecto termosifón del agua caliente acumulada apoyada por la capacidad de enfriamiento nocturno de los captadores.

iv) Válvulas de seguridad

Además de en los acumuladores, deben utilizarse en las agrupaciones de captadores que se puedan independizar donde se alcanzan condiciones de estancamiento y, habitualmente, se produce vapor.

v) Válvulas termostáticas

Se utilizan en la tubería de salida hacia el consumo cuando no se limita la temperatura del acumulador de las instalaciones solares y se quieren proteger los materiales y/o los usuarios.

c) Sistemas de purga de aire

Dadas las condiciones de diseño de los campos de captadores, habitualmente, los trazados hidráulicos se realizan con sifones invertidos que pueden retener bolsas de aire por lo que se hace necesario realizar la purga de aire de la instalación.

Las propias salidas de baterías suelen ser puntos altos de los circuitos que han de ser purgados. En estos casos, los sistemas de purga deben ser resistentes a las máximas temperaturas que se puedan alcanzar en los circuitos donde pueden llegar a estar expuestos a temperaturas superiores a 150 °C.

Hasta hace relativamente poco tiempo se han utilizado purgadores normales empleados en los sistemas de calefacción que han dado gran cantidad de problemas y resultados negativos debido a su incapacidad de soportar los niveles de temperatura alcanzados en las instalaciones solares. Sin embargo, en la actualidad existen purgadores expresamente diseñados para las instalaciones solares que están dando mejores resultados.

Las líneas de purga han de colocarse de forma que no se pueda acumular fluido de trabajo en estas.

d) Sistema de llenado

Los sistemas cerrados deben incorporar un sistema de llenado, manual o automático, que permita llenar el circuito y mantenerlo presurizado en caso de pérdidas. Debido a que algunos componentes (captadores solares, etc.) se encuentran situados al exterior, en muchas ocasiones el fluido utilizado en el circuito primario es una mezcla de agua con anticongelantes por lo que si se producen fugas en este circuito deben ser repuestas con la misma concentración

de anticongelante en la mezcla. En caso de utilizar agua con anticongelantes se recomienda incorporar un sistema de llenado manual o un sistema automático conectado a un acumulador que contiene el fluido requerido.

Para evitar la formación de bolsas de aire durante la operación de llenado y facilitar la salida del aire al exterior se recomienda realizar el llenado por la parte inferior del circuito evitando los choques térmicos.

2.2.6 Sistemas de control

a) Control diferencial

Se utiliza en las instalaciones solares para controlar el proceso de calentamiento del sistema de acumulación y, en determinadas configuraciones, el proceso de descarga térmica del sistema de acumulación; las estrategias de funcionamiento se describen en el apartado 1.4.

En su modalidad básica dispone de dos entradas y de una salida. Funciona en base a la diferencia de dos señales de entrada correspondientes a dos sensores de temperatura que transmiten estas señales al circuito electrónico correspondiente del regulador. La salida es un relé de contacto que activa o desactiva el funcionamiento de la bomba de circulación.

b) Termostatos

En las instalaciones solares destacan las siguientes funciones relativas al control de temperaturas:

- **Sistema de protección frente a heladas:** Consiste en activar la bomba del circuito primario cuando la temperatura a la salida de captadores es inferior a la de consigna previamente establecida. Esta temperatura de consigna es normalmente 3 ºC superior a la temperatura de congelación del fluido de trabajo.
- **Limitador de temperatura máxima en acumulador:** Mediante esta función se detiene el proceso de carga térmica del acumulador cuando se alcanza la temperatura máxima que puede soportar el acumulador, evitándose por tanto el posible deterioro de los materiales debido a excesos de temperatura.

c) Otros controles

Entre las diversas funciones adicionales que los sistemas de control de las instalaciones solares presentan actualmente se encuentran el control de varios circuitos y/o componentes a la vez, la refrigeración de captadores solares, etc. Determinados fabricantes han incorporado estas funciones al control diferencial y, con ello, desarrollado y comercializado componentes específicos de instalaciones solares.

2.2.7 Sistema de energía de apoyo.

Los sistemas de producción de agua caliente sanitaria empleados como sistemas de apoyo en las instalaciones solares tienen que cumplir, de forma resumida, las siguientes condiciones para aprovechar adecuadamente las prestaciones energéticas aportadas por la instalación solar:

- admitir agua caliente en la entrada
- disponer de regulación de la temperatura de salida

Los sistemas de apoyo utilizados suelen ser instantáneos o con acumulación. En estos últimos, con anterioridad a que tenga lugar el consumo de agua caliente, se prepara una determinada cantidad de agua que se almacena en un acumulador desde el que se distribuye el agua caliente al consumo.

A efectos energéticos, los factores que más influyen en el comportamiento de un sistema con acumulación son el correcto dimensionado del mismo, la temperatura de preparación, el nivel de aislamiento y el nivel de estratificación de temperaturas alcanzado.

3 CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO

En este capítulo se describen aquellas características de funcionamiento de las instalaciones solares que definen aspectos tecnológicos diferentes en relación con el resto de instalaciones térmicas de la edificación. Se tratan las temperaturas y presiones de trabajo afectadas, como elemento diferenciador, por la variabilidad de la fuente de energía así como los efectos secundarios que pueden generar las condiciones extremas: heladas, sobrecalentamientos y producción de vapor.

3.1 TEMPERATURAS

Para establecer las especificaciones de diseño de los componentes de las instalaciones solares debe conocerse todo el rango de temperaturas en el que la instalación pueda trabajar y es necesario conocer todas las situaciones que se pueden encontrar a lo largo de la vida útil de la instalación.

Se analizan las distintas temperaturas de trabajo que se pueden establecer en una instalación solar térmica, introduciendo además de las producidas en el "funcionamiento normal" de la instalación, aquellas otras que se alcanzan durante el montaje, la puesta en funcionamiento, en condiciones climáticas extremas, por reducciones o interrupciones del consumo de agua caliente, o por incidencias durante el funcionamiento (cortes de suministro eléctrico, vaciados de circuitos, etc.).

a) Temperaturas de trabajo en funcionamiento normal

Se considera funcionamiento normal a las condiciones que se producen cuando la instalación sigue las estrategias de funcionamiento con las que se diseñaron los procesos de calentamiento y de consumo de agua. Debe establecerse, no obstante, la diferencia entre las condiciones de diseño, o como se pretende que funcione la instalación, y las condiciones reales de funcionamiento.

En el diseño normalmente se define y se evalúa un proceso de funcionamiento normalizado que trabaja con valores de temperatura muy estabilizados. Estos valores determinan las condiciones de funcionamiento más favorables y por tanto las máximas prestaciones previstas. Definen, por tanto, el objetivo energético perseguido que suele ser el máximo aporte solar.

En relación con las temperaturas, este máximo efecto útil puede conseguirse con un gran volumen o caudal con una pequeña diferencia de temperatura o, por contra, con un pequeño volumen o caudal con un gran salto de temperatura; el rango de situaciones intermedias que se pueda plantear es muy elevado. Adicionalmente, las estrategias de funcionamiento pueden realizarse manteniendo caudales constantes y temperaturas variables o caudales variables y temperaturas constantes. A priori, cualquiera de las opciones puede ser válida, pero cada una de ellas tiene implicaciones distintas en el diseño y funcionamiento de la instalación.

Es interesante significar la importancia de las temperaturas de trabajo y no sólo de los saltos de temperaturas; aspecto que afecta al funcionamiento tanto de captadores como de acumuladores y de otros componentes.

Existen, como ejemplo, distintas opciones de funcionamiento que se pueden plantear para producir agua caliente sanitaria a 50 ºC: se puede realizar con calidades distintas de sistemas de captación, de intercambiadores (más o menos eficientes) y acumuladores (mezclados y estratificados); se puede realizar a diversas temperaturas de trabajo (captadores funcionando a 60, 80 y 100 ºC); se pueden modificar los saltos y los caudales, etc.

La evaluación de las condiciones de funcionamiento de las distintas posibilidades previstas permite definir una estrategia para optimizar el comportamiento energético de la instalación.

Con ciertas precauciones por los matices que encierra la igualdad de condiciones, para una instalación determinada, a igualdad del resto de condiciones, mientras más bajas sean las temperaturas de funcionamiento, mayor será el rendimiento de la instalación.

Las muy altas temperaturas con las que todavía se siguen impresionando a algunos clientes y usuarios corresponden a situaciones de rendimiento muy bajo (incluso nulo), por lo que prácticamente no. tienen ningún valor a los efectos de energía útil aportada por la instalación solar.

b) Temperaturas máximas de trabajo

Las temperaturas máximas que se pueden alcanzar en una instalación varían dependiendo de la parte de circuito considerada. Es importante conocer la distribución de temperaturas máximas a lo largo de todo el circuito de forma que se puedan establecer claramente los límites de funcionamiento. Para ello deben realizarse todas las hipótesis de funcionamiento y examinar la evolución de temperaturas en todos los circuitos.

Las temperaturas máximas siempre se producen en una instalación solar a través del captador que es el intercambiador de calor que transforma la radiación solar en energía térmica. Las temperaturas máximas en una instalación solar se presentan cuando la potencia de entrada es máxima y la de salida mínima por lo que se alcanzan habitualmente durante los periodos de bajo o nulo consumo de agua caliente y de elevada radiación solar. Esta situación es más frecuente de lo que se puede pensar ya que cuando mayor es la irradiación solar (en el verano, con valores diarios de 27-28 MJ/m^2 en Andalucía) es cuando los usuarios se van de vacaciones veraniegas y, por tanto, no hay consumo.

Se denomina temperatura de estancamiento de un captador solar a la que alcanza cuando, expuesto a unas determinadas condiciones de irradiancia incidente y de temperatura ambiente, a su través no circula el fluido contenido en el mismo. De acuerdo a la norma UNE 12975-1:2001, la temperatura de estancamiento debe estar referida a una irradiancia incidente de 1000 W/m^2 y a una temperatura ambiente de 30 ºC. La temperatura de estancamiento es una característica intrínseca del captador y se puede deducir de la curva de rendimiento ya que al ir aumentando la temperatura, aumentan las pérdidas térmicas, hasta que se alcanza un equilibrio con rendimiento nulo.

La temperatura máxima de una instalación solar, que puede ser distinta a la de estancamiento de captadores, se produce para las condiciones extremas de funcionamiento de la instalación y depende de las condiciones climáticas locales. Esta temperatura máxima se alcanza en condiciones de máxima irradiancia incidente (que puede llegar a ser de 1200 W/m^2) y de máxima temperatura ambiente (del orden de 45 ºC) cuando por el sistema de captación no circula fluido de trabajo. Evidentemente esta temperatura máxima se alcanza en los captadores solares.

En relación con las temperaturas máximas en el circuito primario hay otros aspectos importantes que se deben considerar:

- el primero es que, si la bomba no funciona, la función de pérdidas térmicas en los componentes cercanos al captador solar básicamente sólo depende del captador. Por tanto, estos componentes cercanos (elementos de interconexión, sistemas de purga, tuberías y aislamiento) deben soportar la temperatura máxima del captador.
- el segundo, es que si la bomba funciona, en la función de pérdidas intervienen todas las pérdidas de tuberías y del resto de componentes, siendo las temperaturas máximas en los componentes del circuito primario alejados del captador (por ejemplo, intercambiador y bombas) inferiores a las máximas del captador.
- el tercero es que, mientras mayor es el campo de captadores la proporción de pérdidas térmicas en tuberías es menor y, por tanto, aumenta la temperatura máxima en el resto de componentes del circuito primario (a excepción de los captadores solares).

- el cuarto es que la inercia del circuito primario, que incluye tanto a captadores como al resto de componentes del circuito, puede afectar a las temperaturas máximas por la puesta en funcionamiento.

En relación con las temperaturas máximas en el circuito secundario, se pueden realizar consideraciones similares a las anteriores teniendo en cuenta que todo se origina desde el intercambiador en lugar del captador. Los efectos de circulación o no del fluido, de distancias y longitudes de tuberías e inercias de circuito son parecidos a los anteriormente descritos. Debe destacarse que en el circuito donde esté el acumulador la inercia siempre va a ser importante.

Como resumen, a efectos de diseño la temperatura máxima se puede establecer:

Circuito primario:

- En captadores y entorno: estado de estancamiento en condiciones climáticas extremas (irradiancia incidente de 1200 W/m^2 y temperatura ambiente en torno a 45 ºC).
- En el resto del circuito primario: algo inferior a la temperatura máxima en captadores y entorno una vez deducidas las pérdidas térmicas del circuito.

Circuito secundario:

- En intercambiador y entorno: la propia temperatura máxima del resto del circuito primario.
- En el resto del circuito secundario: algo inferior a la temperatura máxima en intercambiador y entorno una vez deducidas las pérdidas térmicas de este circuito secundario.

c) Temperaturas mínimas de trabajo

Las temperaturas mínimas que se alcanzan en una instalación solar dependen del efecto de la temperatura ambiente sobre los elementos expuestos al exterior (campo de captadores) incrementado, además, por el efecto de enfriamiento radiante que experimenta el captador solar sobre todo por la noche. Este último efecto, más importante en noches claras que cuando hay nubes, produce que en el campo de captadores se puedan alcanzar temperaturas inferiores a las temperaturas ambientes mínimas.

Por tanto, como temperatura mínima de diseño debe utilizarse un valor inferior a la temperatura ambiente mínima histórica que se haya alcanzado en la localidad.

Las temperaturas mínimas que se alcanzan en las instalaciones afectan, fundamentalmente, a los captadores y al resto de elementos hidráulicos cercanos y expuestos al exterior (elementos de interconexión, purgadores, desagües, etc.).

3.2 PRESIONES

Presiones de funcionamiento

De manera similar a las temperaturas, para conocer el rango de presiones en que la instalación puede trabajar, es necesario conocer todas las situaciones que se pueden encontrar a lo largo de la vida útil de la instalación.

Presiones máximas

La vaporización rápida de fluido que puede tener lugar en captadores sometidos a altos niveles de irradiancia durante periodos de estancamiento, genera picos de presión, producidos por las altas velocidades del vapor o del líquido, que llegan a sobrepasar significativamente la presión de tarado de la válvula de seguridad. En este sentido deben tomarse medidas que eviten esta situación: dimensionado adecuado del sistema de expansión, etc.

Presiones mínimas

La presión mínima de funcionamiento en cada circuito debe garantizar que se evite la entrada de aire en cualquiera de los circuitos.

3.3 TEMPERATURAS Y PRESIONES DE DISEÑO

Como regla general se deben disponer los medios necesarios en las instalaciones para que las temperaturas y las presiones no alcancen valores perjudiciales para los materiales de la misma, para la durabilidad de los circuitos o para la seguridad de los propios usuarios.

Es importante reseñar la diferente fiabilidad del diseño producido cuando la resistencia a condiciones extremas se trata como una característica intrínseca del diseño térmico e hidráulico de la instalación a cuando se confía a otros dispositivos electrónicos, eléctricos o mecánicos. Sirvan como ejemplos de esta diferencia aquellos posibles casos de heladas, que utilizan como sistema de protección antiheladas la recirculación del fluido con la bomba del circuito primario, que pueden ocurrir simultáneamente con un corte en el suministro eléctrico o los casos de instalaciones protegidas de temperaturas máximas mediante la desactivación de una bomba, cuando la misma puede quedarse continuamente en funcionamiento por cualquier fallo humano (posición manual de actuador) o eléctrico (contacto o relé de actuación cogido).

a) Temperaturas y presiones que deben soportar los materiales

Todos los componentes y materiales de la instalación deben soportar adecuadamente las máximas temperaturas y presiones de trabajo que puedan alcanzarse de forma que no sea necesario la adopción de medidas especiales para que la instalación vuelva a la situación original.

i) Captador

El captador solar ha de comportarse adecuadamente en todo el rango de presiones y temperaturas de trabajo. Especial atención se ha de prestar a las condiciones de máxima temperatura en el captador de manera que para este valor no aparezcan fallos ni en el captador ni en los distintos elementos situados en su entorno (sistemas de purga, tuberías, válvulas, etc.).

Las temperaturas mínimas no deben plantear problemas en los circuitos con anticongelante con un adecuado mantenimiento. También hay que cuidar los circuitos de desagüe que puedan retener agua o fluido.

ii) Acumulador

Respecto a la temperatura máxima del acumulador solar se ha de diferenciar entre las instalaciones de circulación forzada y las de circulación por termosifón.

En las primeras es posible controlar fácilmente la temperatura máxima en el acumulador mediante el empleo de un sensor de temperatura en el mismo. Este sensor se encuentra conectado al sistema de control y actúa como limitador de temperatura en el acumulador. Cuando el sensor detecta que se alcanza en el acumulador la temperatura máxima previamente consignada, el sistema de control desactiva la bomba de circulación impidiendo, por tanto, que se supere dicha temperatura en el acumulador.

En las instalaciones de circulación por termosifón no se puede limitar mediante el sistema anterior la temperatura máxima en el acumulador. En este caso, el diseño de la instalación ha de asegurar que el acumulador soporte la máxima temperatura a la que pueda entrar el fluido de trabajo en el mismo: empleo de acumuladores de acero vitrificado, etc.

iii) Componentes hidráulicos

Deben soportar las máximas temperaturas a las que se encuentren expuestos. Los elementos cercanos a los captadores solares (los elementos de purga, las tuberías y su aislamiento y las válvulas cercanas a captadores) han de comportarse adecuadamente frente a la máxima temperatura de los captadores.

b) Temperaturas para proteger de quemaduras

Aunque el circuito de consumo pueda soportar temperaturas superiores a 60 ºC, cuando esto pueda ocurrir deben adoptarse medidas destinadas a limitar la máxima temperatura en este circuito: mecanismos de mezcla de agua caliente con agua más fría, etc.

De esta forma, se evita que se alcancen temperaturas excesivamente altas en los puntos de consumo que pudiesen producir quemaduras a los usuarios y, además se reducen las pérdidas térmicas en el circuito de distribución a los puntos de consumo.

3.4 SISTEMAS ANTIHELADAS

Cuando se alcanzan temperaturas inferiores a la de congelación del fluido de trabajo de una instalación solar térmica, este fluido para alcanzar el equilibrio térmico con el ambiente que le rodea, disminuye su temperatura y experimenta un cambio de fase de estado líquido a estado sólido. Este proceso de cambio de fase se produce de forma gradual y depende fundamentalmente de la diferencia de temperaturas entre el ambiente y el fluido y de la relación superficie/volumen del fluido en contacto con el ambiente.

Cuando se utiliza agua como fluido de trabajo y la temperatura ambiente es menor de 4 ºC se produce una transferencia de calor del agua al ambiente que puede llevar a la congelación del agua. Al producirse esta congelación el agua aumenta su volumen específico ejerciendo mayor presión sobre las tuberías del circuito. Estas sobrepresiones pueden provocar la deformación y rotura de partes de la instalación solar, normalmente el tubo de la parte inferior de captadores es el primero que se rompe si bien pueden producirse otras situaciones (no aislar, en su caso, el manguito inferior de conexión entre captadores para que se rompa antes que el tubo inferior del captador).

Por todo ello se han de tomar medidas al respecto. Entre los métodos empleados para evitar la congelación del fluido de trabajo se encuentran:

- Instalaciones indirectas con mezclas anticongelantes
- Recirculación del fluido del circuito primario
- Drenaje automático

Las principales características de estos sistemas de protección son:

Instalaciones indirectas con mezclas anticongelantes

Consiste en la utilización como fluido de trabajo de una mezcla de agua con líquido anticongelante cuya temperatura de congelación sea inferior a la temperatura mínima de diseño que se pueda alcanzar en la instalación. El empleo de estas mezclas anticongelantes sólo puede realizarse en las instalaciones indirectas ya que resulta obligatoria la utilización de un intercambiador que impida que el anticongelante se mezcle con el agua de consumo. El porcentaje de anticongelante en la mezcla depende de la temperatura mínima de diseño (mayor porcentaje de anticongelante a medida que la temperatura mínima de diseño sea más baja).

Este sistema antiheladas se caracteriza por su gran fiabilidad si bien requiere la verificación periódica de la composición de la mezcla anticongelante ya que, por motivos de fugas en el circuito repuestas directamente con agua o por degradación del anticongelante, pueden producirse variaciones en las propiedades de la mezcla (disminución de la concentración de anticongelante, etc.).

Recirculación del fluido del circuito primario

Consiste en aprovechar la energía térmica almacenada en el sistema de acumulación para evitar que se produzca la congelación del fluido de trabajo en el circuito primario.

Este método se puede utilizar exclusivamente en las instalaciones de circulación forzada. Cuando el control diferencial de la instalación detecta que la temperatura del fluido de trabajo o la temperatura ambiente es ligeramente superior (≈3 ºC) a la temperatura de congelación de este fluido, activa la bomba de circulación que permite transferir parte de la energía térmica contenida en el sistema de acumulación al fluido de trabajo del circuito primario.

En términos energéticos, la activación de este sistema de protección antiheladas implica disminuir la energía térmica almacenada en el sistema de acumulación y, en menor medida al ser normalmente muy bajo, aumentar el consumo eléctrico de la bomba de circulación. Por estos motivos, sólo se recomienda su empleo en localidades donde existan bajas posibilidades de alcanzar temperaturas inferiores a la de congelación del fluido de trabajo, de forma que los gastos energéticos asociados (térmico y eléctrico) sean compensados tanto con la mayor ganancia energética de la instalación durante su funcionamiento habitual (al no precisar emplear anticongelante) como con el menor coste económico que supone este sistema de protección.

c) Drenaje automático

Este tipo de sistemas previene la congelación del fluido de trabajo mediante el vaciado de las partes del circuito primario de la instalación expuestas a heladas (especialmente los captadores solares) cuando se detecta, normalmente mediante un sensor situado en los captadores solares, una temperatura levemente superior a la de congelación del fluido de trabajo.

Los sistemas habitualmente empleados permiten la recuperación del fluido de trabajo de manera que al detectarse una temperatura cercana a la de congelación del fluido se evacúa el fluido del circuito primario contenido en las partes de la instalación expuestas a heladas hacia un acumulador auxiliar; manteniéndose el circuito vacío hasta que aumenta de nuevo la temperatura en captadores. Al aumentar la temperatura se llena el circuito primario con el mismo fluido de trabajo previamente almacenado en este acumulador auxiliar.

Este sistema antiheladas requiere un sistema de llenado y vaciado de la instalación de alta calidad así como un diseño específico de tuberías suficientemente inclinadas para facilitar la evacuación del agua desde los captadores solares hasta el acumulador auxiliar que, además, ha de estar situado donde no se pueda producir la congelación del fluido almacenado y siempre por debajo de los captadores.

