

Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial

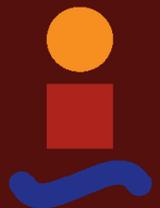
Viabilidad de instalaciones solares térmicas para
calefacción, refrigeración y ACS en España

Autor: Antonio Jesús González Márquez

Tutor: Isidoro Lillo Bravo

Dep. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial

Viabilidad de instalaciones solares térmicas para calefacción, refrigeración y ACS en España

Autor:

Antonio Jesús González Márquez

Tutor:

Isidoro Lillo Bravo

Doctor Ingeniero Industrial

Dep. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2017

Proyecto Fin de Carrera: Viabilidad de instalaciones solares térmicas para calefacción, refrigeración y ACS en España

Autor: Antonio Jesús González Márquez

Tutor: Isidoro Lillo Bravo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

A mi tutor, Isidoro Lillo, por su apoyo durante la realización de este proyecto.

A mi familia y a mis amigos por animarme en todo momento.

A Rocio por estar siempre a mi lado.

Resumen

De entre las diferentes tecnologías de aprovechamiento energético renovables, la energía solar es una de las más desarrolladas y una de las más utilizadas a nivel mundial. La gran disponibilidad del recurso solar lo hacen una apuesta de futuro muy interesante a la hora de buscar una fuente de energía limpia e inagotable.

La energía solar térmica de baja temperatura constituye una forma fiable y eficiente de producción de calor a partir de la luz solar. La integración de estas instalaciones para autoconsumo en las viviendas supone un paso adelante en la búsqueda de la autosuficiencia en edificación, sin embargo, hasta ahora estas se han limitado casi exclusivamente a la generación destinada al consumo de ACS. Las tecnologías de climatización solar pueden utilizar esta energía en el acondicionamiento térmico de edificios permitiendo que las instalaciones alcancen un alto grado de aprovechamiento durante todo el año y abriendo nuevas opciones con un alto potencial a la hora de reducir la dependencia energética.

Este proyecto analiza el estado actual de este tipo de tecnologías a fin de contemplar el uso de instalaciones solares térmicas de baja temperatura como fuente para satisfacer la demanda de climatización en edificios residenciales en las diferentes ciudades de España.

Abstract

Among all renewable energy technologies, solar energy is one of the most developed and one of the most widely used in the world. The great availability of the solar resource makes it a very interesting strategy for the future when looking for clean and sustainable energies.

Low temperature solar thermal energy is a reliable and efficient way to produce heat from sunlight. The integration of these systems for self-consumption in buildings makes a step forward in the research for energy self-sufficiency in the construction sector. However, these systems have been almost exclusively destined so far to the consumption of Domestic Hot Water (DHW)

Solar air conditioning technologies can use the thermal energy in the conditioning of buildings allowing energy efficient installations throughout the year and providing brand new options with high potential for reducing energy dependence.

This project analyzes the current state of this type of technology in order to contemplate the use of low temperature solar thermal installations as a source to meet the demand for air conditioning in residential buildings in the different cities of Spain.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	¡Error! Marcador no definido.iii
Índice	xv
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xvii
1. Introducción	1
2. Objeto del Proyecto	2
3. Revisión bibliográfica	3
3.1. Energía solar térmica	3
3.2. Energía solar térmica de baja temperatura	6
3.2.1. Aplicaciones de la energía solar térmica de baja temperatura	8
3.3. Instalaciones de ACS y climatización	9
3.4. Refrigeración solar	10
3.4.1. Sistemas basados en transformación de calor	11
3.4.2. Sistemas termomecánicos	22
3.5. Conclusiones de la revisión bibliográfica	26
4. Metodología.	27
4.1. Introducción	27
4.1.1. Definición de parámetros	27
4.2. Metodología	28
4.2.1. Hipótesis	28
4.2.2. Caracterización de la demanda energética	29
4.2.3. Caracterización de la energía producida	39
4.2.4. Cálculo de AFSC	44
4.2.5. Correlación entre parámetros de la instalación solar	49
5. Estimación económica y ambiental	56
5.1. Estimación de costes económicos	56
5.2. Comparativa con otras fuentes de energía	60
5.3. Análisis de sensibilidad	63
5.4. Emisiones de CO ₂ evitadas	66
6. Conclusiones	68
7. Bibliografía	69
8. Anexo : Áreas AFSC	70

Índice de Tablas

- Tabla 3.1: Características de máquinas de absorción
- Tabla 3.2: Características de las máquinas de adsorción
- Tabla 3.3: Estudios experimentales. Refrigeración por ciclo de Rankine
- Tabla 3.4: Estudios experimentales. Refrigeración por eyector
- Tabla 3.5: Resumen de tecnologías de refrigeración solar
- Tabla 4.1: Demanda anual en bloques de viviendas
- Tabla 4.2: Ponderación de demanda para el día 1 de enero en Sevilla
- Tabla 4.3: Demanda mensual de ACS en Sevilla
- Tabla 4.4: Radiación mensual en varias ciudades
- Tabla 4.5: Energía producida mensualmente en varias ciudades
- Tabla 4.6: Datos de demanda y