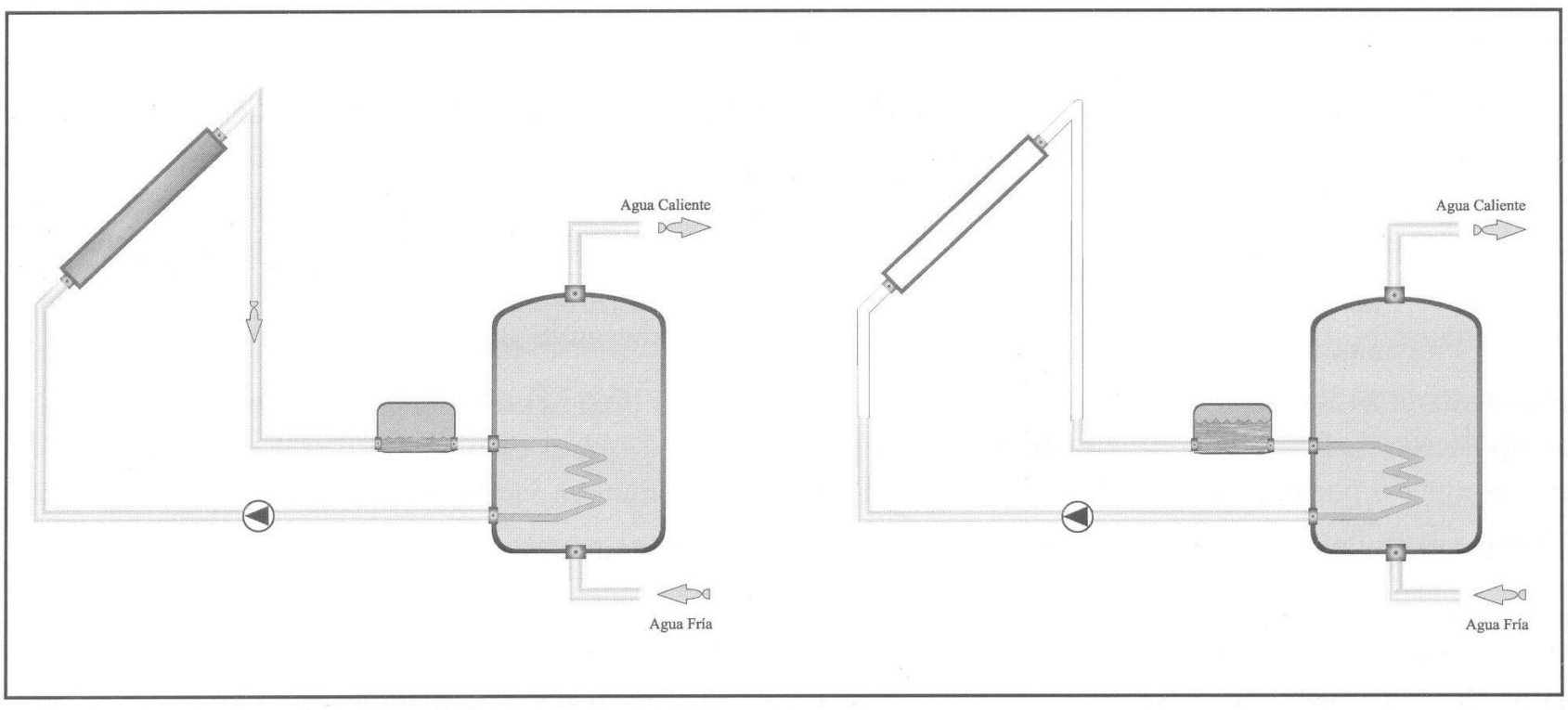


Figura 3.1: Sistema de drenaje automático drainback.

En la Figura 3.1 se representa el principio de funcionamiento del denominado sistema drainback. En este caso cuando la bomba de circulación se encuentra activada el fluido de trabajo circula por los captadores aumentando su temperatura y la energía térmica contenida en el acumulador. Sin embargo, al pararse la bomba el fluido de trabajo es dirigido hacia el acumulador auxiliar donde permanece almacenado hasta que el sistema de control activa de nuevo la bomba. Además de las características genéricas indicadas anteriormente para los sistemas de drenaje, en el sistema drainback la bomba debe permitir que el fluido circule en sentido contrario al habitual cuando se encuentre parada.

Además de servir de protección antiheladas, el sistema drainback puede ser utilizado para evitar que se alcancen temperaturas excesivamente elevadas en los captadores solares. Al alcanzarse en estos la temperatura de consigna por máxima el sistema de control se encarga de parar la bomba la bomba evacuándose el fluido hacia el acumulador auxiliar.

3.5 FLUIDO DE TRABAJO

El empleo de un adecuado fluido de trabajo en el circuito primario de una instalación solar térmica influye de forma significativa en la fiabilidad, durabilidad y prestaciones energéticas de la instalación. Entre los criterios que se han de considerar en la selección de este fluido destacan:

- Calor específico elevado. Un valor alto aumenta las prestaciones energéticas aportadas por la instalación ya que, para la misma cantidad de energía intercambiada, el aumento de temperatura es menor por lo que aumenta el rendimiento energético del sistema de captación al funcionar el sistema a menor temperatura.
- Temperatura de ebullición alta. Interesa un valor alto, especialmente en climas cálidos, para evitar la posible formación de vapor.
- Temperatura de congelación baja. A medida que su valor sea inferior menor será la probabilidad de que el fluido se congele.
- Viscosidad baja. Valores bajos presentan resistencias inferiores a la circulación del fluido.
- Coeficiente de expansión térmica bajo. Valores bajos requieren tamaños inferiores de vasos de expansión que compensen las dilataciones debidas al aumento de temperatura.
- Alta estabilidad en el rango de temperaturas y presiones de trabajo. En particular, el fluido no debe sufrir ningún tipo de degradación a la máxima temperatura que pueda alcanzar en el captador solar.
- Presentar adecuadas propiedades medioambientales (biodegradable, etc.).
- Prevención de deposiciones de sustancias o compuestos sólidos que dificulten la circulación del fluido y/o afecten negativamente a la transferencia de calor.
- Protección frente a la corrosión. Si el circuito primario dispone de materiales propensos a sufrir corrosión provocada por el fluido de trabajo se recomienda añadir elementos inhibidores de la corrosión al mismo.
- Compatibilidad con los materiales de sellado del circuito.
- Bajo coste y alta disponibilidad

Los fluidos de trabajo más utilizados en las instalaciones indirectas son agua y mezclas de agua con líquidos anticongelantes. En caso de emplear este último fluido la instalación obligatoriamente ha de ser de sistema indirecto.

Para aumentar la durabilidad, eficiencia y fiabilidad de la instalación el fluido empleado ha de seleccionarse fundamentalmente teniendo en cuenta los valores de temperatura máxima y mínima alcanzables en la instalación.

a) Agua

Se caracteriza por su alto calor específico (C_p= 4,183 kJ/(kg.K) a 20ºC), baja viscosidad (μ= 1003 kg/(m.s)), nula toxicidad e inflamabilidad, bajo coste y alta disponibilidad. Sin embargo a pesar de estas buenas características presenta los siguientes inconvenientes:

- Valores relativamente bajos de temperatura de ebullición y altos de temperatura de congelación por lo que al utilizarse como fluido de trabajo en una instalación solar, debido a los valores de temperatura de trabajo que se pueden alcanzar en la misma, existe una probabilidad alta de que congele y/o evapore.
- Si la concentración de sales minerales es elevada, éstas se desprenden cuando la temperatura aumenta (> 60 ºC) y se depositan en el interior de las tuberías. Estos depósitos calcáreos reducen las prestaciones energéticas de la instalación (especialmente de los captadores solares) y aumentan la pérdida de carga.
- Si el agua no es neutra (pH=7) resulta conveniente añadir aditivos anticorrosivos para controlar el pH y evitar posibles problemas de corrosión en los elementos metálicos de la instalación.

b) Mezcla de agua con anticongelante

Los glicoles como el etilenglicol y el propilenglicol han sido frecuentemente utilizados como anticongelantes en las instalaciones solares térmicas. En la actualidad se suele emplear propilenglicol no tóxico a pesar de su mayor coste e inferiores propiedades térmicas descartándose el etilenglicol debido a su toxicidad.

Las mezclas de agua con anticongelante se caracterizan por disminuir la temperatura de congelación e incrementar ligeramente la temperatura de ebullición del fluido de trabajo respecto del agua pura. Los valores de las temperaturas de congelación y de ebullición dependen del tipo de anticongelante empleado y del porcentaje del mismo en la mezcla. En la Figura 3.2 se muestra cómo disminuye la temperatura de congelación de una mezcla agua-propilenglicol al aumentar el porcentaje en peso de propilenglicol en la mezcla. El valor de la temperatura de congelación varía con el tiempo si el fluido sufre choques térmicos por lo que se recomienda comprobar este valor cada cierto periodo de tiempo (preferiblemente antes de comenzar la época invernal).

El calor específico de los anticongelantes puros (≈2,5 kJ/(kg.K)) es inferior al del agua. La disminución del calor específico de la mezcla agua-anticongelante depende de la temperatura y del tipo y proporción de anticongelante empleado si bien, salvo en climas muy fríos, esta reducción no afecta significativamente a las prestaciones energéticas aportadas por la instalación solar debido a que no suelen emplearse porcentajes de anticongelante muy elevados (como máximo del 40%).

Estas mezclas son más corrosivas que el agua por lo que en ocasiones resulta necesario emplear aditivos anticorrosivos o inhibidores que se encargan de proteger los elementos que componen la instalación. Normalmente los fluidos anticongelantes habitualmente comercializados ya incorporan estos aditivos anticorrosivos. Se recomienda realizar análisis químicos para determinar la corrosividad del fluido a intervalos regulares de tiempo (cada 3-4 años). Al presentar estas mezclas mayor viscosidad que el agua pura la pérdida de carga en una instalación aumenta al hacerlo la concentración de anticongelante en la mezcla.

El anticongelante que forma parte de la mezcla puede degradarse a altas temperaturas aumentando el poder de corrosión del fluido de trabajo. Al alcanzar el fluido temperaturas cercanas a la de ebullición los inhibidores suelen depositarse sin volver a ser reabsorbidos cuando disminuye la temperatura, formándose depósitos que reducen la transferencia de calor y aceleran la corrosión. Para mantener la efectividad y estabilidad de la mezcla se ha de evaluar periódicamente su composición y realizar las correcciones oportunas en caso de reducción de la proporción de anticongelante

Figura 3.2: Variación de la temperatura de congelación con la proporción de propilenglicol en agua.

4 CÁLCULO

4.1 INTRODUCCIÓN

El cálculo de una instalación solar térmica permite conocer el comportamiento energético de la misma, es decir, determina los valores de las variables formales y de funcionamiento: área de captadores, volumen de acumulación, temperaturas en diferentes componentes o sistemas (captación, acumulación, etc.), caudales en cada circuito, cantidad de energía aportada, etc. Todas las variables que afectan al cálculo de una instalación pueden agruparse en tres grupos de parámetros que definen las bases de cálculo o los datos de partida: parámetros de uso, climáticos y de funcionamiento.

Los parámetros de uso definen el consumo de energía térmica que depende, fundamentalmente, de los caudales de consumo de agua caliente, de la temperatura de entrada de agua fría y de las temperaturas de agua caliente.

Los parámetros climáticos determinan la oferta de energía disponible. Los parámetros de mayor importancia son la radiación solar y la temperatura ambiente aunque también influyen otros factores (velocidad y dirección del viento, etc.).

Los parámetros de funcionamiento caracterizan la instalación solar. El funcionamiento de la instalación depende del número de captadores solares, de las propiedades de estos (curva de rendimiento, área útil de captación, factor de ganancia, coeficiente de pérdidas, etc.), de las características del sistema de acumulación (volumen, aislamiento, situación de las conexiones, etc.), del intercambiador empleado (efectividad, etc.), de los caudales de circulación, del tipo de fluido, de las características del sistema de control, etc.

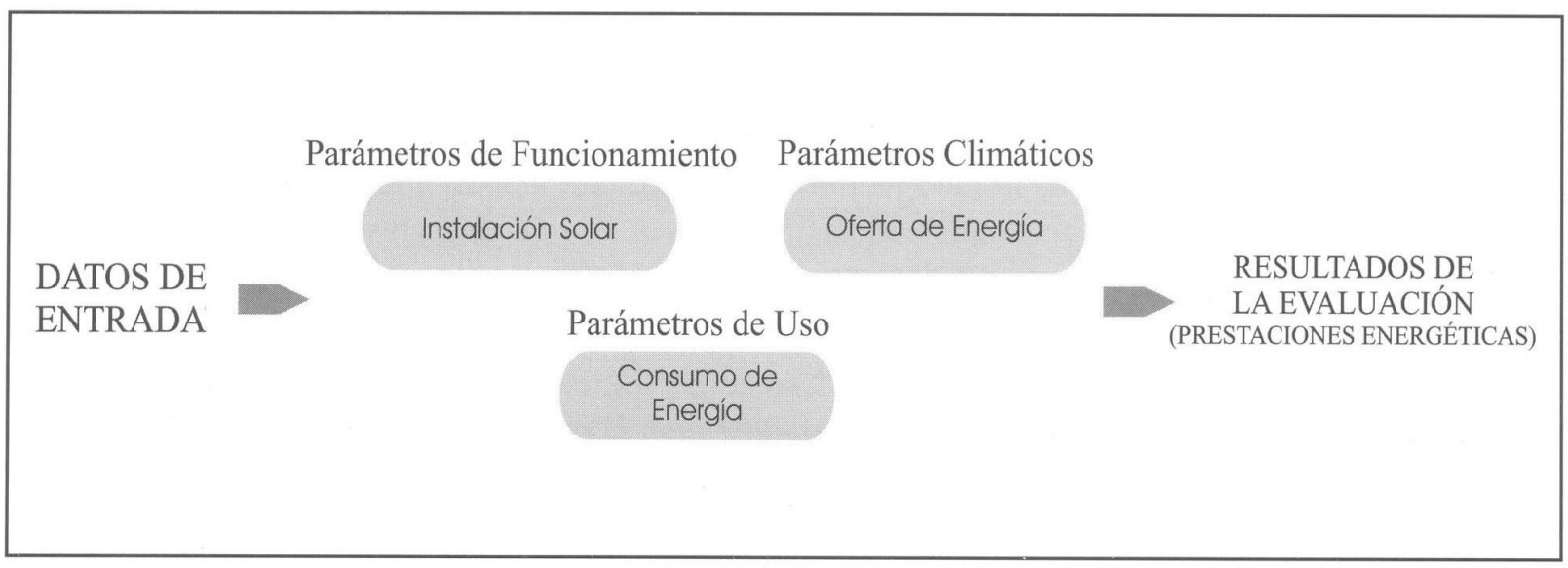


Figura 4.1: Diagrama de bloques de los métodos de cálculo de instalaciones solares térmicas.

4.2 PARÁMETROS DE USO

4.2.1 Demanda de energía térmica

Se define la ***Demanda de energía térmica del agua caliente sanitaria*** **(D_{ACS})** como la cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura de la masa de agua consumida desde la temperatura de entrada de agua fría (T_{AF}) hasta la temperatura de uso (T_{uso}) en los puntos de consumo; se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$D_{ACS} = Q_{ACS}(T_{uso}) \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{uso} - T_{AF}) \qquad \textbf{Ecuación 4-1}$$

siendo:

$Q_{ACS}(T_{uso})'$ consumo de agua caliente a la temperatura de uso T_{uso}.

ρ: densidad del agua.

C_p: calor específico a presión constante del agua.

Para el correcto dimensionado de las instalaciones solares térmicas es necesario realizar una estimación ajustada de los datos de consumo y de las temperaturas que determinan la demanda media diaria de energía térmica, que se examinan a continuación. Se emplean como valores de referencia los valores medios diarios ya que son estos los que se utilizan en la actualidad con mayor frecuencia.

a) Consumo de agua caliente

El consumo de agua caliente sanitaria depende de factores tan diversos como la climatología del lugar, la aplicación considerada (vivienda, hotel, etc.), costumbres sociales, hábitos y actividad de los usuarios, composición familiar, época del año, día de la semana, etc.

Uso del edificio	**Clasificación**	**Consumo unitario** $\left(\frac{l}{persona-día}\right)$
Residencial	Vivienda	40
	Hotel menor o igual a 3 estrellas	60
	Hotel de 4 estrellas	80
	Hotel de 5 estrellas	100
	Camping	30
	Cuartel	40
	Centro penitenciario	40
	Residencia de estudiantes	40
	Residencia de ancianos	60
	Albergue	35
Deportivo	Polideportivo, gimnasio, piscina	30
Docente	Con duchas	30
	Otros usos	6
Sanitario	Hospital, clínica	80
	Ambulatorio, centro de salud	60
Industrial	Vestuarios	30
Restauración	Restaurante	12
	Cafetería	2

Tabla 4.1: Consumos unitarios de agua caliente sanitaria a 45 °C en diversos usos.

En edificios existentes la definición del consumo de agua caliente se puede basar en mediciones realizadas previamente, en el consumo de energía convencional asociada a la producción de agua caliente sanitaria o en datos estadísticos de instalaciones similares; la disponibilidad de datos medidos de diversas fuentes facilita un análisis más pormenorizado de los factores que influyen en el consumo. En cualquier caso ha de tenerse en cuenta la posible evolución de los consumos a largo plazo.

En la práctica, la estimación del consumo de agua caliente generalmente se realiza utilizando valores medios de referencia que atienden al tipo y clasificación del edificio: viviendas, hospitales, residencias, etc. En otras ocasiones, estos valores medios de referencia se basan en los dispositivos de consumo existentes: número de duchas, baños, etc.

Existen diversos datos al respecto en la bibliografía, mostrándose en este documento la Tabla 4.1 que incluye los valores de los consumos unitarios de agua caliente sanitaria a una temperatura de referencia de 45 ºC.

A partir de los consumos unitarios anteriores el consumo total de agua caliente se determina definiendo el número de personas que utilizan las instalaciones que puede definirse bien directamente o estableciendo la capacidad máxima de utilización (definida por el número de plazas en hoteles, de camas en hospitales, etc.) y un porcentaje de ocupación.

En el caso de viviendas el consumo total diario medio de agua caliente sanitaria se obtiene multiplicando el consumo unitario de la Tabla 4.1 por el número de personas totales que ocupan la vivienda.

En edificios de viviendas que dispongan de instalaciones solares térmicas centralizadas, el consumo total diario medio de agua caliente sanitaria se obtiene multiplicando el consumo unitario de la Tabla 4.1 por el número de personas totales que ocupan el edificio de viviendas y por el factor de centralización (FC). El valor del factor de centralización, que depende del número de viviendas (N) alimentadas por la misma instalación solar, se muestra en la Tabla 4.2.

Viviendas	N ≤ 3	4 ≤ N ≤ 10	11≤ N ≤ 20	21 ≤ N ≤ 50	51 ≤ N ≤ 75	76 ≤ N ≤ 100	N ≥ 101
FC	1	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70

Tabla 4.2: Valor del factor de centralización en función del número de viviendas.

Además de los valores medios diarios de consumo debe considerarse su variación a lo largo del año, ya que este es un factor muy importante. La variación estacional del consumo se suele definir por los valores de la ocupación a lo largo del año y es especialmente significativa en aquellos casos en los que no se utilizan las instalaciones durante un cierto periodo de tiempo (hoteles de temporada, colegios, etc.)

Influyen también en las instalaciones las variaciones de la distribución semanal del consumo como por ejemplo las producidas por el cierre de edificios comerciales o industrias durante el fin de semana, centros deportivos, etc.

Es importante considerar que, al igual que los valores medios, la estacionalidad del consumo puede evolucionar con el tiempo.

Otros factores asociados al consumo como el perfil diario, los caudales punta, etc. no afectan normalmente de forma significativa a las prestaciones energéticas aportadas por la instalación.

b) Temperatura de agua fría de entrada

La temperatura del agua fría depende de varios factores: climatología de la localidad, época del año, hora del día, tipo de sistema de abastecimiento, trazado de la red de distribución, etc. y su estimación correcta debe tener en cuenta los calentamientos en la red de distribución, ya que éstos confirman las diferencias que pueden existir entre

los datos reales y los valores aportados por las empresas suministradoras de agua (normalmente correspondientes al centro general de distribución).

Es importante significar que el esfuerzo debe realizarse en definir unos valores suficientemente contrastados y normalizados que faciliten el cálculo de la demanda de energía térmica para producción de agua caliente sanitaria y de las instalaciones solares.

c) Temperatura de agua caliente

Los valores de la Tabla 4.1 corresponden a consumos unitarios de agua caliente a un valor de la temperatura de uso de 45 ºC. Cuando el consumo de agua caliente se asocia a cualquier otro valor de temperatura T, los valores del consumo se determinan de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\mathbf{Q_{ACS}(T) = Q_{ACS}(45)\frac{(45-T_{AF})}{(T-T_{AF})}} \qquad \textbf{Ecuación 4-2}$$

Donde $Q_{ACS}(T)$ es el consumo de agua caliente a la temperatura T.

La ecuación anterior parte de la igualdad de la demanda de energía asociada al consumo de agua caliente a cada temperatura,

$$D_{ACS} = Q_{ACS}(T_{uso}) \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{uso} - T_{AF}) = Q_{ACS}(T) \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T - T_{AF}) \qquad \textbf{Ecuación 4-3}$$

y como en el rango de temperaturas considerado $\rho \cdot c_p \approx$ cte, se obtiene directamente la ecuación 4-2 para una temperatura de uso de 45 ºC.

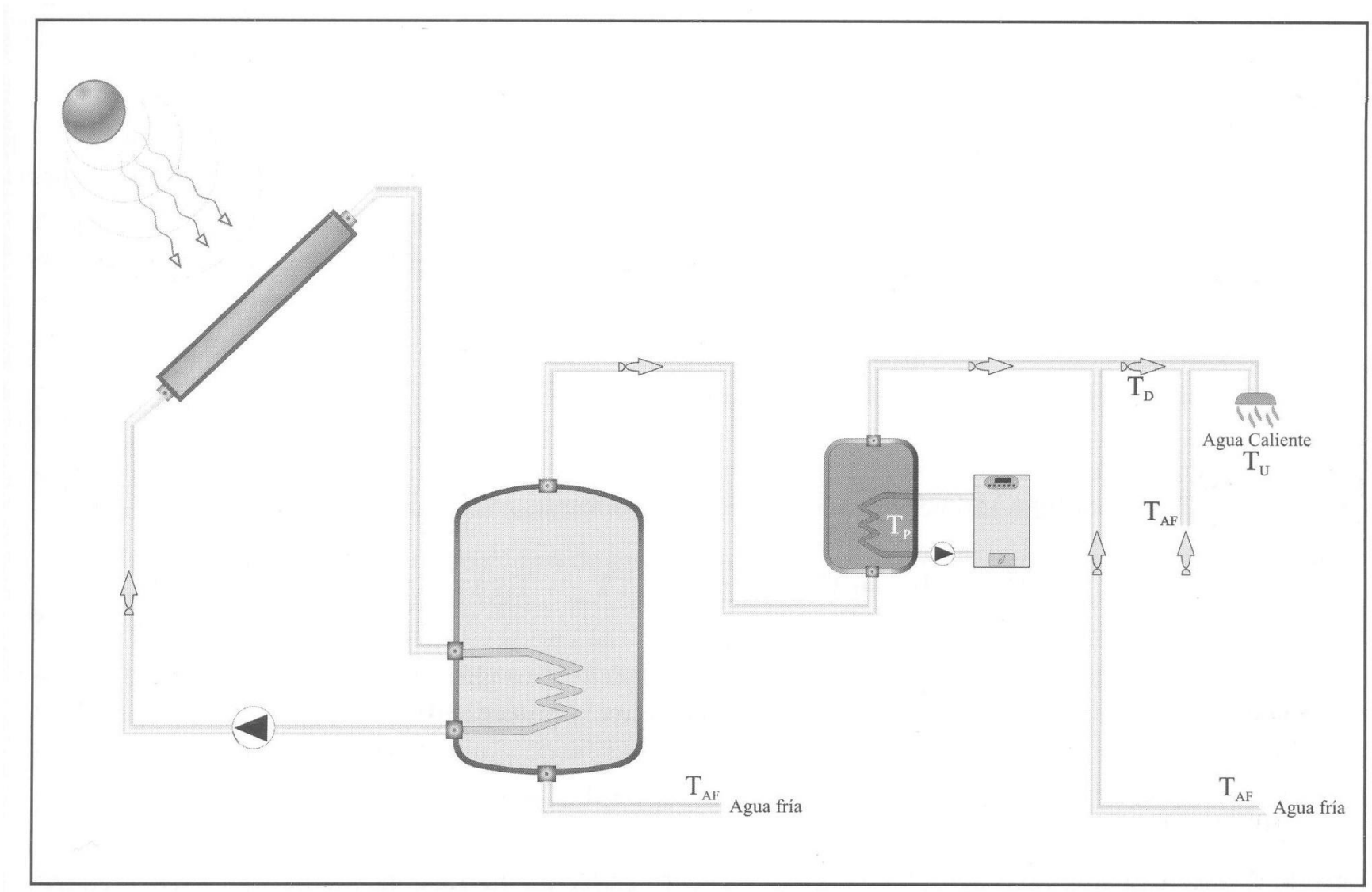


Figura 4.2: Temperaturas de agua fría, preparación, distribución y uso.

Habitualmente se asocia el consumo de agua caliente con la temperatura de uso, si bien también puede considerarse cualquier otro valor como la temperatura de distribución (T_D) o la temperatura de preparación (T_P). En la Figura 4.2 se muestran gráficamente las temperaturas definidas anteriormente en una instalación solar con un sistema de apoyo de agua caliente por acumulación.

El consumo asociado a la temperatura de preparación, salvo en configuraciones especiales, es el que pasa por la instalación solar de precalentamiento. Este caudal es función de la mezcla, a la salida del sistema de apoyo y en el punto de consumo, del agua caliente con agua más fría, y siempre es inferior al caudal de agua caliente en el punto de consumo.

Es muy importante tener en cuenta esta consideración a los efectos de funcionamiento de la instalación solar ya que este caudal es el que evacúa el calor de la instalación solar: para una misma demanda de energía el caudal de preparación se reduce en un 30-35% al pasar de una temperatura de preparación de 45 a 60 ºC. Si disminuye el caudal de agua fría que entra en el acumulador solar, aumenta la temperatura media del acumulador, disminuyendo el rendimiento de captación.

Desde el punto de vista teórico, el agua caliente sanitaria se debe preparar a la mínima temperatura que resulte compatible con su uso. En la realidad, para optimizar el valor de la temperatura de preparación se han de tener en cuenta todos los factores del sistema de preparación, las pérdidas térmicas en la red de distribución, etc. Se remite al lector interesado en ampliar esta información al DTIE 1.01.

Como se ha indicado anteriormente en este documento se ha considerado un valor de la temperatura de referencia próximo a la temperatura de uso (45 ºC), como valor representativo del consumo de agua caliente. De acuerdo con las consideraciones anteriores, la temperatura de referencia adoptada no se debe confundir con la temperatura de preparación de agua caliente en el sistema de apoyo, cuyo valor influye en el rendimiento del sistema de captación.

Este criterio fija el valor de la temperatura de referencia como la menor temperatura del agua caliente en el tramo preparación-distribución-consumo, por lo que permite trabajar con un consumo de agua caliente próximo al consumo real y resalta al mismo tiempo el concepto de que una disminución de la temperatura de preparación, compatible con la normativa en vigor, aumenta el rendimiento de la instalación.

4.2.2 Consumo de energía térmica

Se define el consumo de energía térmica para producción de agua caliente sanitaria (C_{ACS}) como la cantidad de energía empleada en satisfacer la demanda de energía térmica correspondiente. Su valor depende de esta demanda **(D_{ACS})** y del rendimiento (η) del sistema de preparación y distribución de agua caliente, pudiéndose calcular mediante la expresión:

$$C_{ACS} = \frac{D_{ACS}}{\eta} \qquad \textbf{Ecuación 4-4}$$

También se puede calcular el consumo de energía térmica como la suma de la demanda de energía térmica (efecto útil) más las pérdidas térmicas del conjunto del sistema (E_{per}) mediante la siguiente expresión:

$$C_{ACS} = D_{ACS} + E_{per} = Q_{ACS}(T_{uso}) \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{uso} - T_{AF}) + E_{per} \qquad \textbf{Ecuación 4-5}$$

Con objeto de simplificar el cálculo del consumo de energía, en instalaciones solares para producción de agua caliente sanitaria se emplea habitualmente la siguiente expresión:

$$C_{ACS} = D_{ACS} + E_{per} = Q_{ACS}(T_{uso}) \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{uso} - T_{AF}) + E_{per} = Q_{ACS}(T_{ref}) \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{ref} - T_{AF})$$

considerándose la temperatura de referencia (T_{ref}) a 45 ºC en los puntos de consumo (T_{uso}), es decir, en torno a 5-8 ºC superior a las temperaturas habituales de uso (T_{uso}). De esta forma utilizando los valores de consumo unitarios indicados en la Tabla 4.1 se calcula, de forma simplificada, el consumo de energía térmica (es decir, sin necesidad de calcular las pérdidas térmicas).

En una instalación solar destinada a la producción de agua caliente sanitaria son especialmente importantes las pérdidas térmicas en acumuladores, captadores, en el sistema de apoyo y en la red de distribución de tuberías. El valor de estas pérdidas depende fuertemente del aislamiento de la instalación (acumuladores, tuberías, etc.), de la eficiencia del sistema de apoyo, etc. Por estos motivos las pérdidas térmicas en una instalación pueden ser muy bajas (alrededor del 10% de la demanda de energía térmica) o muy altas (incluso superiores al 100% de la demanda), si bien normalmente se encuentran en tomo al 30% de la demanda de energía.

En general se va evolucionando a que la instalación solar no esté destinada exclusivamente a combatir la carga producida por la demanda de agua caliente sanitaria sino a combatir todo el consumo térmico. Esta situación debe llevar implícito el uso de elementos adecuados que aumenten el rendimiento de la instalación (disminución de pérdidas térmicas, etc.). De esta forma a medida que la instalación global es más eficiente mejor comportamiento energético presentará.

4.3 PARÁMETROS CLIMÁTICOS

4.3.1 Radiación solar

La fuente energética para el funcionamiento de las instalaciones solares térmicas es, obviamente, la radiación solar. En este apartado se hacen unas consideraciones de carácter general sobre esta fuente energética que deben ser suficientes a efectos prácticos para el diseño y cálculo de las instalaciones. Para más detalles remitimos al lector a un texto especializado.

La radiación solar se valora en varias unidades físicas concretas. Las más utilizadas son:

Irradiancia que es la potencia de la radiación solar por unidad de área y se expresa en la unidad correspondiente del Sistema Internacional de Unidades (SIU), el vatio dividido por metro cuadrado (W/m^2) y la *irradiación* que es la energía por unidad de área que se expresa en las unidades correspondientes del SIU, es decir, en julios dividido por metro cuadrado (J/m^2) o sus múltiplos (normalmente, el megajulio, MJ). En este último caso y, por razones prácticas, también se emplea una unidad de energía muy frecuente en la práctica, el kWh (kilovatio por hora) en lugar del julio y/o sus múltiplos.

La potencia radiante de 1367 W/m^2 que llega al planeta Tierra (irradiancia extraterrestre media o constante solar) no es la que finalmente alcanza la superficie terrestre, puesto que la atmósfera terrestre atenúa la radiación solar debido a la reflexión, absorción y difusión que los componentes atmosféricos (moléculas de aire, ozono, vapor de agua, CO_2, aerosoles, etc.) producen sobre la radiación solar.

Al pasar la radiación solar por la atmósfera se reduce la intensidad de la radiación debido a:

- Reflexión por la atmósfera, incluidas las nubes.
- Absorción por las moléculas que componen la atmósfera (O_3, H_2O, O_2, CO_2, etc.)
- Difusión producida por las moléculas de aire y otros componentes, incluidos los aerosoles (naturales o precedentes de la contaminación).

Si se suma toda la radiación global que incide sobre un lugar determinado en un periodo de tiempo definido (hora, día, mes, año) se obtiene la energía en kWh/m^2 (o en MJ/m^2). Este valor es diferente según la región a que hagamos referencia como se muestra en la siguiente figura.

Se puede observar que hay regiones que alcanzan un nivel máximo de irradiación por encima de 2300 kWh/(m^2.año), otras (sur de Europa por ejemplo) la irradiación solar máxima es de unos 1700 a 1800 kWh/(m^2.año) y en el norte de Europa oscila entre 700 y 1200 kWh/(m^2.año). En Europa existe mucha diferencia entre los niveles de radiación solar según la estación del año, dándose valores extremos en verano e invierno.

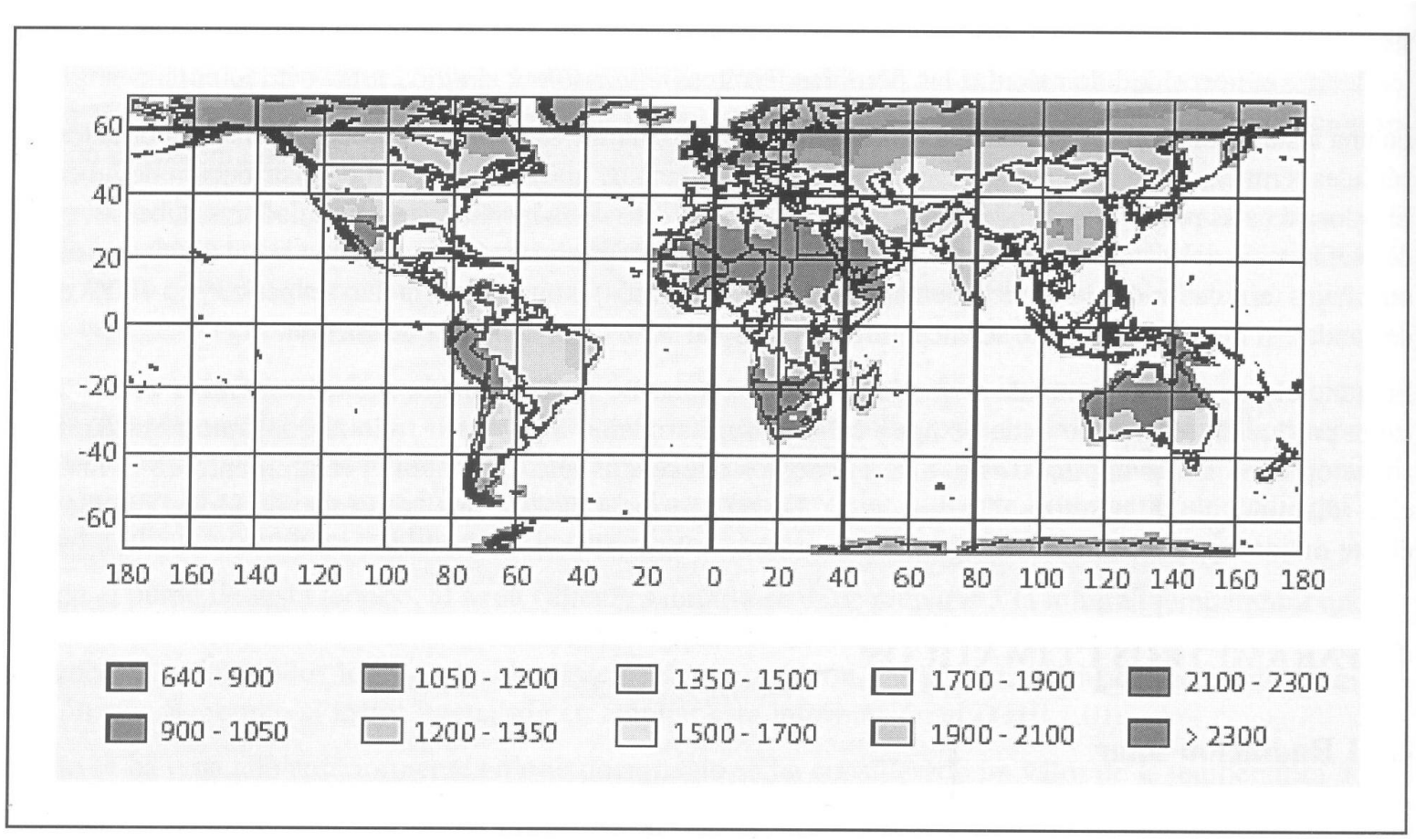


Figura 4.3: Valores de la irradiación solar en superficie horizontal en las distintas zonas de la Tierra, expresada en kWh/(m^2.año) (Fuente: Meteonorm)

En la siguiente figura se observan las diferencias regionales de irradiación global media anual dentro de España con valores mayores en el sur (≈5 kWh/(m^2.día)) y menores en el norte, como todo el mundo conoce.

La radiación solar que incide sobre la superficie terrestre se puede aceptar formada por dos componentes: directa y difusa. La radiación directa es aquella que alcanza la superficie directamente desde el sol, mientras que la difusa procede de toda la bóveda celeste y se origina sobre todo en las interacciones (difusión y absorción) de la radiación solar con los componentes atmosféricos.

En la siguiente figura se tiene la distribución, a lo largo de un día sin nubes concreto en un lugar determinado del sur de España, de la irradiancia solar incidente en sus dos componentes (directa y difusa) así como la global en una superficie horizontal. En estos días claros la componente directa de la radiación es mucho mayor que la difusa e incluso que la global horizontal como ocurre en este caso.

Para el cálculo de la producción energética de una instalación solar es fundamental conocer la irradiación solar en el plano correspondiente a la instalación y la trayectoria solar en el lugar en las diferentes épocas del año. La posición del sol en un lugar cualquiera viene determinada por su altura y su azimut.

Dado que no se mide la radiación solar en todas las superficies inclinadas que son posibles para colocar una instalación solar, se han establecido diferentes sistemas de cálculo que permiten obtener el valor de la irradiación sobre una superficie inclinada con cualquier orientación e inclinación en periodos de tiempo definidos, normalmente una hora o un día representativos de un periodo de tiempo mayor, habitualmente un mes.

No es el lugar para describir estos procedimientos de cálculo por lo que sólo se presenta el resultado de su aplicación para una ciudad española. Existen multitud de programas de cálculo que hacen este trabajo para determinadas ciudades de toda España y algunos se pueden encontrar en las páginas web de empresas e instituciones especializadas

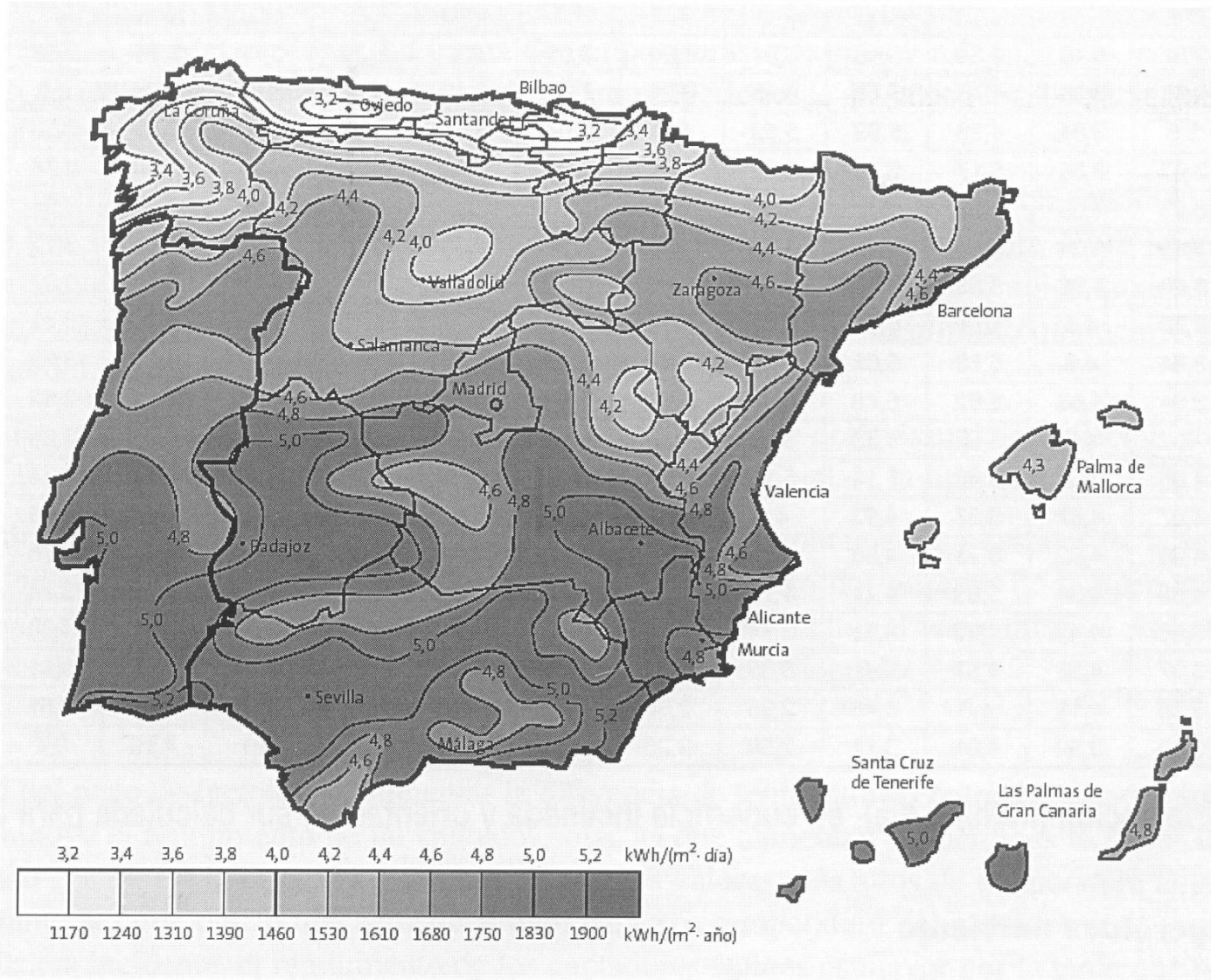


Figura 4.4: Valor medio (todo el año) de la irradiación solar global diaria en superficie horizontal en España. (Información procedente del Instituto Nacional de Meteorología).

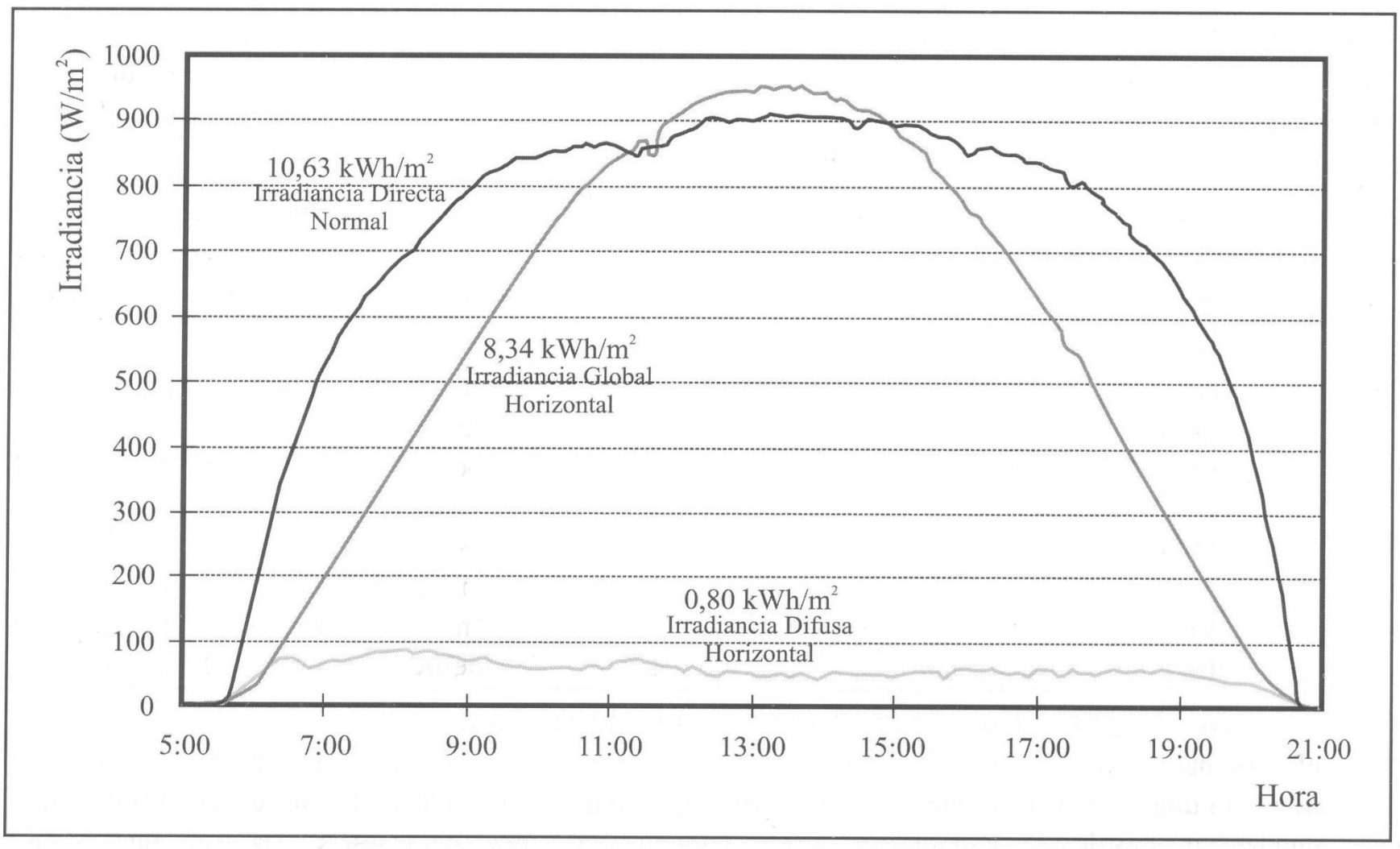


Figura 4.5: Irradiancia global horizontal, directa normal y difusa horizontal de un día sin nubes.

Inclinación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media anual
0°	2,31	3,16	4,54	5,46	6,54	6,94	7,05	6,4	5,22	3,72	2,75	2,08	4,68
5°	2,56	3,39	4,76	5,58	6,58	6,94	7,06	6,49	5,41	3,97	3,04	2,3	4,84
10°	2,8	3,64	4,98	5,69	6,59	6,9	7,04	6,57	5,6	4,22	3,32	2,53	4,99
15°	3,02	3,86	5,17	5,76	6,56	6,82	6,98	6,61	5,76	4,44	3,58	2,74	5,11
20°	3,23	4,06	5,33	5,8	6,5	6,7	6,88	6,6	5,88	4,64	3,82	2,94	5,2
25°	3,41	4,24	5,46	5,8	6,41	6,55	6,74	6,56	5,97	4,8	4,03	3,12	5,26
30°	3,58	4,38	5,55	5,77	6,29	6,36	6,57	6,48	6,01	4,94	4,22	3,27	5,29
35°	3,72	4,5	5,61	5,71	6,12	6,14	6,37	6,37	6,02	5,04	4,39	3,41	5,28
40°	3,84	4,6	5,63	5,61	5,92	5,89	6,12	6,21	6	5,12	4,52	3,53	5,25
45°	3,94	4,66	5,62	5,49	5,68	5,61	5,84	6,02	5,93	5,16	4,62	3,62	5,18
50°	4	4,7	5,57	5,33	5,42	5,3	5,53	5,79	5,83	5,17	4,7	3,69	5,09
55°	4,05	4,7	5,48	5,14	5,12	4,97	5,2	5,53	5,69	5,14	4,74	3,74	4,96
60°	4,07	4,67	5,37	4,93	4,8	4,61	4,84	5,25	5,52	5,09	4,75	3,76	4,8
65°	4,06	4,62	5,21	4,68	4,47	4,24	4,47	4,93	5,31	5	4,74	3,76	4,62
70°	4,02	4,54	5,03	4,41	4,12	3,85	4,07	4,58	5,07	4,87	4,69	3,74	4,42
75°	3,96	4,42	4,82	4,11	3,74	3,45	3,66	4,21	4,8	4,72	4,61	3,69	4,18
80°	3,87	4,28	4,57	3,8	3,35	3,05	3,23	3,82	4,5	4,54	4,49	3,61	3,93
85°	3,76	4,11	4,3	3,46	2,95	2,65	2,81	3,42	4,17	4,33	4,35	3,51	3,65
90°	3,63	3,92	4,01	3,11	2,56	2,25	2,41	3,01	3,83	4,1	4,19	3,4	3,37

Tabla 4.3: Irradiación (kWh/m².día) en superficie inclinada y orientación sur calculada para Sevilla.

4.3.2 Temperatura ambiente

Tras la radiación solar el factor climático que ejerce mayor influencia sobre el comportamiento de una instalación solar normalmente es la temperatura ambiente. En la siguiente figura se muestra la evolución de la temperatura ambiente y de la irradiación incidente en un día claro.

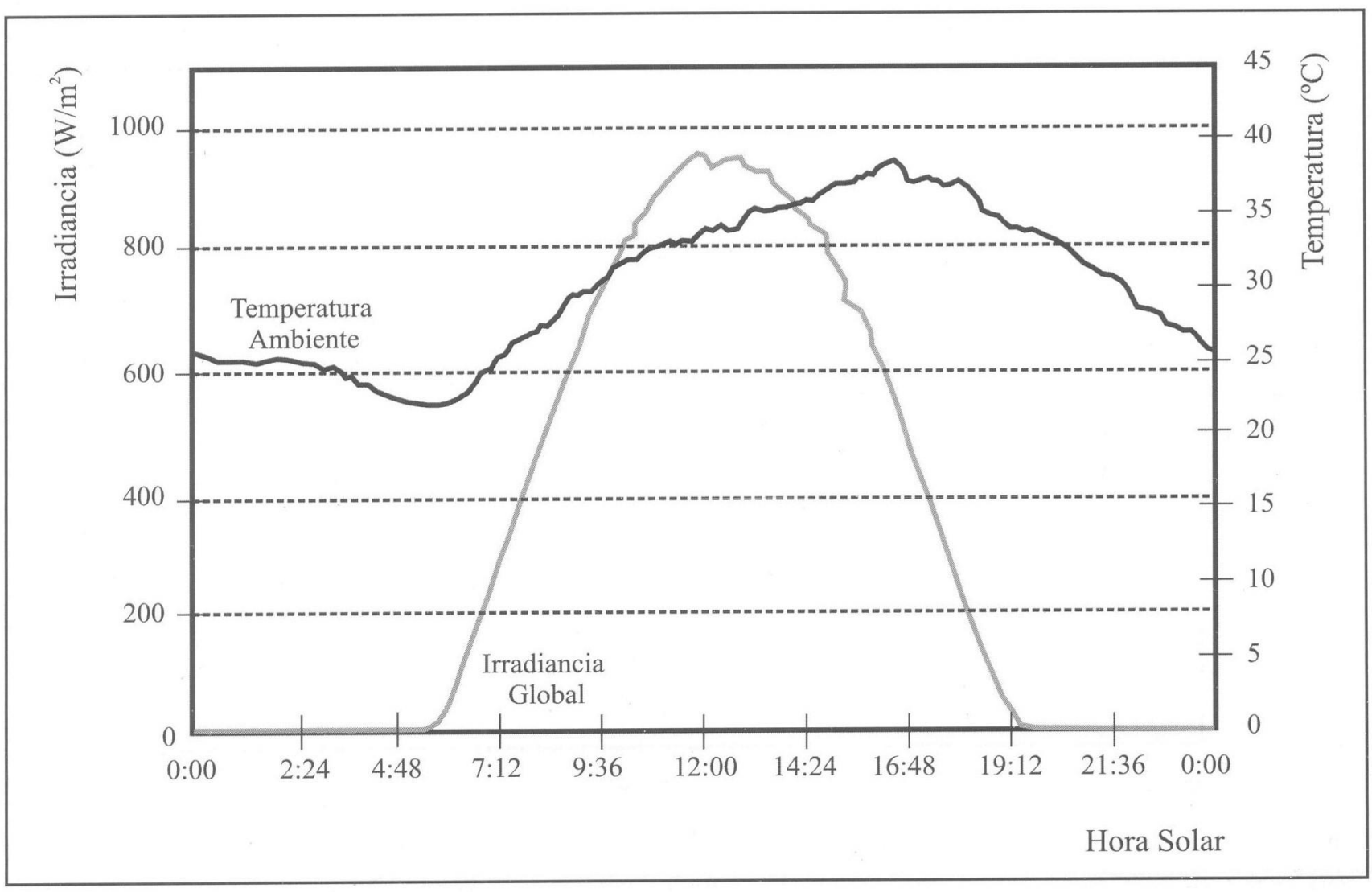


Figura 4.6: Evolución de la temperatura ambiente y de la irradiancia en un día claro.

En la actualidad, los únicos datos medidos disponibles en número suficiente, son los suministrados por el Instituto Nacional de Meteorología, en forma de temperaturas máximas y mínimas a lo largo de los años. Del estudio de los datos trihorarios comprendidos en un período de 19 años (1969-88), se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La evolución de la temperatura ambiente a lo largo del día tiene un carácter senoidal. Esto se justifica por la naturaleza igualmente senoide de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre, que influye de manera decisiva sobre la temperatura seca. La senoide solar se caracteriza por un valor máximo que tiene lugar al mediodía solar, y por un mínimo que ocurre a la salida y puesta del sol.
- El valor máximo de temperatura seca se encuentra retrasado del máximo de radiación, lo cual es debido al efecto de acumulación producido en la capa superficial de la litosfera.
- El valor mínimo de temperaturas se localiza aproximadamente una hora después de la salida del sol, instante en que finaliza el enfriamiento nocturno. El retraso del mínimo de temperatura es consecuencia de la inercia térmica del sistema. Esta hora y por tanto, el valor mínimo de la temperatura seca es dependiente de la latitud local y del día del año considerado.

A igualdad del resto de factores, al aumentar la diferencia de temperaturas entre el captador solar y el ambiente disminuye el rendimiento de un captador solar ya que aumentan las pérdidas térmicas del captador (ver apartado 2.1.3). En la Figura 4.6 se observa que los valores más altos de temperatura ambiente se alcanzan durante la tarde por lo que se deduce que, para una temperatura del captador dada y una determinada irradiancia incidente, el rendimiento de los captadores solares es mayor por la tarde que por la mañana por ser menores las pérdidas térmicas.

Respecto al resto de componentes de una instalación solar expuestos al ambiente (tuberías, etc.) sucede lo mismo ya que, suponiendo iguales el resto de parámetros (temperatura en el interior de la tubería, en el acumulador, etc.), las pérdidas térmicas en estos componentes disminuyen al aumentar la temperatura ambiente. Por tanto se concluye que, en un día claro, una instalación solar térmica tiene un mayor rendimiento energético durante la tarde que durante la mañana.

4.4 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de cada uno de los sistemas que componen la instalación solar y los diferentes componentes incluidos en cada sistema queda caracterizado y definido por una serie de parámetros cuyos valores influyen en el comportamiento energético de la instalación. En este apartado se indican algunos de estos parámetros presentándose agrupados por sistemas.

Sistema de captación solar

En primer lugar, indicar que la orientación e inclinación del sistema de captación solar son factores de diseño de la instalación que determinan la oferta de energía disponible influyendo en la cantidad de radiación incidente sobre el sistema de captación. Por este motivo, aunque tanto la orientación como la inclinación son variables de diseño de la instalación se consideran como parámetros climáticos.

Entre los principales parámetros del sistema de captación destaca el número de captadores y su forma de conexionado (serie, paralelo o mixta) así como los caudales de circulación del circuito primario. En algunos casos, se asocia al sistema de captación la parte de la red de transporte que realiza la interconexión de todos los captadores.

Con relación a los parámetros de funcionamiento específicos de los captadores solares destacan su área, los coeficientes de la curva de rendimiento (factor de ganancia, coeficientes de pérdidas térmicas), el modificador del ángulo de incidencia, el caudal que circula por cada captador y la pérdida de carga asociada.

Sistema de acumulación

Queda definido por el número y volumen de acumuladores, su forma de conexionado, características térmicas y aislantes (capacidad térmica, coeficiente de transferencia de calor, puentes térmicos, etc.) y caudales de circulación durante los procesos de carga y/o descarga térmica.

Los principales parámetros que influyen en el comportamiento de un acumulador son el volumen, disposición, geometría, altura y diámetro, situación de las conexiones de entrada y salida y el aislamiento térmico (espesor y conductividad térmica) del mismo.

Debido a la importancia que tienen sobre el comportamiento energético del acumulador también resulta necesario considerar los elementos y parámetros que definen la influencia del correspondiente mecanismo (tubos difusores, deflectores, relación altura/diámetro, etc.) en la estratificación térmica del acumulador.

Sistema de intercambio

El sistema de intercambio se puede caracterizar por el tipo de intercambiador, la potencia térmica, su efectividad, la superficie de intercambio, coeficiente de transmisión de calor y aislamiento térmico. El funcionamiento del intercambiador queda determinado por los caudales de circulación, las características de los fluidos empleados en el intercambiador (lados primario y secundario), el factor de ensuciamiento y las pérdidas de carga.

Sistema de transporte

Entre sus parámetros de funcionamiento destacan los caudales de diseño y su distribución, la longitud y diámetro de las tuberías y el espesor y conductividad térmica del aislamiento. Respecto a las bombas de circulación se ha de considerar su potencia eléctrica.

Dentro de este sistema quedan definidas las características energéticas de los fluidos empleados en los diversos circuitos de la instalación y entre las propiedades a considerar destacan: calor específico, temperaturas de ebullición y de congelación, densidad, viscosidad y coeficiente de expansión térmica.

Sistema de control

Queda definido por la posición de los sensores de control (en captadores, acumuladores, intercambiadores, tuberías, etc.), por la estrategia y los criterios de activación/parada (diferencias de temperatura de arranque, temperaturas de corte (máxima en acumuladores, sistema antiheladas, etc.), histéresis, valores mínimos de irradiancia solar, etc.).

También se pueden incorporar las características de funcionamiento y estrategia de control del sistema de apoyo y, en su caso, de la bomba del circuito de recirculación así como de las válvulas mezcladoras.

4.5 PRINCIPIOS BÁSICOS DE CÁLCULO

El cálculo de una instalación solar tiene por objeto conocer el comportamiento de una determinada instalación (condiciones funcionales) expuesta en un determinado lugar (condiciones climáticas) y con una determinada utilización (condiciones de uso).

- Las condiciones climáticas caracterizan la energía disponible (EDIS)
- Las condiciones funcionales, definen el rendimiento de la transformación (REN)
- Las condiciones de uso determinan la energía necesaria (ENEC)

Se pueden establecer, las siguientes definiciones adicionales:

- La energía solar aportada (EAPO) es la energía térmica realmente transferida al consumo y puede definirse por:

$$EAPO = EIDS \cdot REN \qquad \textbf{Ecuación 4-6}$$

En este documento se define el rendimiento global de una instalación solar como el cociente entre la energía térmica aportada por la instalación solar (entregada al consumo) y la energía solar incidente sobre el plano de los captadores solares de la instalación. Siempre ha de referirse a un determinado periodo de tiempo. Este rendimiento se obtiene multiplicando los rendimientos de cada uno de los sistemas (captación, acumulación, intercambio, transporte y control) que constituyen la instalación.

La energía solar aportada EAPO es una parte de la energía necesaria (ENEC) o demanda. A la parte de la demanda que es cubierta mediante energía solar se denomina cobertura o fracción solar. Por tanto:

$$EAPO = ENEC \cdot FS \qquad \textbf{Ecuación 4-7}$$

Se define la fracción solar (FS) como el cociente entre la energía aportada por la instalación solar al consumo y la demanda de energía térmica para producción de agua caliente requerida por el consumo.

Por tanto, y este es el principio básico de cálculo:

$$EDIS \times REN = EAPO = ENEC * FS \qquad \textbf{Ecuación 4-8}$$

El cálculo de una instalación supone que, una vez definidas los parámetros de las condiciones de uso, climáticos y de funcionamiento, quedan unívocamente determinados los valores de la fracción solar y del rendimiento.

Ahora bien, cualquier modificación de alguno de estos parámetros, afecta. Así:

- la misma instalación en el mismo sitio con distinto uso tiene distinto comportamiento.
- la misma instalación con el mismo uso tiene distinto comportamiento dependiendo del sitio.
- el mismo consumo en el mismo sitio puede ser atendido por distintas instalaciones con distintos rendimientos y distintas fracciones solares.

De forma general, en función de los datos de entrada los diversos procedimientos de cálculo utilizados en las instalaciones solares térmicas aportan los resultados de la instalación (prestaciones energéticas, etc.). Las variables que definen o resumen el resultado del cálculo pueden ser la energía solar aportada, la fracción solar, etc.

Como el rendimiento de una instalación se obtiene multiplicando los rendimientos de cada uno de los sistemas (captación, acumulación, intercambio, transporte y control) se pueden buscar soluciones tecnológicas distintas que den el mismo resultado final; es decir se pueden conseguir rendimientos y fracciones solares iguales con distintas instalaciones.

A modo de ejemplo se incorpora en estas definiciones el rendimiento del sistema de captación solar. Este se define como el cociente entre la energía térmica aportada por el sistema de captación (captadores solares y elementos de conexión) al sistema de intercambio (en caso de existir intercambiadores entre los captadores solares y el acumulador solar) o al sistema de acumulación y la energía solar incidente sobre el plano de los captadores solares de la instalación. De manera similar se definen los rendimientos del resto de sistemas que evidentemente han de estar referidos al mismo periodo de tiempo.

4.6 MÉTODOS DE CÁLCULO

Existe una amplia gama de métodos de cálculo cuyos datos de entrada, datos de salida, propiedades, bases de cálculo, aplicaciones, etc. son muy diferentes. Es de destacar que dependiendo del método de cálculo empleado será necesario establecer, con mayor o menor detalle, parte o todos los parámetros de uso, climáticos y de funcionamiento indicados en los apartados anteriores.

Los resultados obtenidos pueden ir desde la evaluación de las prestaciones energéticas globales de la instalación solar térmica hasta aspectos específicos de cada sistema (nivel de estratificación térmica en el acumulador, temperatura a la salida del captador, etc.).

Los métodos de cálculo de instalaciones solares pueden clasificarse en: métodos simplificados o métodos detallados.

Métodos de cálculo simplificados

Los métodos simplificados aportan información sobre el comportamiento energético global de la instalación, no requieren gran nivel de detalle para la definición de las bases de cálculo y por tanto no necesitan disponer de información detallada en los datos de entrada por lo que son relativamente fáciles de utilizar. Los parámetros de salida generalmente se refieren a variables globales de la instalación (cantidad de energía aportada, etc.).

Estos métodos normalmente están basados en correlaciones obtenidas a partir de datos medidos en una cantidad significativa de instalaciones. El rango de validez de las correlaciones depende de múltiples factores si bien, con carácter general, es necesario que estos métodos sean suficientemente validados con los datos medidos en las instalaciones.

Los métodos simplificados pueden utilizarse para obtener una primera estimación en el dimensionado de la instalación si bien debido a que normalmente no permiten obtener información específica sobre los diferentes sistemas que constituyen la instalación (captación, acumulación, etc.), para contrastar los valores obtenidos, conseguir un conocimiento más detallado del comportamiento energético global de la instalación y del específico de los diferentes sistemas y/o componentes se tiene que realizar el estudio mediante métodos de cálculo detallados.

i) Método de cálculo del rendimiento medio

El método de cálculo simplificado más sencillo es el que utiliza como únicos parámetros funcionales el área de captación (A) y el rendimiento medio (η) de la instalación solar; conociendo la demanda diaria de energía térmica (D_{ACS}) y la irradiación solar anual disponible sobre el plano de captación (H_G), se determina la fracción solar (FS) utilizando la expresión:

$$FS = \frac{A \cdot H_G \cdot \eta}{D_{ACS} \cdot 365} \qquad \textbf{Ecuación 4-9}$$

ii) Método de cálculo f-chart

En el ejemplo que se muestra posteriormente se ha empleado el método simplificado basado en correlaciones *f-chart* para la evaluación energética de las instalaciones solares térmicas. Este método trabaja con valores diarios medios mensuales y estima la cantidad de energía aportada por una instalación solar a partir de los siguientes parámetros:

- De uso: temperatura de agua fría, temperatura de uso y consumo de agua caliente a la temperatura de uso
- Climáticos: irradiación solar sobre el plano de captadores solares y temperatura ambiente
- De funcionamiento: área de captación solar, factor óptico y coeficiente lineal de transferencia de calor del captador, caudal de circulación y volumen de acumulación.

Los resultados arrojados por este método de cálculo son los valores de fracción solar para un día medio de cada mes. La energía solar aportada (EAPO) se obtiene multiplicando la fracción solar por la demanda de energía térmica.

Métodos de cálculo detallados

Estos métodos utilizan modelos físicos y matemáticos que caracterizan los distintos sistemas y/o componentes, permiten realizar estudios paramétricos para determinar el efecto provocado en la instalación solar debido a la variación de distintas variables y simulan el comportamiento energético de la instalación. Son métodos capaces de aportar gran cantidad de información detallada pero que han de estar adecuadamente contrastados con datos experimentales medidos en las instalaciones al objeto de reproducir convenientemente el comportamiento de estas.

Una ventaja importante que ofrecen estos métodos es que se pueden utilizar para contrastar los datos medidos de funcionamiento real con los resultados obtenidos en la simulación.

En cualquier caso siempre ha de tenerse en cuenta que estos métodos, normalmente, sólo modelan los procesos térmicos que tienen lugar en las instalaciones y no incluyen otros aspectos que sí pueden tener lugar en la realidad (fugas de líquido, fallos en el sistema de control, etc.).

En general los métodos detallados son más complejos de manejar, requiriéndose un esfuerzo importante en la definición de la instalación así como en la cantidad y nivel de detalle de los datos de entrada (valores horarios, etc.).

Entre los resultados normalmente aportados por los métodos detallados sobre el comportamiento de los distintos sistemas de la instalación destacan:

- Sistema de captación solar: temperatura a la salida de cada captador solar, energía captada y pérdidas térmicas.
- Sistema de acumulación: distribución vertical de temperaturas (estratificación) en el interior de los acumuladores, caudales y temperaturas a través de las conexiones de entrada y salida de los acumuladores y pérdidas térmicas.
- Sistema de intercambio: temperaturas a la salida del primario y del secundario.
- Sistemas de transporte y de control: pérdidas térmicas en las tuberías, tiempo de funcionamiento y/o consumo de energía eléctrica de las bombas.

Estos métodos también cuantifican energías, rendimientos, etc. Para ello, a partir de los resultados mencionados realizan las correspondientes operaciones que permiten cuantificar estas otras variables.

4.7 CRITERIOS DE CÁLCULO

Utilizando métodos de cálculo simplificados, se aportan en este apartado criterios para definir las variables fundamentales que intervienen en el cálculo de instalaciones

De acuerdo con los principios establecidos, el cálculo de una instalación solar debe realizarse de acuerdo con el siguiente procedimiento:

1. Cálculo de la demanda de energía
2. Selección de la orientación e inclinación de captadores
3. Definición de los datos climáticos
4. Selección de los parámetros funcionales de la instalación
5. Cálculo de las prestaciones
6. Modificación y ajuste de los parámetros funcionales
7. Nuevo cálculo de las prestaciones

En este apartado se desarrollan aquellos aspectos no tratados anteriormente (2, 4, 5). Como regla general, el cálculo de una instalación solar térmica es un proceso iterativo (7) que requiere el ajuste de los parámetros funcionales (6) en base a la realimentación con los resultados que proceden del cálculo anterior. En los ciclos del proceso reiterativo debe incluirse todo el proceso de diseño y cálculo de sistemas y componentes de la instalación.

Es importante, a la hora de seleccionar y modificar los parámetros funcionales, saber cómo afectan cada uno de ellos a los resultados globales de una instalación solar por lo que se incluye, en el último apartado de este capítulo, un análisis de sensibilidad de los parámetros funcionales más significativos.

4.7.1 Selección de la orientación e inclinación

La selección de la orientación e inclinación de los captadores afecta a la energía radiante incidente sobre los mismos y puede realizarse con criterios arquitectónicos (conseguir una mayor integración arquitectónica de los captadores solares en el edificio), energéticos (optimizar el acoplamiento entre la demanda y la oferta de energía) o buscando soluciones de compromiso entre ambos criterios.

a) Orientación

Como se indicó en el apartado 2.1.4, en España los captadores solares han de estar orientados hacia el sur geográfico si bien la reducción de las prestaciones energéticas no son elevadas si se desvían ± 50º respecto del sur.

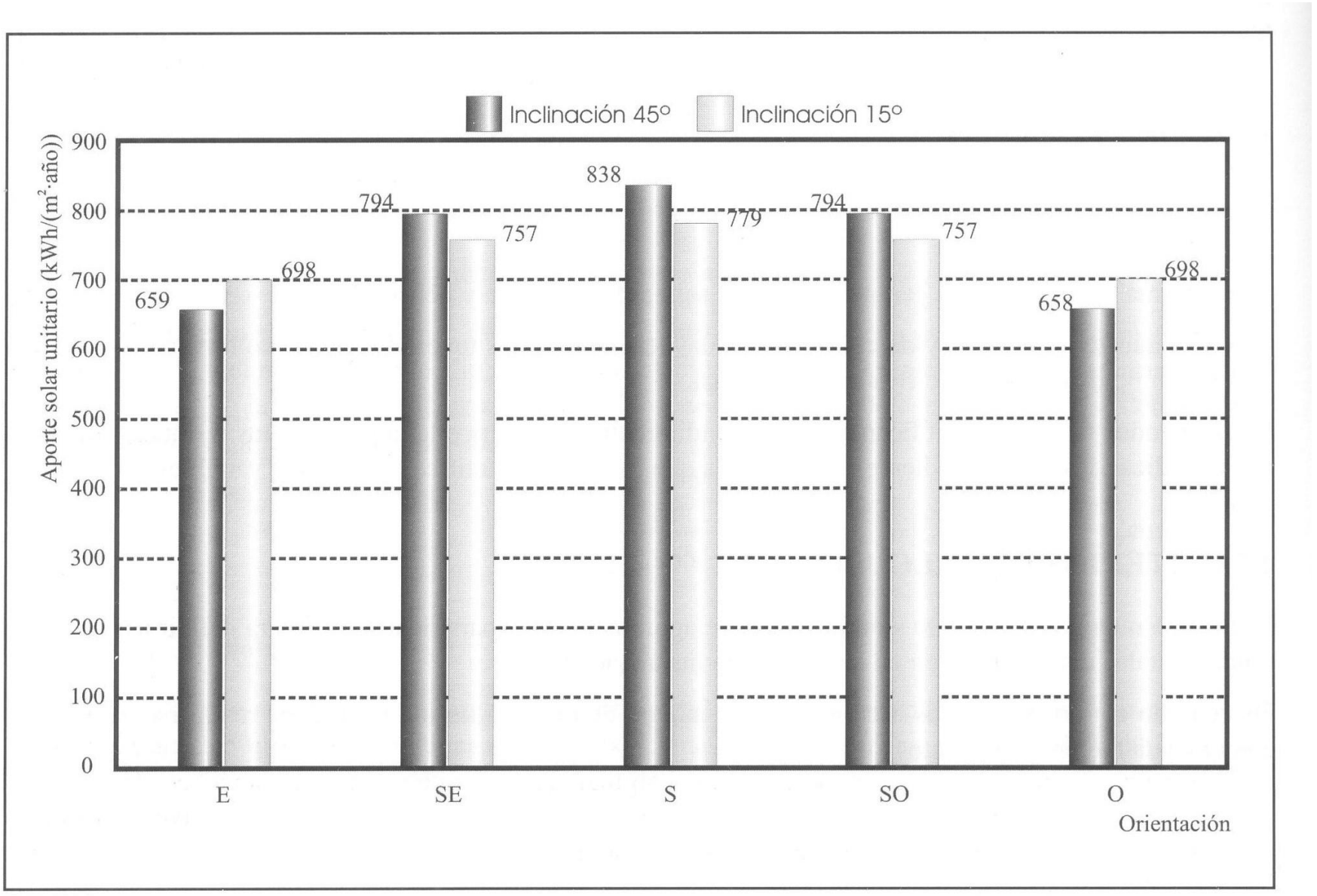


Figura 4.7: Variación del aporte solar unitario con la orientación.

Para un ángulo de inclinación de 45º sobre el plano horizontal, en la Figura 4.7 se observa que al desviarse los captadores solares 45º respecto del sur, es decir orientación SE o SO, la disminución de la energía generada por estos es aproximadamente del 5%. Sin embargo al desviarse 90º y por tanto colocar los captadores bien hacia el este (E) u oeste (O) se produce una variación más acusada (del orden del 20%).

Es necesario destacar que estas variaciones dependen del ángulo de inclinación considerado. En la figura anterior se muestra la variación del aporte solar unitario respecto del sur para un ángulo de inclinación de 15º, observándose que estas disminuciones son menores (inferiores al 3% para orientaciones sureste o suroeste y del orden del 10% para orientaciones este u oeste).

Las gráficas mostradas están basadas en los resultados obtenidos tras la aplicación del método de cálculo f-chart.

b) Inclinación

El caso de la inclinación de los captadores es distinto al de la orientación ya que no puede establecerse, a priori, su valor óptimo desde el punto de vista energético. Este valor dependerá de la latitud del lugar donde se vaya a montar la instalación solar y de la distribución de la demanda de energía térmica a lo largo del año. Como regla general se suelen adoptar los siguientes criterios, válidos para nuestras latitudes:

- Utilizar 45º sobre el plano horizontal como ángulo de inclinación de los captadores si la demanda de energía térmica es uniforme a lo largo de todo el año.
- Si la demanda de energía térmica es mayor en verano las prestaciones globales de la instalación aumentan al disminuir la inclinación de los captadores por lo que se recomienda utilizar una inclinación en torno a 30º.
- Si la demanda de energía térmica es mayor en invierno las prestaciones globales de la instalación aumentan cuando la inclinación de los captadores aumenta (se recomienda emplear un ángulo de inclinación de 60º).

4.7.2 Selección de los parámetros funcionales (Estimación del área de captación y del rendimiento medio anual)

Para realizar la estimación del área de captación, se emplea el método de cálculo del rendimiento medio (η) y del área de captación (A) anteriormente referido. Una vez determinada la demanda media diaria anual de energía térmica (D_{ACS}) y la irradiación solar disponible sobre el plano de captación (H_G), se define un nivel de cobertura de la demanda de energía con lo que se cuantifica la fracción solar requerida (FS). Estimando el rendimiento medio anual de la instalación (η), se puede calcular el área (A) de captación mediante la siguiente expresión:

$$A = \frac{D_{ACS} \cdot FS \cdot 365}{H_G \cdot \eta}$$ **Ecuación 4-10**

Sabiendo que los parámetros funcionales no son independientes se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Para estimar el rendimiento medio anual de la instalación debe tenerse en cuenta que el rendimiento medio de los captadores solares se encuentra habitualmente comprendido en el rango 40-60% y que en el resto de componentes de la instalación se producen pérdidas térmicas que contribuyen a disminuir el rendimiento global de la misma. Por estos motivos normalmente se consideran valores del rendimiento medio anual dentro del rango 30-50%.
- Considerando que la irradiación solar anual es de 1800 kWh/m^2 y que la energía disponible se utiliza para aumentar 30 K la temperatura del agua (de 15 a 45 ºC), para obtener con la energía solar un aporte del 70% de la demanda, es necesario disponer 1 m^2 de captador solar por cada 80 litros (para η=0,4) de consumo de agua. Este valor corresponde al valor de diseño recomendado en las especificaciones actualmente aplicadas.
- En función del rendimiento, y para la misma fracción solar, este consumo específico puede variar entre los 60 litros (para η =0,3) y 100 litros (para η =0,5) de agua caliente consumida.

Se puede estudiar la influencia del área de captadores y del rendimiento en las prestaciones y la fracción solar para establecer otros números índices siempre teniendo en cuenta que estos parámetros, como posteriormente queda reflejado, son muy interdependientes.

4.7.3 Cálculo de prestaciones energéticas

Como ya se indicó en el apartado de principios básicos de cálculo, una de las variables que mejor define y resume el resultado del cálculo de una instalación solar térmica es la fracción solar referida a una demanda de energía (o su equivalente: la energía solar aportada al consumo). En este apartado se realiza un breve análisis de los resultados del cálculo de una instalación solar térmica empleando el método de cálculo f-chart y de la influencia del consumo en las prestaciones.

En la Figura 4.8 se representan los valores de demanda de energía térmica, correspondiente a un consumo diario de agua caliente (M) constante a lo largo del año (en este ejemplo, M = 6000 1/día), y el aporte solar a lo largo de un año de 3 diferentes instalaciones caracterizadas por su área (A) de captación útil (40, 80, 120 m^2).

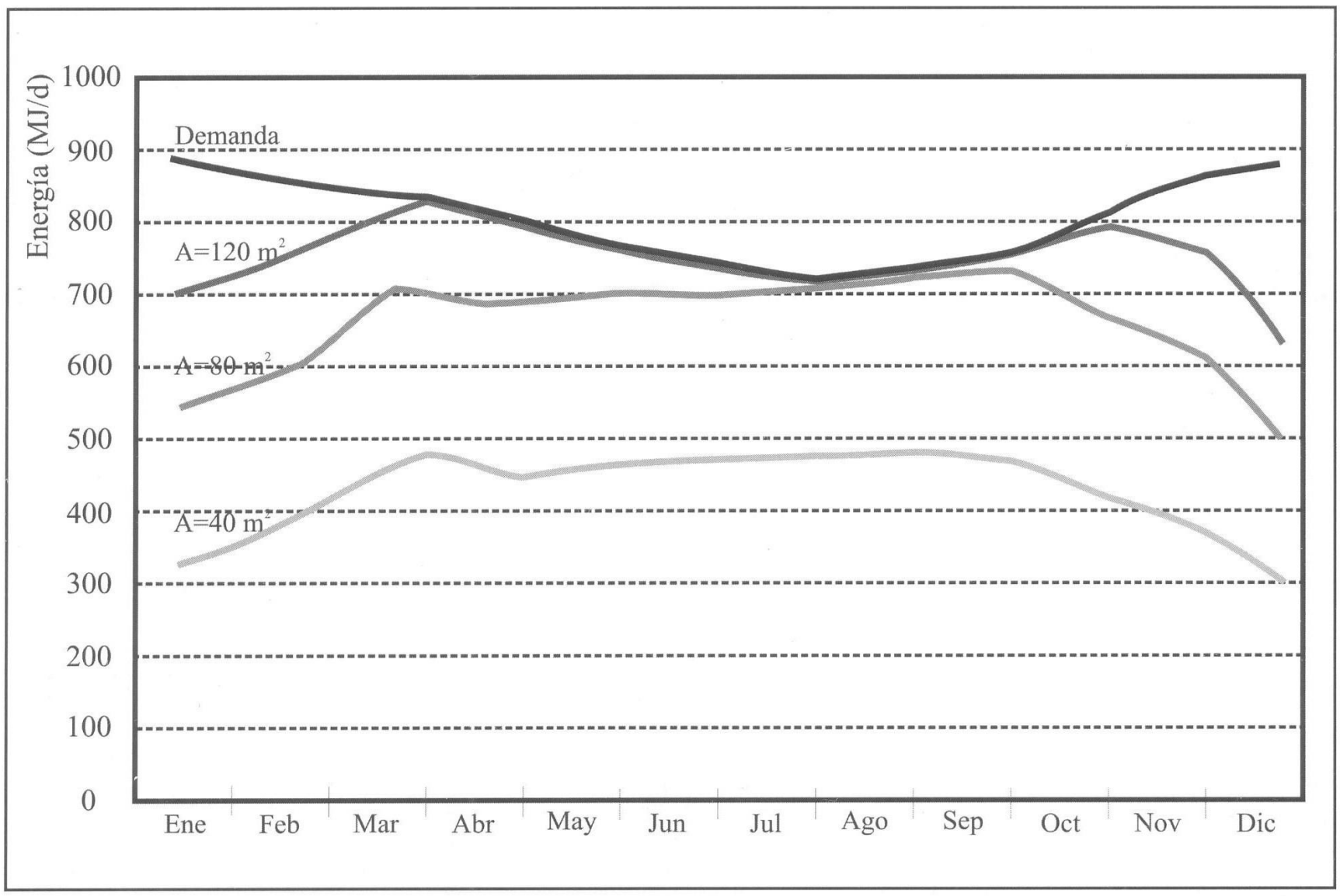


Figura 4.8: Variación de las prestaciones energéticas con el área de captación.

Se observa que al aumentar el área de captación aumenta la energía total aportada por la instalación solar si bien, como se muestra en la Figura 4.10, el aporte solar unitario (energía aportada por m^2de captador solar) disminuye.

Cuando el área de captadores solares es de 40 m^2(M/A = 150 1/m^2) la instalación aporta el 52,7% de la demanda energética anual, mientras que el resto ha de ser satisfecha mediante el sistema de apoyo. Se observa que el sistema de apoyo debe ser empleado durante todo el año. La energía aportada por m2 de captador solar o aporte solar unitario (ASU) es aproximadamente de 1073 kWh/(m^2 .año).

Para A = 80 m^2 (M/A = 75 1/m^2) la fracción solar anual asciende al 82,3%. Se observa que durante el periodo estival prácticamente no se utiliza el sistema de apoyo (FS ≈100%). En este caso se reduce el aporte solar unitario a 838 kWh/(m^2 .año).

En el último caso (A=120 m^2, M/A = 50 l/m^2) la fracción solar anual es del 93,3% necesitándose solamente el sistema de apoyo durante cuatro meses (noviembre a febrero); el aporte solar unitario.es de 633 kWh/(m^2 .año).

Por tanto, a medida que aumenta el área de captación aumenta la fracción solar, se reduce el consumo correspondiente al sistema de apoyo pero disminuye el aporte solar unitario. Dependiendo del objetivo establecido (máxima reducción del consumo asociado al sistema de apoyo, maximización del aporte solar unitario, etc.) se ha de tomar la decisión respecto del área de captación.

Habitualmente las instalaciones solares se calculan considerando una relación entre la carga de consumo diaria media anual (M, expresada en l/día) y el área de captación solar (A, expresada en m^2) comprendida entre 70-100 $1/m^2$.

Es necesario resaltar la gran influencia que tiene el consumo de agua caliente en el rendimiento y prestaciones de la instalación por lo que se aconseja examinar los efectos de la variación del consumo en los mismos. En la Figura 4.9, realizada para una relación V/A constante e igual a 75 litros por m^2 de captador solar, se observa que al aumentar el consumo (M) aumenta el rendimiento y la cantidad de energía aportada por la instalación solar. Sin embargo, a partir de un determinado valor ambos factores presentan evoluciones prácticamente asintóticas debido a que se está cercano a la máxima cantidad de energía que puede suministrar la instalación.

En la misma figura se muestra cómo disminuye la fracción solar al aumentar el consumo. Es decir, al aumentar el consumo aumenta la cantidad de energía aportada por la instalación solar pero también lo hace, y en mayor medida, la demanda de energía térmica.

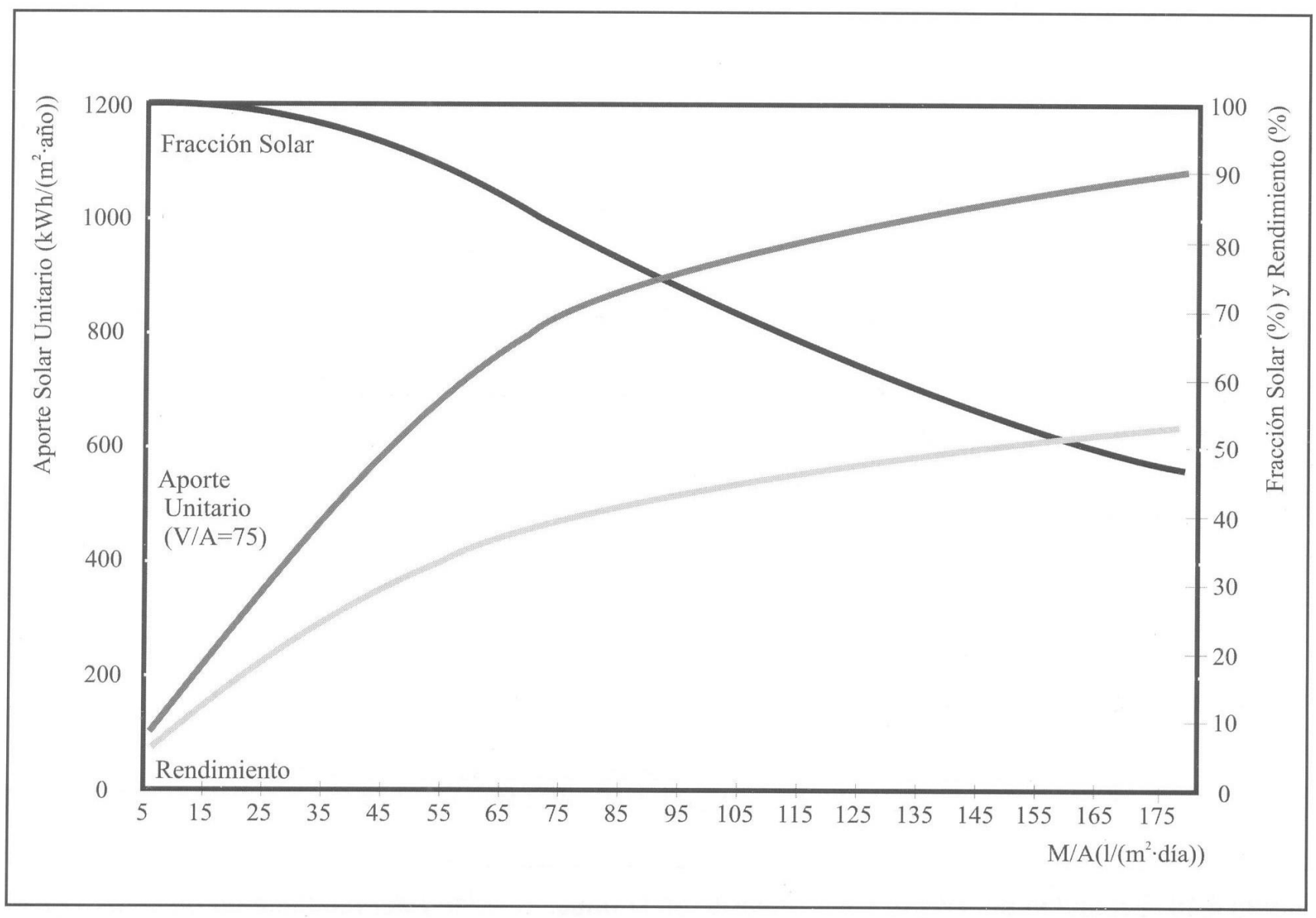


Figura 4.9: ASU, FS y rendimiento frente a M/A.

4.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En este apartado se analiza el comportamiento energético de una instalación cuando varía alguno de los parámetros de funcionamiento: área de captación solar, factor de ganancia o coeficiente de pérdidas térmicas del captador, volumen de acumulación, caudales de funcionamiento y efectividad del intercambiador.

En cada uno de los análisis presentados se considera solamente la variación del parámetro indicado, es decir, el resto de parámetros mantienen valores constantes. En todos los casos se toma como variable de referencia del comportamiento energético la cantidad de energía anual aportada por la instalación completándose el análisis en algunos casos con otras variables (rendimiento unitario de captación, fracción solar mensual, etc.).

El análisis mostrado se ha realizado fundamentalmente en base al método f-chart. Análisis similares se pueden realizar con métodos de simulación si bien estos permiten analizar la influencia de mayor cantidad de parámetros de funcionamiento (situación de las tuberías de entrada y salida en los acumuladores, caudales de circulación, potencia de las bombas, etc.) y sobre diversas variables de referencia que también permiten cuantificar el comportamiento energético de la instalación (temperatura a la salida de captadores, temperaturas en el interior del acumulador, cantidad de energía consumida por las bombas, etc.).

Como punto de partida se considera que los captadores están orientados hacia el sur y con un ángulo de inclinación de 45º sobre el plano horizontal. Por defecto se establece que la relación entre la carga de consumo diaria media anual (M) y el área de captación solar (A) es de 75 l/m^2. De igual forma se considera que la relación entre la carga de consumo y el volumen de acumulación V es la unidad (V/M =1) por lo que en el estado de referencia V/A = 75 l/m^2.

a) Influencia del área de captación solar

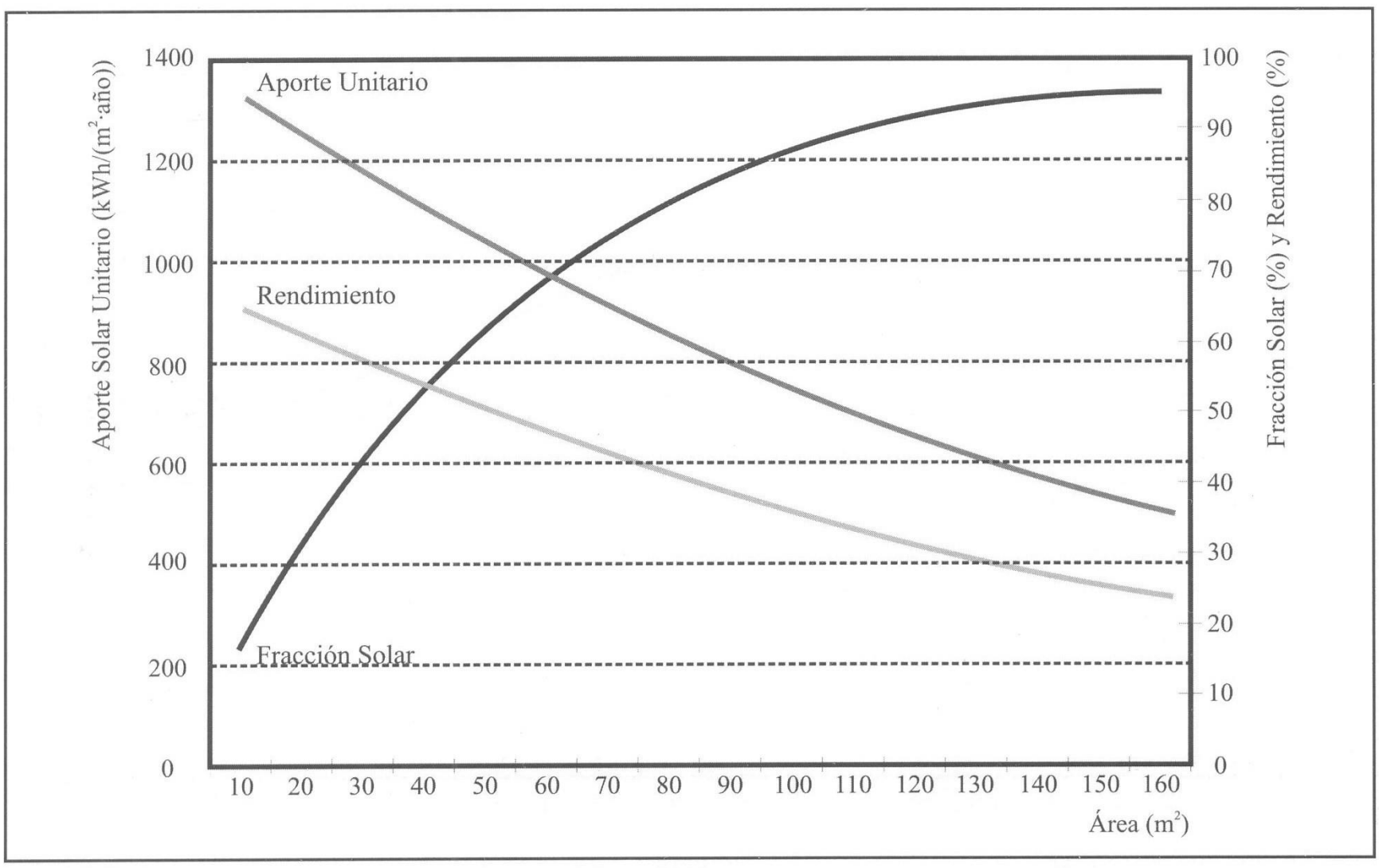


Figura 4.10: Evolución del aporte solar unitario, de la fracción solar y del rendimiento de la IST con el área de captación.

En la siguiente figura, realizada manteniendo constante la demanda de energía térmica y resto de parámetros y condiciones de funcionamiento salvo el área de captadores solares, se observa que simultáneamente tienen lugar los siguientes dos efectos contrapuestos a medida que aumenta el área de captación de una instalación solar térmica:

1. Aumenta la fracción solar y por tanto la cantidad de energía aportada por la instalación
2. Disminuye el rendimiento unitario de captación solar (cociente entre la energía térmica aportada por m^2 de captador solar y la energía solar incidente sobre el mismo).

A igualdad del resto de factores (volumen de acumulación, orientación e inclinación de captadores, etc.) al aumentar el área de captación de la instalación también aumenta la cantidad total de energía aportada por la instalación y, por tanto, la fracción solar. Sin embargo, la cantidad de energía aportada por cada metro cuadrado de captador solar o aporte solar unitario disminuye y, por tanto, cada m^2 adicional es menos eficiente en términos energéticos que el anterior. La disminución del aporte solar unitario es debida a que la temperatura de entrada al captador es más alta (ya que se mantiene constante el resto de parámetros como el volumen de acumulación o la temperatura ambiente) y, por tanto el rendimiento de captación disminuye.

En la Figura 4.10 también se muestra la evolución del rendimiento con el área. Se observa que en este caso se alcanza la fracción solar del 70% con un rendimiento superior al 40%.

b) Influencia del factor de ganancia del captador solar

Al aumentar el factor de ganancia o rendimiento óptico aumenta la cantidad de energía aportada por la instalación solar (expresada en MJ por m^2 de captador solar o aporte solar unitario) si bien el valor de este aumento va disminuyendo a medida que aumenta el factor óptico. Así al cambiar el factor óptico de 0,50 a 0,55 se produce un aumento del aporte solar unitario en torno al 10% mientras que al pasar de 0,85 a 0,90 el aumento apenas supera el 3%.

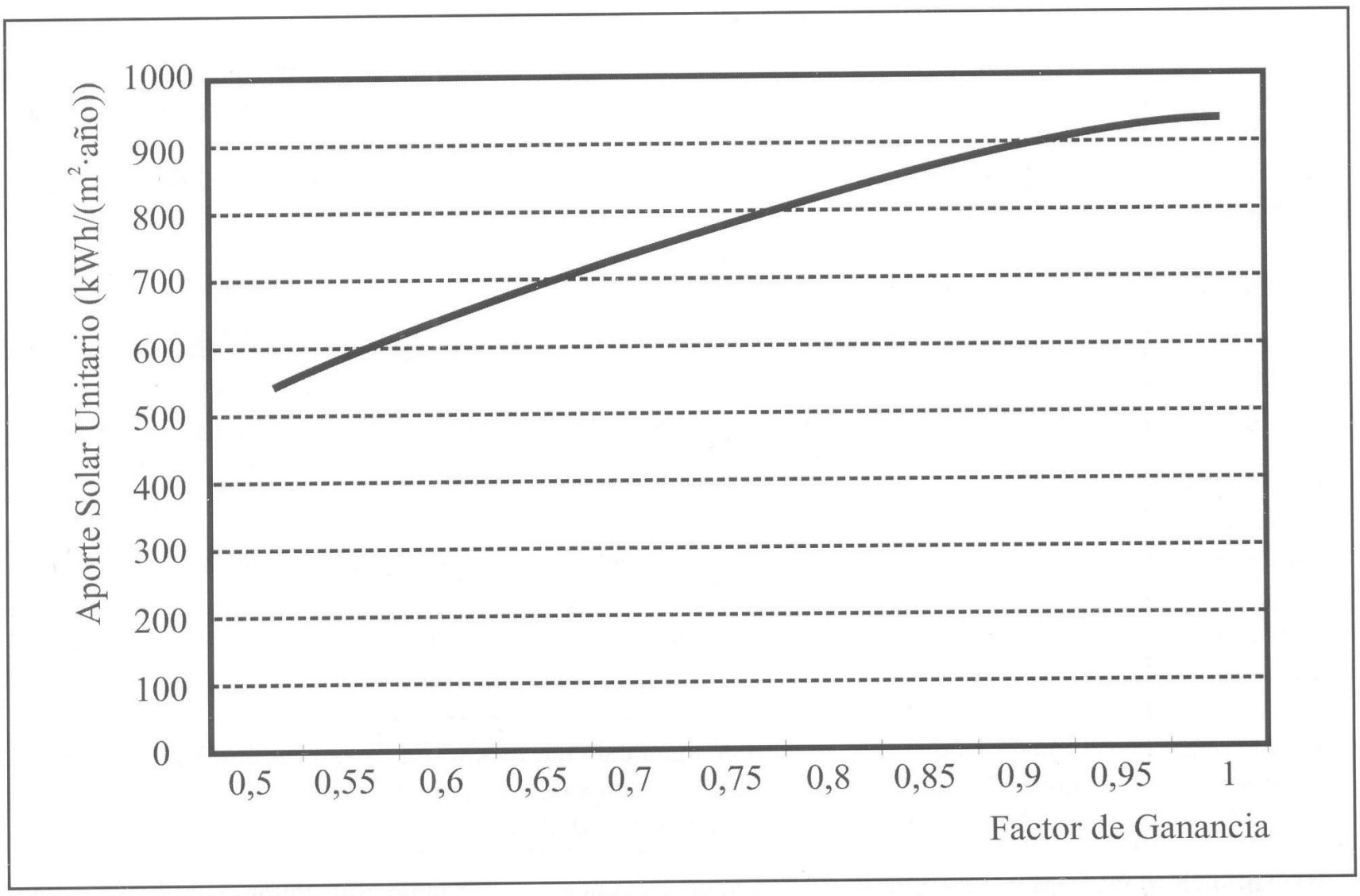


Figura 4.11: Aporte solar unitario vs factor de ganancia.

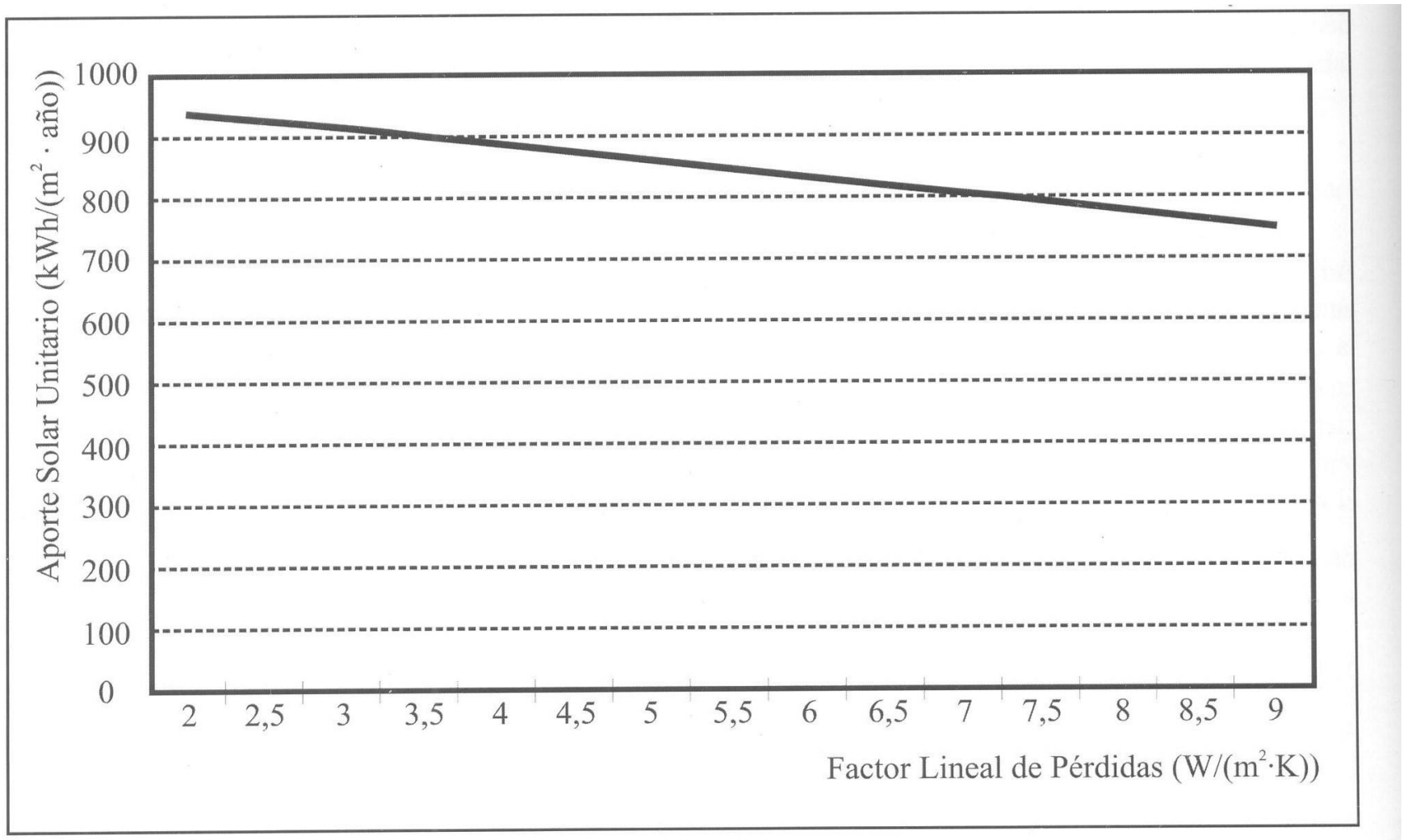


Figura 4.12. Aporte solar unitario vs factor lineal de pérdidas.

La Figura 4.12 muestra de forma cuantitativa la disminución de la cantidad de energía aportada por los captadores solares (aporte solar unitario) que se produce en una instalación solar a medida que aumenta el factor lineal de pérdidas térmicas de los captadores. En este caso concreto al aumentar el factor de pérdidas de 2 a 2,5 el aporte solar unitario disminuye alrededor del 1%, mientras que al pasar el factor de pérdidas de 7,5 a 8 disminuye en tomo al 2%.

d) Influencia del volumen de acumulación

La Figura 4.13 está realizada para diversos valores de la relación M/A iguales a 50, 75 y 100 litros por día y m^2 de captador solar. En todos estos casos al aumentar la relación V/A aumenta el aporte solar unitario ya que disminuye la temperatura de entrada al captador (debido a la menor temperatura alcanzada en el acumulador).

El comportamiento prácticamente asintótico se alcanza antes (valores inferiores de V/A) para los casos en los que la relación M/A es más baja. Es decir, a partir de que el volumen de acumulación es del orden de la carga de consumo (V/A coincide con M/A), a medida que aumenta el volumen de acumulación (mayor V/A) el aumento del aporte solar unitario es cada vez inferior. Esto es debido a que cuando V es superior a M el aumento adicional de energía es muy pequeño ya que a pesar de aumentar la energía almacenada en el acumulador (aumenta el rendimiento de los captadores por trabajar a inferiores temperaturas) esta energía prácticamente no es aprovechada ya que el consumo de agua caliente es inferior al agua acumulada y por tanto queda energía en el acumulador que no es llevada a los puntos de consumo. Como se comentó anteriormente, a los efectos de la instalación solar la energía no distribuida al consumo no se considera energía útil.

Como también se muestra en la Figura 4.13, fijada una relación V/A a medida que aumenta el consumo M, y por tanto la relación M/A, aumenta el aporte solar unitario. En cualquier caso se observa que este aumento va siendo porcentualmente más pequeño a medida que aumenta la relación M/A ya que se está cada vez más cercano a la máxima cantidad de energía que puede aportar la instalación solar.

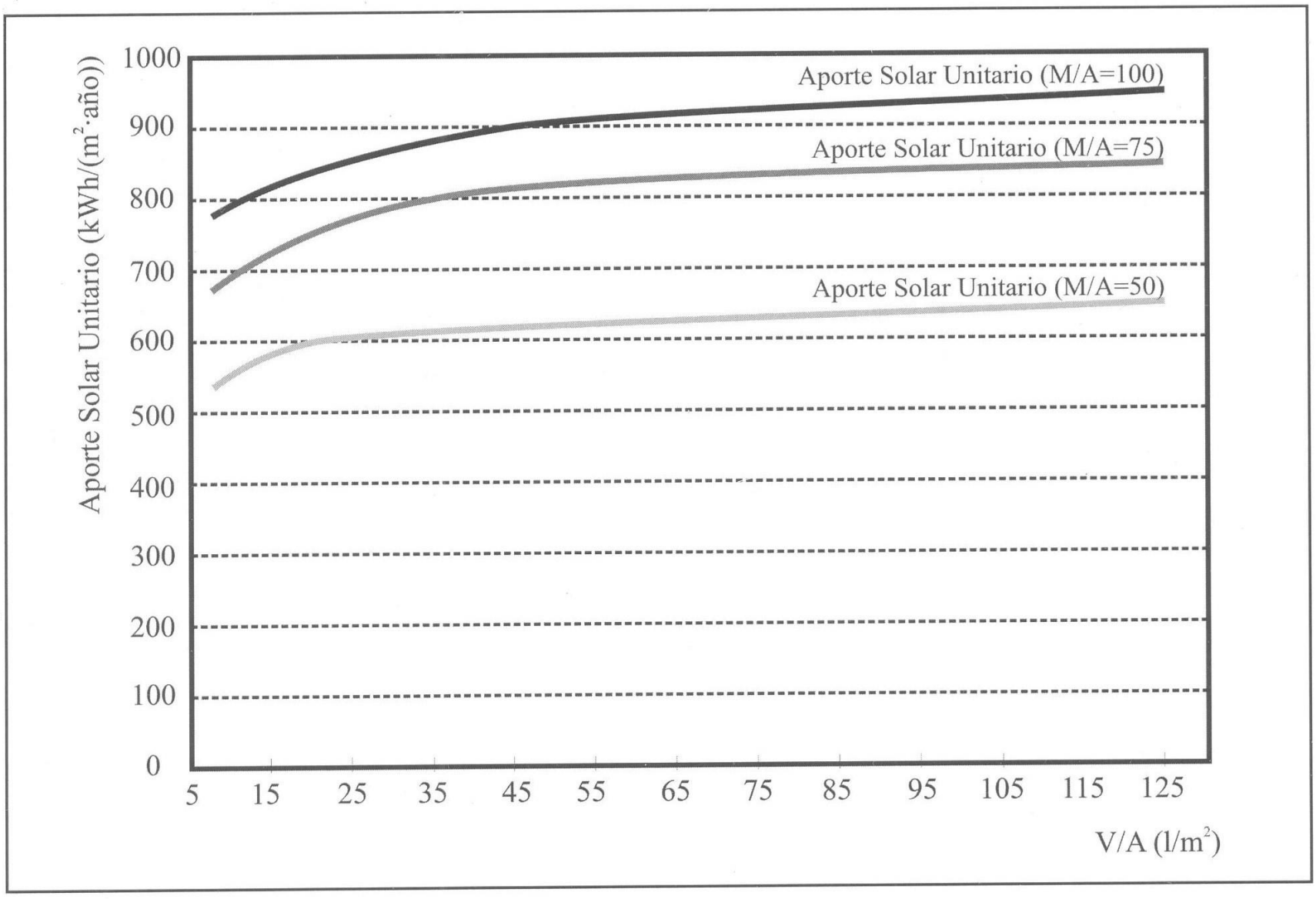


Figura 4.13: Variación del aporte solar unitario con el volumen de acumulación .

Tras analizar las Figuras 4.9 y 4.13 normalmente se recomienda seleccionar un volumen de acumulación de tamaño comercial similar al volumen diario consumido de agua caliente. El rango de valores utilizable para el volumen de acumulación solar corresponde a valores estándar comprendidos entre el consumo diario mínimo y el máximo. En cada caso resultará más apropiado un determinado valor dependiendo de factores tan diversos como *perfiles de consumo, espacio disponible, reutilización de acumuladores existentes*, etc.

Si además de considerar V≈M se trabaja con M/A = 80 l/(m^2.día) habitualmente se consiguen fracciones solares en torno al 70% y rendimientos globales de la instalación del 40%.

e) Influencia de la efectividad del intercambiador

Se observa que al aumentar la efectividad del sistema de intercambio aumenta el rendimiento de la instalación si bien el valor del aumento varía dependiendo de los valores de efectividad considerados. Partiendo de valores bajos de efectividad el aumento de rendimiento es porcentualmente mayor observándose que a partir de valores de efectividad superiores a 0,4 el aumento de rendimiento es muy inferior.

f) Influencia del caudal de circulación

En la Figura 4.15 se observa que existe un caudal de circulación (≈ 20 l/(h.m^2)) para el que se alcanza el rendimiento máximo de la instalación. Este caudal óptimo normalmente se encuentra dentro del rango de caudales denominado de bajo flujo (entre 10 y 20 l/(h.m^2)). Al trabajar con caudales de circulación inferiores existe un riesgo elevado de que descienda considerablemente el rendimiento de la instalación por lo que no se recomienda trabajar con caudales de circulación demasiado bajos. Sin embargo, al aumentar el caudal por encima del valor óptimo el descenso de rendimiento es muy escaso. Por este motivo se recomienda trabajar con caudales de circulación algo superiores al óptimo y así, aunque el rendimiento alcanzado no sea el máximo, se asegure un valor de rendimiento adecuado evitando situaciones de trabajo con rendimientos inferiores al 20%.

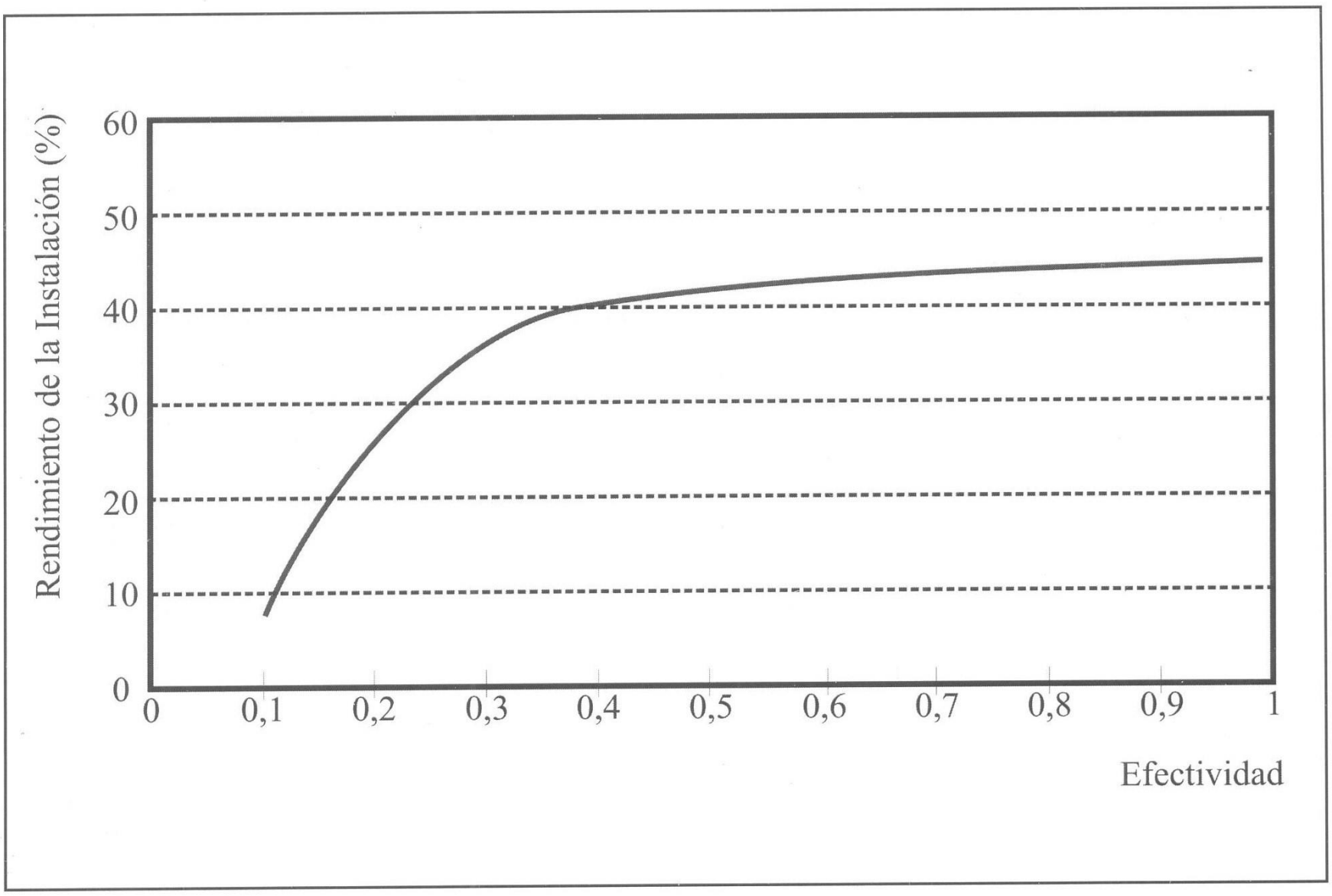


Figura 4.14: Variación del rendimiento con la efectividad del intercambiador.

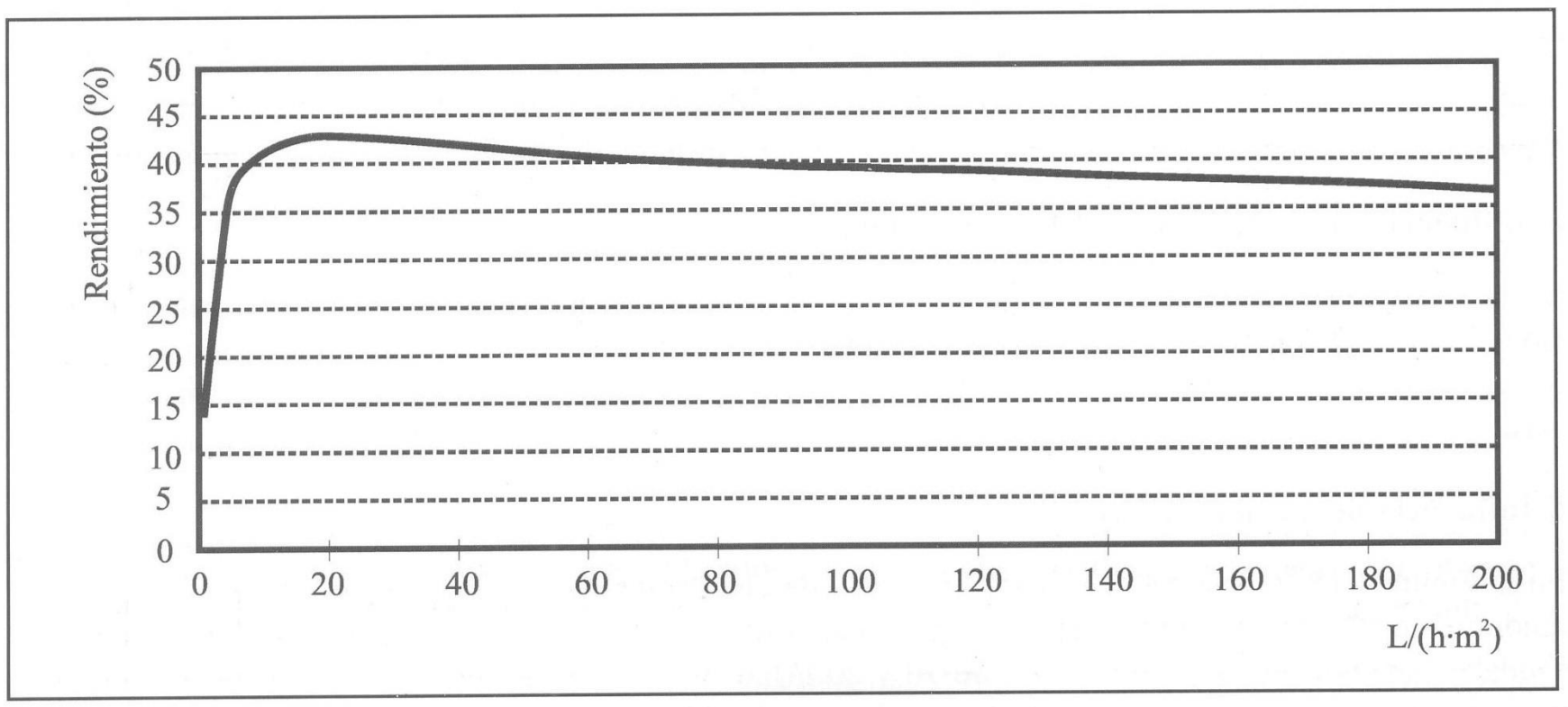


Figura 4.15: Variación del rendimiento con el caudal del circuito primario.

5 EJEMPLO DE CÁLCULO: INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA EN UN HOTEL

Se procede al diseño y cálculo de una instalación solar térmica para satisfacer parte de la demanda de agua caliente sanitaria en un establecimiento hotelero de cuatro estrellas con 375 plazas. Se encuentra situado en Sevilla.

Se selecciona la configuración de la Figura 1.10, es decir con intercambiador solar y con el sistema de acumulación en el circuito de consumo. Debido a que el riesgo de que se produzcan heladas es bajo se emplea como sistema de protección frente a heladas el método de recirculación del fluido del circuito primario, siendo el fluido de trabajo en este caso agua.

El espacio disponible para situar la instalación es la cubierta del hotel. El porcentaje de ocupación mensual se muestra en la siguiente tabla:

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Die
%	70	60	40	50	65	80	100	100	90	40	50	70

Tabla 5.1: porcentaje de ocupación diario medio mensual

Se considera un valor medio de consumo diario de agua caliente a 45 ºC de 80 l/cama por lo que el consumo total diario de agua caliente (C_d), expresado en m^3 por día, es:

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Die
C_d(l/día)	21	18	12	15	19.5	24	30	30	27	12	15	21

Tabla 5.2: Consumo de agua diario medio mensual (m^3/día)

El consumo diario medio anual asciende a 20375 l/día de agua caliente a 45 ºC, siendo el consumo diario máximo de 30000 l/día y el mínimo de 12000 l/día.

5.1 CÁLCULO DE LA DEMANDA DE ENERGÍA

El cálculo de la demanda de energía térmica diaria media mensual se realiza de acuerdo a la ecuación 4.1. Se emplean los valores de consumo diarios medios mensuales indicados en la Tabla 5.2, de temperatura de agua fría de entrada de la Tabla 5.3, considerándose que el valor de la temperatura de uso es de 45ºC.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Die
10	11	12	13	14	15	16	16	15	13	11	10

Tabla 5.3: Temperatura diaria media del agua fría de entrada (°C)

Los valores de la demanda de energía diaria media mensual, expresados en MJ/día, se muestran en la siguiente tabla:

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Die
Demanda	3072	2558	1655	2006	2527	3010	3637	3637	3386	1605	2132	3072

Tabla 5.4: Demanda de energía (MJ/día)

En la Figura 5.1 se representa el consumo diario medio de agua caliente y la demanda diaria media mensual de energía térmica (curva de demanda)

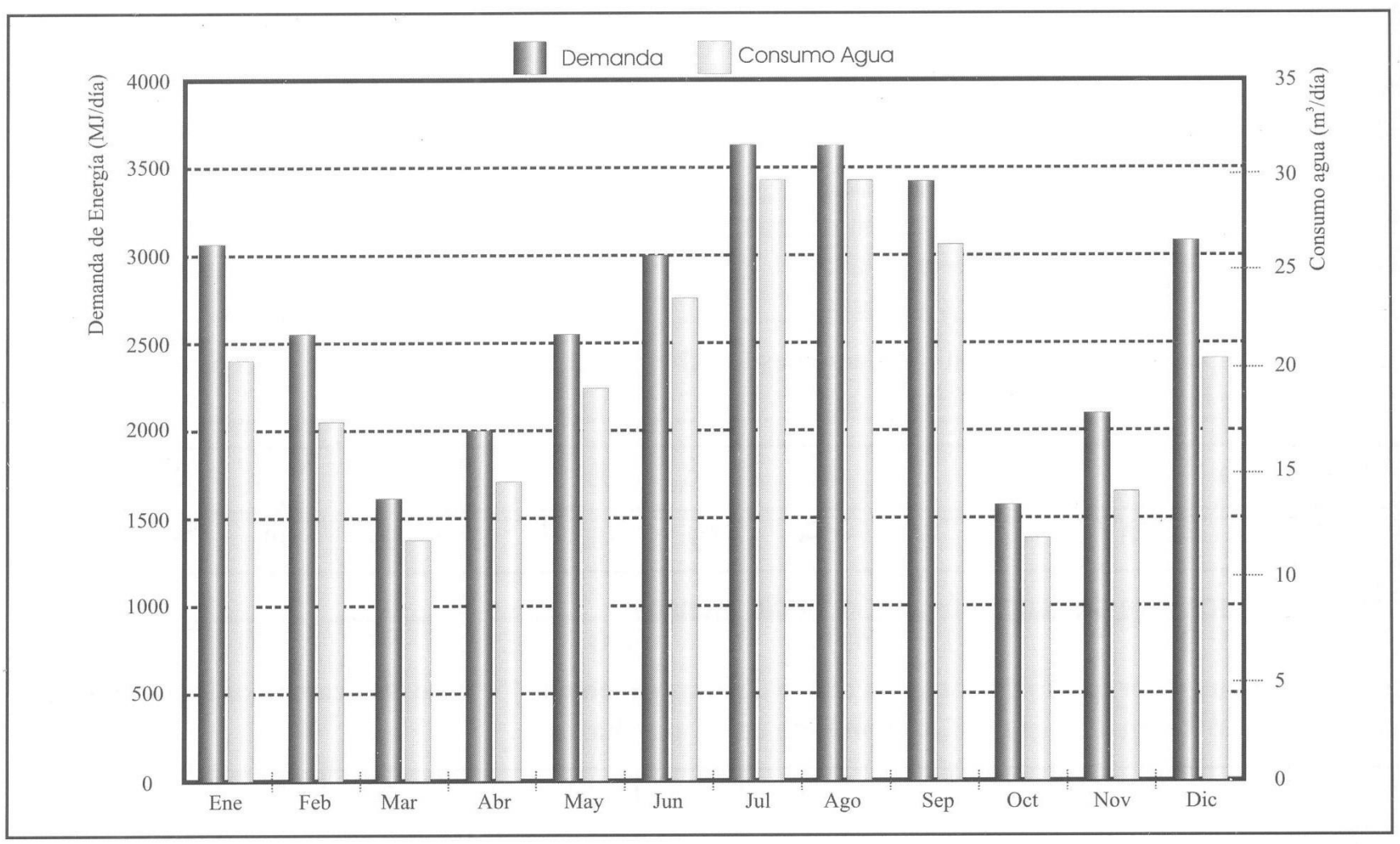


Figura 5.1: Evolución del consumo y de la demanda diaria media mensual de energía.

5.2 ESTIMACION DEL AREA

Se realiza una primera estimación del área de captación en base a la expresión:

$$A = \frac{D_{ACS} \cdot FS}{H_G \cdot \eta}$$

Se consideran los siguientes aspectos:

- Se toma como consumo diario (M) de agua caliente a 45 °C el valor del consumo diario medio anual (20375 1/día).
- La temperatura media anual de agua fría de aporte igual a 13 ºC (media aritmética de los valores de la Tabla 5.3).
- Se desea obtener una fracción solar anual en torno al 70%.
- Se estima un rendimiento medio de la instalación del 40%.
- La irradiación solar diaria media anual asciende a 18,92 MJ/(m^2.día) (Tabla 5.5).

Por tanto: A = 252,4 m^2

De forma similar se puede realizar una segunda estimación del área de captadores solares considerando como consumo diario de agua caliente a 45 ºC (M) el valor del consumo diario medio anual (20375 l/día) y el valor de la relación M/A en tomo a 80 l/m^2. Por tanto:

$$\frac{M}{A} = \frac{80 litros}{m^2}; A = \frac{20375}{80}; A = 254{,}7 m^2$$

Para decidir el número de captadores debe tenerse en cuenta no sólo el área total y el área unitaria sino también aspectos relacionados con su posterior conexión. Los captadores se agrupan generalmente formando baterías de entre 3 y 6 captadores cada una, pero siempre iguales dentro de una misma instalación. Es aconsejable realizar este tipo de comprobaciones en este momento antes de decidir el número de captadores a instalar.

En este caso, considerando que el área del captador empleado es de 2 m^2, se utilizan 5x5x5 = 125 captadores x 2 m^2/captador = 250 m^2.

5.3 CÁLCULO DE LAS PRESTACIONES ENERGÉTICAS

a) Orientación e inclinación de los captadores

El edificio principal del hotel, sobre cuya cubierta se va a realizar la instalación es un edificio rectangular con el lado corto desviado del sur 22,5º en dirección oeste. Al alinearse los captadores solares con las líneas principales del edificio, que de forma simplificada se considera como criterio básico para conseguir una orientación adecuada desde el punto de vista arquitectónico, los captadores quedan desviados 22,5º respecto del sur.

En cuanto a la inclinación, en este caso no existe ninguna restricción desde el punto de vista arquitectónico. Para elegir la inclinación óptima desde el punto de vista energético, se ha de considerar el perfil de la curva de demanda de energía. En este caso se puede observar que la demanda es máxima en los meses de verano aunque con valores parecidos a los que se tienen en invierno, por lo que se hará la evaluación de las prestaciones energéticas con una inclinación del campo de captadores de 45º.

b) Prestaciones energéticas

Las prestaciones energéticas obtenidas mediante la aplicación del método de cálculo f-chart con los siguientes valores se muestran en la Tabla 5.5.

Área de captadores solares: 250 m^2

Factor de ganancia del captador solar: 0,77

Factor lineal de pérdidas del captador: 7,40 W/(m^2.K)

Volumen de acumulación: 20000 l (Se ha seleccionado un volumen de acumulación aproximadamente del orden de la carga de consumo diaria promedio).

	Irradiación (MJ/m^2.día)	Temperatura ambiente (ºC)	Demanda (MJ/día)	Aporte solar (MJ/día)	Aporte apoyo (MJ/día)	Fracción solar (%)
Enero	**13,49**	**10,7**	**3072**	**1.358**	**1715**	**44,2**
Febrero	**15,53**	**11,7**	**2558**	**1.502**	**1056**	**58,7**
Marzo	**20,23**	**13,5**	**1655**	**1.538**	**118**	**92,9**
Abril	**20,34**	**15,4**	**2006**	**1.735**	**271**	**86,5**
Mayo	**22,07**	**18,7**	**2527**	**2.102**	**425**	**83,2**
Junio	**22,47**	**22,3**	**3010**	**2.330**	**680**	**77,4**
Julio	**23,39**	**25,6**	**3637**	**2.610**	**1027**	**71,8**
Agosto	**22,96**	**25,8**	**3637**	**2.571**	**1066**	**70,7**
Septiembre	**21,33**	**23,3**	**3386**	**2.338**	**1047**	**69,1**
Octubre	**17,77**	**18,7**	**1605**	**1.428**	**177**	**89,0**
Noviembre	**15,19**	**14,1**	**2132**	**1.415**	**717**	**66,4**
Diciembre	**12,09**	**11,1**	**3072**	**1.192**	**1880**	**38,8**
Media anual	**18,92**	**17,6**	**2691**	**1.843**	**848**	**68,5**

Tabla 5.5: Resultados del análisis para A=250 m^2.

En este caso la fracción solar asciende al 68,5%, valor cercano al objetivo establecido inicialmente del 70%. Esta reducción de la fracción solar puede ser debida a la elección de un área de captación solar ligeramente inferior al valor inicialmente estimado, empleo de un captador solar con un valor menor del factor de ganancia y/o mayor valor del coeficiente de pérdidas térmicas, etc. El rendimiento de la instalación solar es del 39%.

La diferencia entre la demanda de energía anual (273053 kWh) y la energía aportada por la instalación solar (187055 kWh/año) ha de ser suministrada por el sistema de apoyo. La cantidad de energía aportada al consumo por metro cuadrado de captador solar (aporte solar unitario) asciende aproximadamente a 748 kWh/año.

En la Figura 5.2 se muestra la evolución mensual del aporte solar y de la demanda de energía. Se observa que el aporte solar no llega a satisfacer la totalidad de la demanda durante ningún mes del año aunque sí queda cerca en varios meses. Esta situación es bastante recomendable ya que la instalación solar aporta una cantidad significativa de la demanda de energía anual (68,5%) y no deja de aprovecharse la energía generada por la instalación solar durante ninguna época del año.

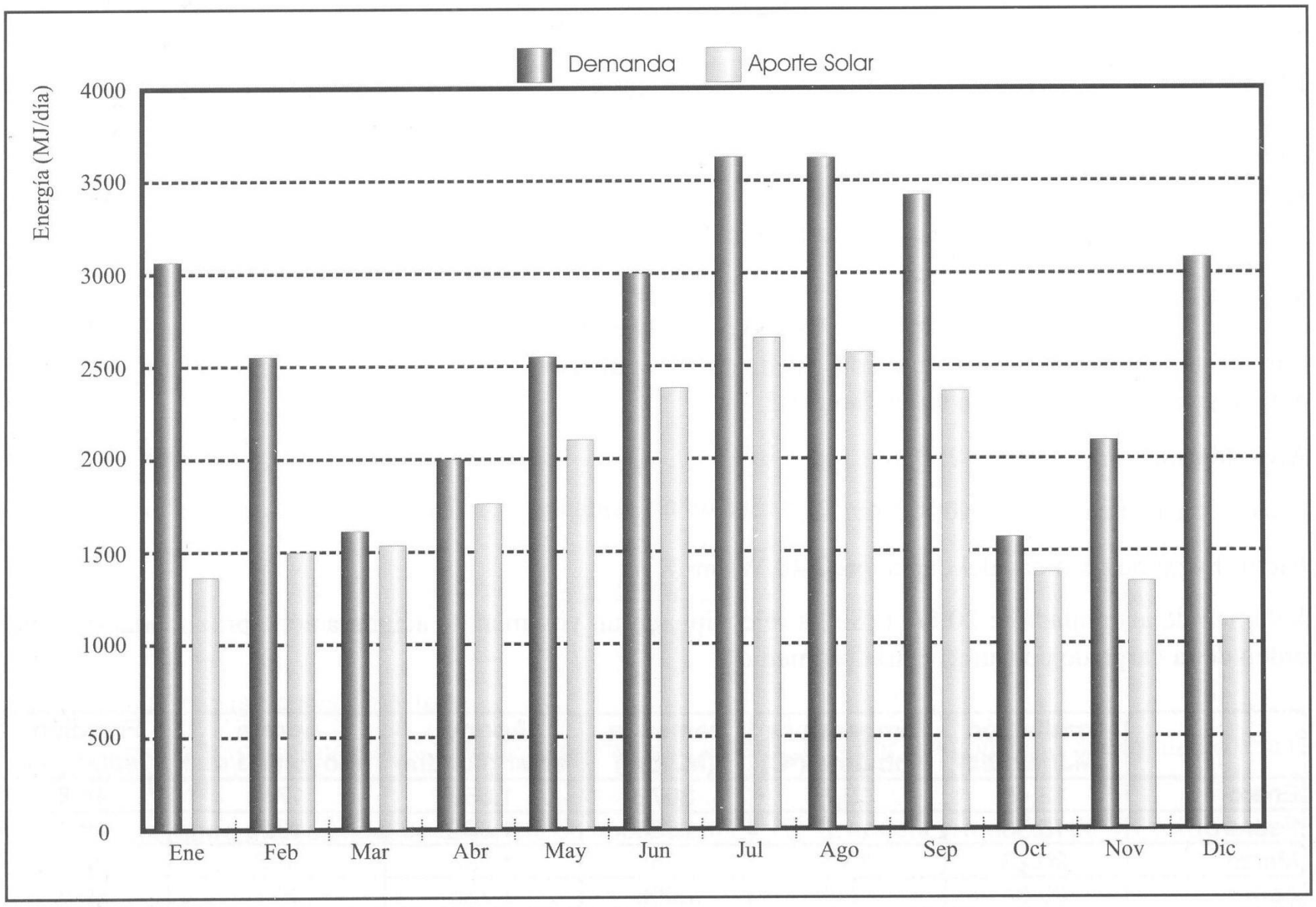


Figura 5.2: Demanda de energía térmica y aporte solar mensual para A=250 m^2.

a) Efectos de la variación del área de captación solar

En caso de utilizar 350 m^2 de captadores solares (M/A≈58 l/m^2), los resultados aportados por el método de cálculo indican que la fracción solar anual asciende al 80% si bien el aporte solar unitario es menor (aproximadamente 624 kWh/(m^2.año)). En este caso, al aumentar el área de captación un 40% el aporte de energía solar al consumo experimenta un aumento inferior al 20%. El rendimiento de la instalación solar desciende hasta el 32,5%.

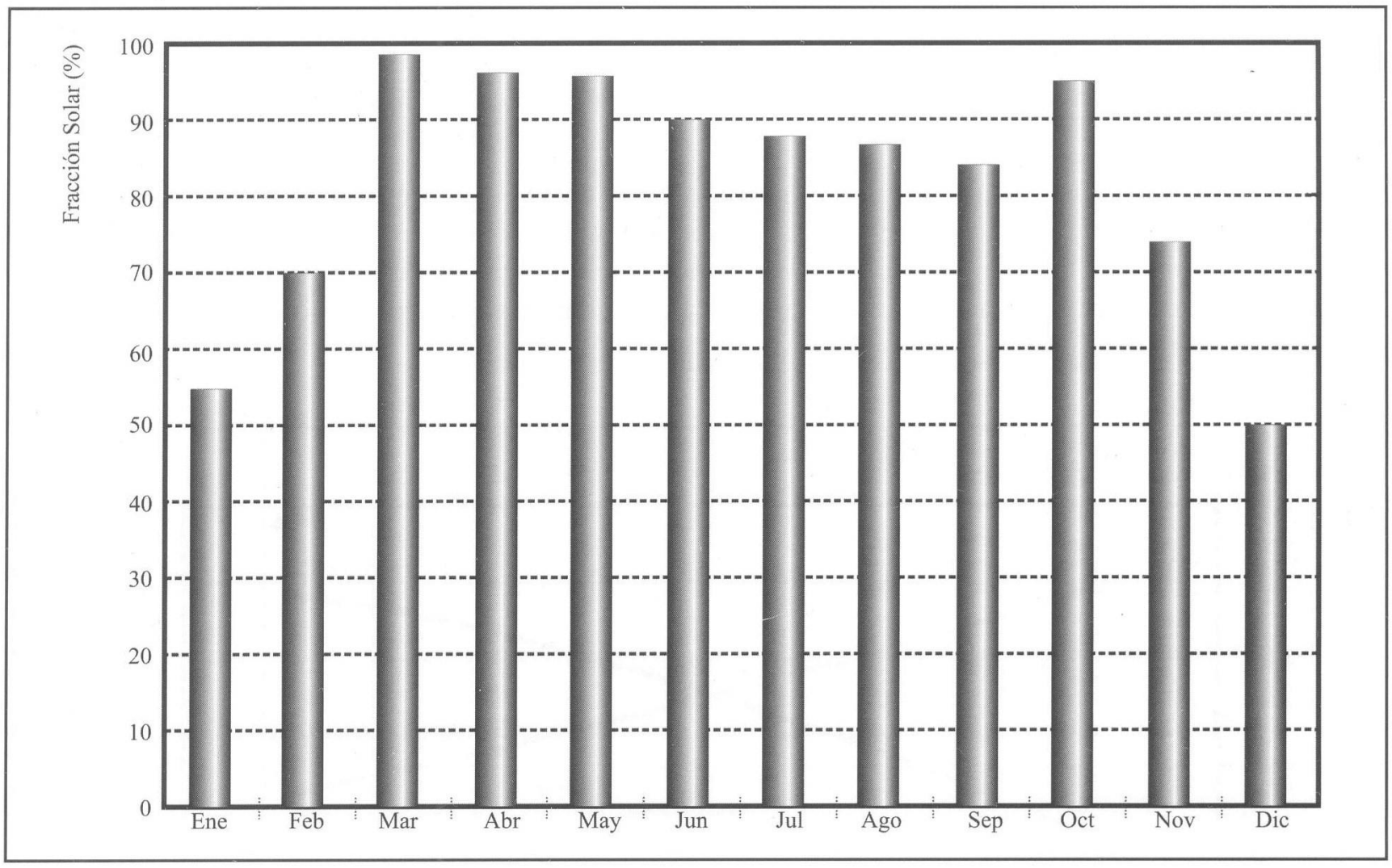


Figura 5.3: Demanda de energía térmica y aporte solar mensual para A=350 m².

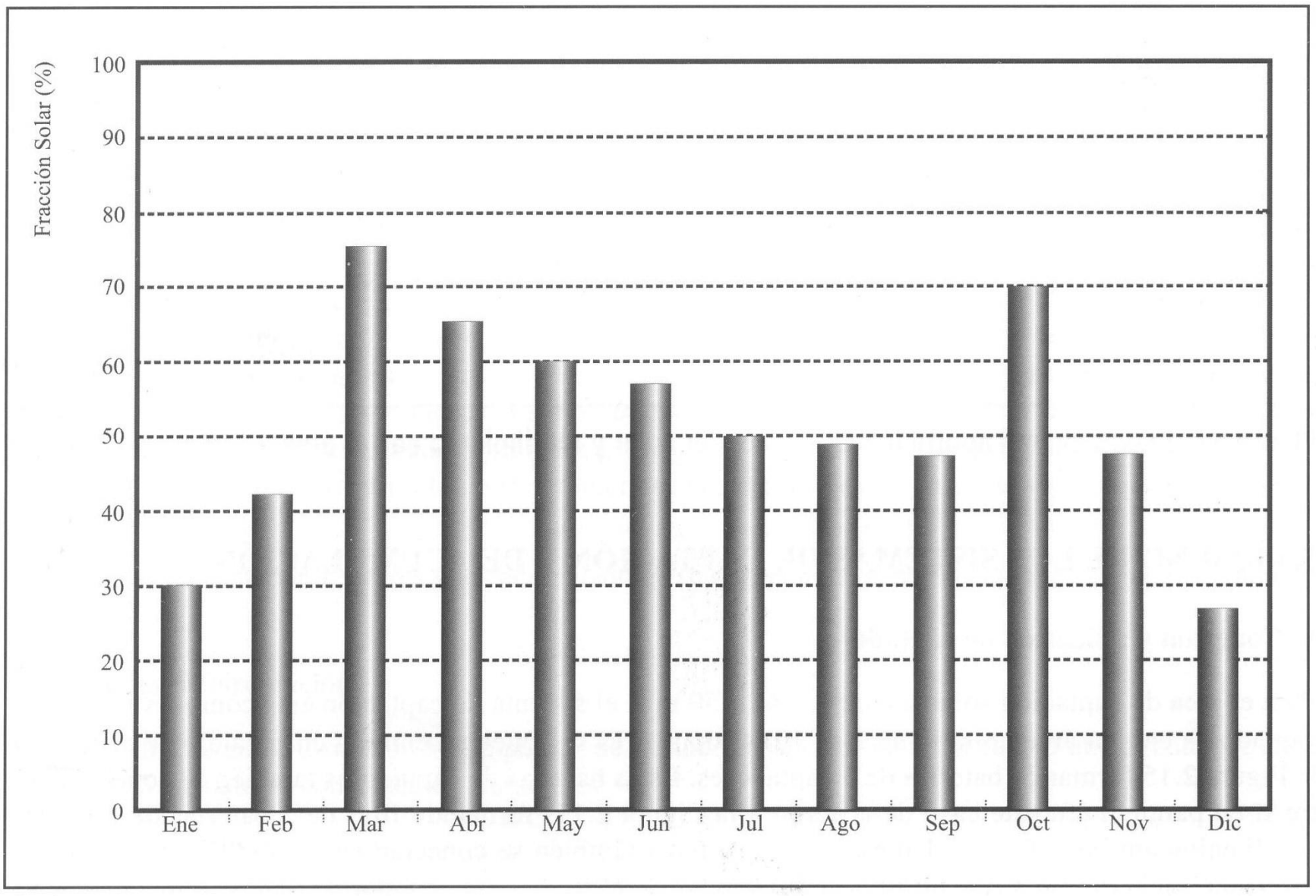


Figura 5.4: Fracción solar mensual para A=150 m².

En caso de utilizar 150 m^2 de captadores solares la fracción solar anual hubiese descendido hasta el 49,6% si bien el aporte solar unitario rondaría los 900 kWh/(m^2.año) y el rendimiento aumentaría al 47%. Para este caso, en la Figura 5.4 se muestra la evolución de las fracciones solares mensuales.

En la Figura 5.5 se representa la variación del aporte solar unitario, de la fracción solar y del rendimiento de la instalación con el área de captación solar. Evidentemente, manteniendo constantes el resto de parámetros, al aumentar el área de captación aumenta la cantidad de energía total aportada por la instalación y, por tanto, la fracción solar. Sin embargo, el aporte solar unitario y el rendimiento disminuyen.

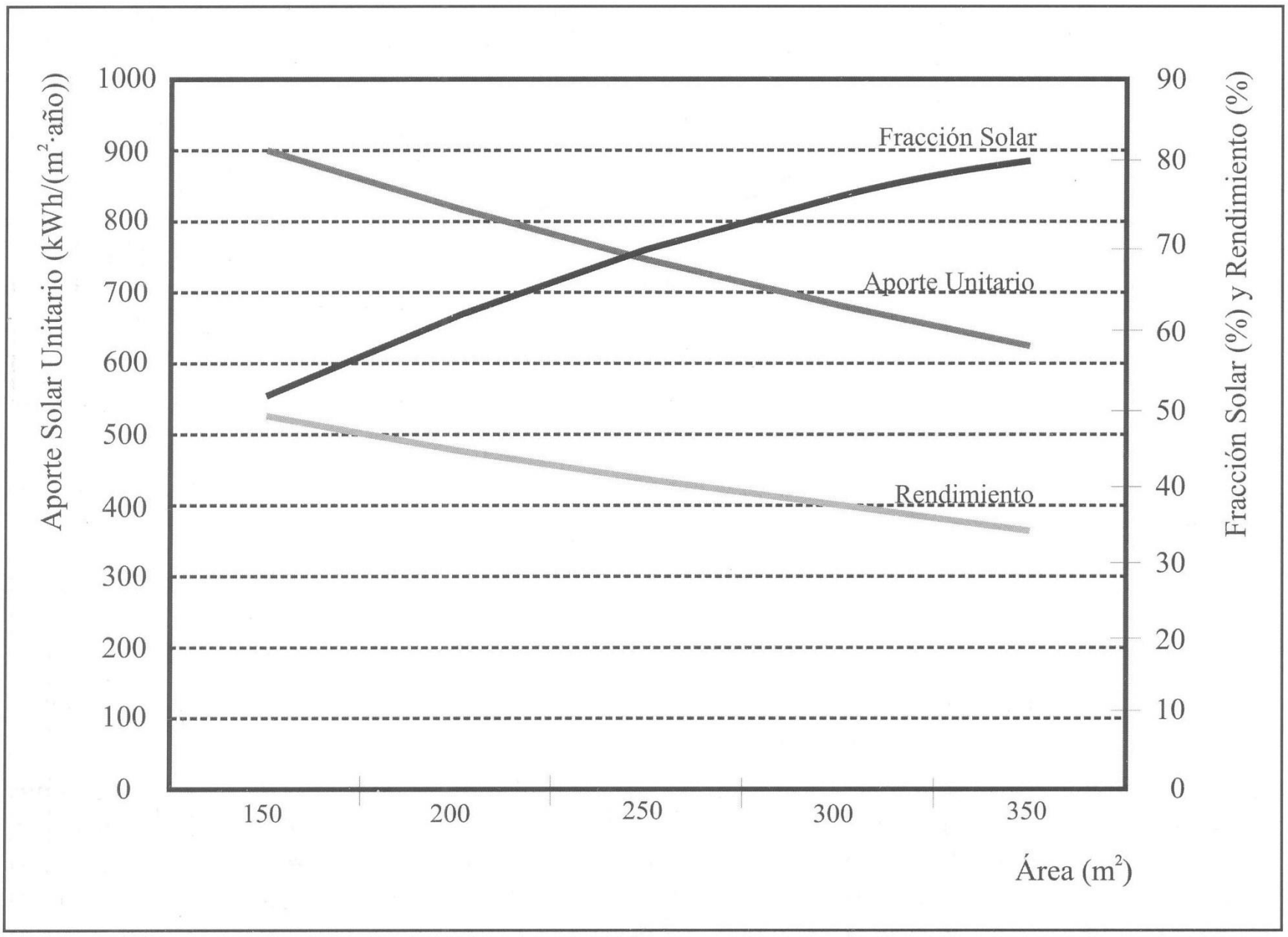


Figura 5.5: Evolución del aporte unitario, fracción solar y rendimiento con el área

5.4 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y DE ACUMULACIÓN

a) Conexión y ubicación de captadores

Para el área de captación solar seleccionado (250 m^2), el sistema de captación está compuesto por 125 captadores con un área unitaria de 2 m^2. Los captadores se conectan entre sí en paralelo de acuerdo a la Figura 2.15 formando baterías de 5 captadores. Estas baterías de captadores también se conectan entre sí en paralelo (en este caso de acuerdo a la Figura 2.17) formando filas de 5 baterías de captadores. Finalmente las 5 filas de baterías de captadores también se conectan en paralelo entre sí con ida invertida. En la Figura 5.6 se observa cómo quedan distribuidos los captadores solares sobre la cubierta del edificio.

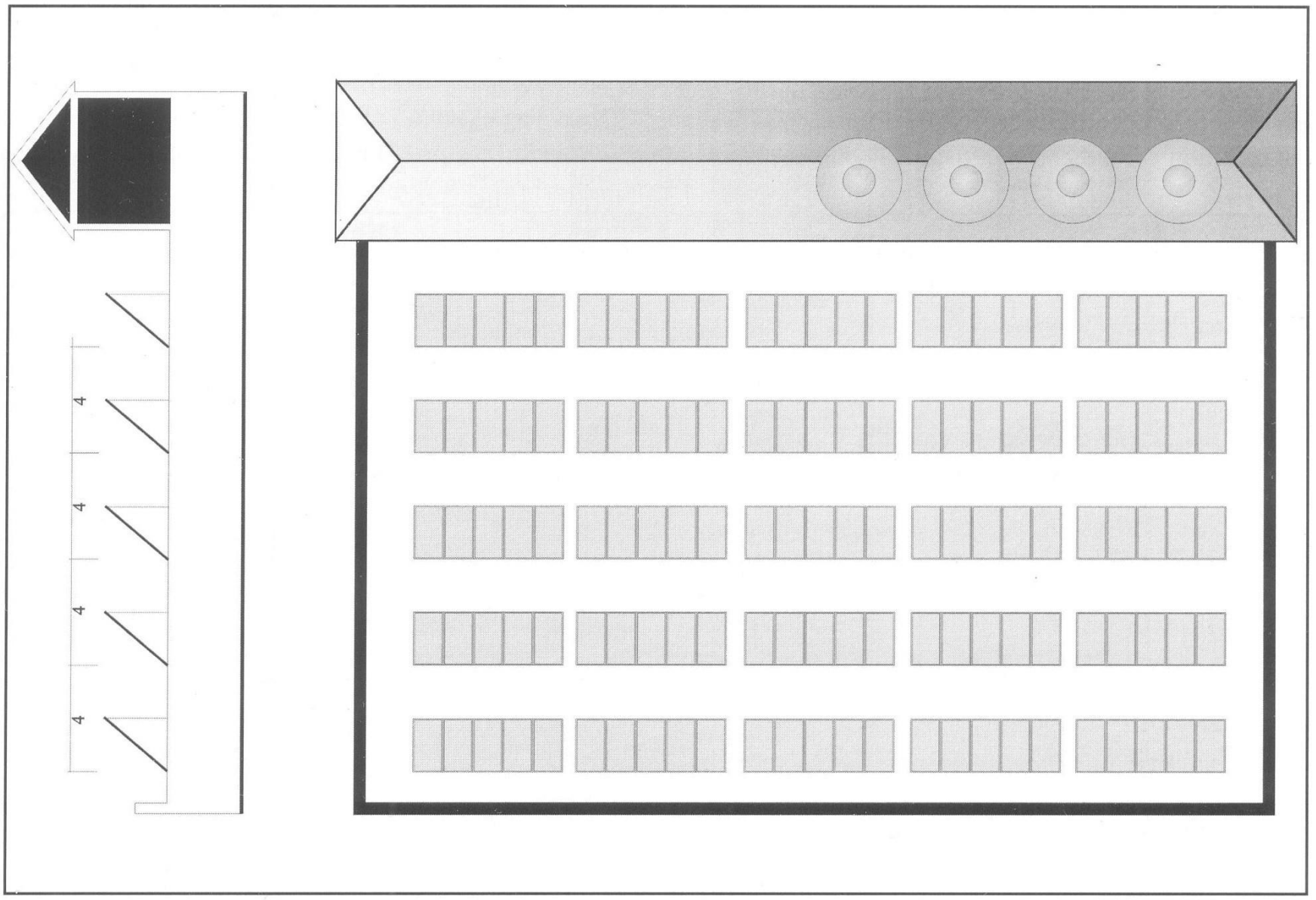


Figura 5.6: Ubicación de los captadores solares en la cubierta del hotel.

b) Conexión de acumuladores

Se utilizan 4 acumuladores de 5000 litros cada uno conectados en serie invertida con el circuito de consumo con objeto de obtener un nivel de estratificación térmica adecuado.

La sonda de temperaturas, situada en el sistema de acumulación, que conjuntamente con la sonda situada en el sistema de captación solar activa o desactiva el funcionamiento de las bombas de circulación del circuito primario y secundario se encuentra colocada en la parte inferior del acumulador "más frío" o aquel que incorpora la conexión a la tubería de entrada de agua fría procedente de la red de distribución. Sin embargo, la sonda que sirve de protección frente a la temperatura máxima que soportan los acumuladores se sitúa en la parte superior del acumulador "más caliente" o aquel al que se encuentra directamente conectada la tubería del circuito de distribución hacia los puntos de consumo.

Las baterías de captadores solares y los acumuladores se conectan de acuerdo con el esquema mostrado en la Figura 5.7.

c) Caudales de circulación

Se utiliza un caudal de diseño de 50 l/h por m^2 de captador solar. Por tanto, el caudal que circula por cada batería de 5 captadores conectada en paralelo es:

$$Q_{batería} = 50\frac{l}{m^2 \cdot h} \cdot 2m^2 \cdot 5\ captadores = 500\frac{l}{h}$$

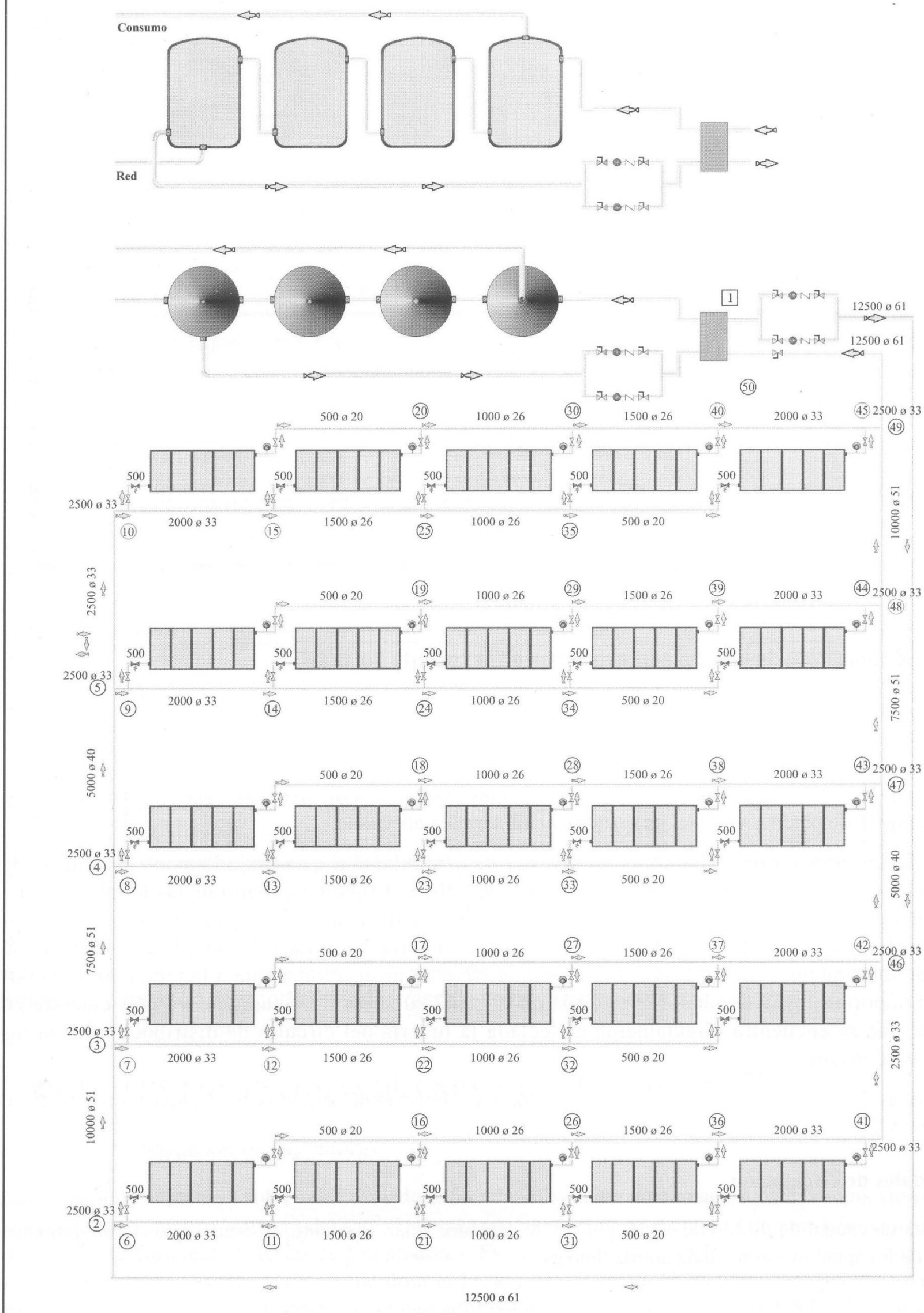
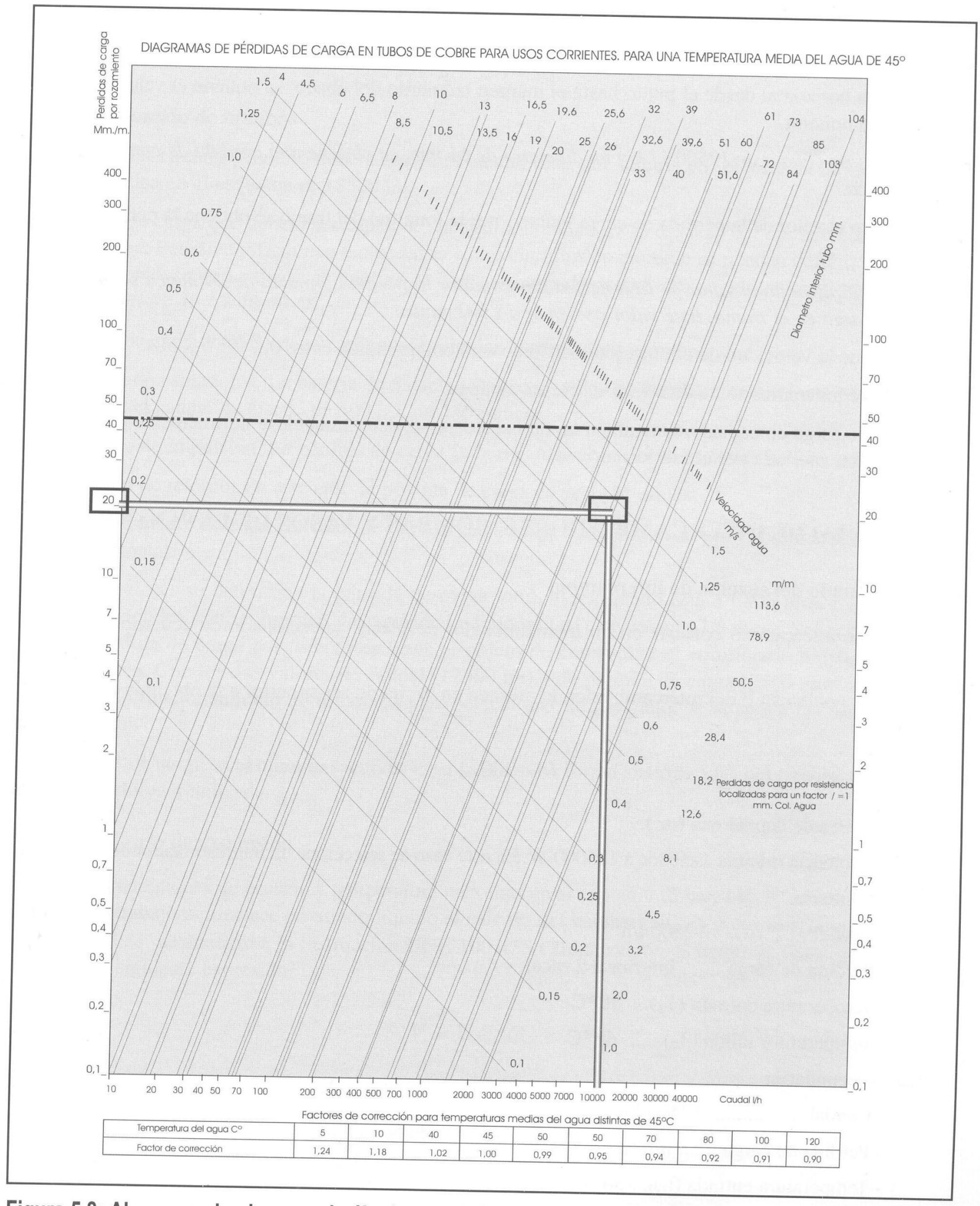


Figura 5.7: Distribución de captadores y acumuladores.

d) Selección de los diámetros de tuberías

Para finalizar el cálculo del circuito hidráulico falta determinar el diámetro de cada tramo de tubería. Para ello se establece que la pérdida de carga por metro lineal de tubería no supere los 40 mmca y que la velocidad del fluido sea superior a 0,3 m/s e inferior a 2 m/s (locales interiores) o a 3 m/s (tuberías por el exterior). Se procederá de la manera siguiente para determinar el diámetro de tubería de cada tramo. Para cada tramo, se entra en el ábaco correspondiente con el caudal Q del tramo de tubería.

Ejemplo: por el tramo 1-2 circula un caudal de 12500 l/ h



Temperatura del agua Cº	5	10	40	45	50	50	70	80	100	120
Factor de corrección	1,24	1,18	1,02	1,00	0,99	0,95	0,94	0,92	0,91	0,90

Figura 5.8: Abaco empleado para el cálculo de pérdidas de carga.

Trazando una vertical, se elige el menor diámetro comercial cuya pérdida de carga sea menor de 40 mmca.

Ejemplo: con un caudal de 12500 l/ h el menor diámetro con pérdida de carga lineal menor que 40 mmca. es de 61 mm de diámetro interior

Trazando una horizontal desde el punto hasta el margen izquierdo del ábaco, se obtiene el valor de la pérdida de carga unitaria.

Ejemplo: con un caudal de 12500 l/h y un diámetro de 61 mm, se obtiene una pérdida de carga lineal de unos 24 mmca.

Multiplicando el valor de la pérdida de carga unitaria por la longitud del tramo se obtiene la pérdida de carga del tramo.

Ejemplo: multiplicando el valor de la longitud de 65 m por la pérdida unitaria de 24 mmca se obtiene la pérdida de carga en el tramo. Este valor asciende a 1300 mmca

Se verifica que la velocidad de circulación del fluido está comprendida entre 0,3 y 2 o 3 m/s. En el resto de los tramos se ha de operar de forma análoga.

La pérdida de carga en captadores también ha de considerarse, determinándose normalmente en base a la documentación aportada por el fabricante.

5.5 CÁLCULO DE INTERCAMBIADORES, BOMBAS Y VASOS DE EXPANSIÓN

a) Dimensionado del sistema de intercambio

El sistema de intercambio consiste en un intercambiador de placas seleccionado de acuerdo con los siguientes valores:

- Potencia. La potencia P del intercambiador, expresada en W, ha de ser superior a la obtenida mediante la expresión:

$$P = 500 \cdot A$$

siendo A el área de captadores (m^2).

Por tanto la potencia mínima asciende a 125000 W. En este caso se selecciona un intercambiador de 145000 W.

- Circuito primario:
  - Caudal 12500 l/h
  - Pérdida de carga inferior a 2 mca.
  - Temperatura entrada (T_1) 50 ºC
  - Temperatura salida (T_2) 40 ºC
- Circuito secundario:
  - Caudal 12500 l/h
  - Pérdida de carga inferior a 2 mca.
  - Temperatura entrada (t_1) 36 ºC
  - Temperatura salida (t_2) 46 ºC

Estos valores cumplen los requisitos exigidos en cuanto a:

1. la potencia máxima transferida desde el sistema de captación

$$P_{diseño} = 145000\ W \geq 500\ Ac = 500 \cdot 250 = 125000\ W$$

2. la efectividad (ε), de acuerdo con los caudales y saltos térmicos requeridos, es:

$$\varepsilon = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{46 - 36}{50 - 36}$$

b) Dimensionado de bombas

La bomba del circuito primario deberá mover el caudal total que circula por el sistema de captación, que como se indica en el esquema es 12500 l/h.

La pérdida de carga que deberá ser capaz de superar la bomba será la del lazo del circuito con mayor pérdida de carga. Podrán configurarse tantos lazos como circuitos en paralelo se puedan definir; a los efectos de este ejemplo, se va a calcular la pérdida de carga a través del lazo formado por los siguientes puntos: 1-2-6-16-26-36-41-46-47-48-49-50.

La pérdida de carga total del lazo está constituida por la suma de la correspondiente a:

- Batería de captadores. La batería de 5 captadores conectados en paralelo presenta una pérdida de carga para el caudal de diseño de 500 1/ h de 160 mmca.
- Circuito de impulsión. La pérdida de carga (tuberías más accesorios) asciende a 2277 mmca.
- Circuito de retorno. En este caso la pérdida de carga es de 1474 mmca.
- Intercambiador de calor. El valor de la pérdida de carga viene indicado por el fabricante (en este caso 1895 mmca).

Con estos valores se determina la pérdida de carga total, ascendiendo ésta a 6806 mmca que habitualmente se redondea con un margen de seguridad adicional (en este caso, a 7,5 mca). Se recomienda calcular la pérdida de carga por diferentes lazos al objeto de comprobar el equilibrado hidráulico del circuito primario. Con los dos valores de caudal (12500 l/h) y de pérdida de carga (7500 mmca) se entra en las curvas de funcionamiento de la bomba para seleccionar la que mejor se adapte a las necesidades de la instalación.

Las pérdidas de carga en el circuito secundario se calculan de forma análoga a las del circuito primario, según la metodología indicada.

Cálculo del vaso de expansión

Si bajo las condiciones de presión y temperatura máximas en el captador (5 bar, 140 ºC en esta instalación) el fluido de trabajo permanece en estado líquido el cálculo del volumen útil (V_t) del vaso de expansión cerrado se realiza, de acuerdo a la instrucción UNE 100-155 Climatización: Cálculo de vasos de expansión, mediante la siguiente expresión.

$$V_t = V \cdot C_e \cdot C_p \qquad \textbf{Ecuación 5-1}$$

siendo:

V: Contenido total del fluido de trabajo en el circuito (l)

C_e: Coeficiente de expansión del fluido

C_p: Coeficiente de presión

La cantidad de fluido contenido en el circuito primario corresponde a la cantidad de agua en tuberías (403 l), captadores (375 l) e intercambiador (1 l). En este caso V=779 l.

El coeficiente de expansión térmica C_e depende del tipo de fluido y de los valores de temperatura máxima y mínima que puede alcanzar el fluido en la instalación. Considerando que el fluido utilizado es agua y que las temperaturas mínima y máxima se encuentran en torno a 0 ºC y 140 ºC respectivamente, el valor de C_e es aproximadamente de 0,07.

En caso de que se hubiese empleado una mezcla de agua con fluido anticongelante habría que corregir este término debido a la mayor expansión térmica que presentan los fluidos anticongelantes.

El coeficiente de presión C_p se calcula mediante la expresión:

$$C_p = \frac{P_{max}}{P_{max} - P_{min}}$$ **Ecuación 5-2**

siendo P_{max} y P_{min} las presiones máximas y mínimas que se pueden alcanzar en el vaso de expansión. Ambos términos de presión se expresan en valores absolutos.

En este ejemplo se considera que la presión mínima absoluta en los captadores solares (punto más alto de la instalación) es de 1,5 bar. Al ser este valor superior a la presión atmosférica se evita la entrada de aire en el interior del circuito. Se ha de verificar que no se pueden producir fenómenos de cavitación en la aspiración de la bomba.

También se considera que el vaso de expansión se encuentra situado a una cota 12 metros inferior a la de los captadores solares. Por tanto, P_{min}=2,7 bar.

La presión máxima P_{max} ha de ser ligeramente inferior al valor de la presión de tarado de la válvula de seguridad (P_{vs}), normalmente $P_{max} \approx 0{,}9 \cdot P_{vs}$. Esta presión de tarado ha de ser inferior a la menor de las presiones máximas de trabajo de los distintos elementos del circuito (normalmente corresponde a los captadores solares), dependiendo su valor también de la posición relativa del vaso de expansión. En este caso considerando que la presión máxima que soportan los captadores es de 5 bar y que éste es el componente crítico en términos de presión, la presión de tarado P_{vs} asciende a 6,2 bar. Por tanto, la presión máxima en el vaso de expansión es 5,6 bar y C_p es igual a 1,93.

Aplicando la Ecuación 5-1 el volumen útil del vaso de expansión asciende a 105,3 l. Se ha de seleccionar un vaso de expansión de tamaño estándar superior, en este caso por ejemplo de 120 l de volumen útil.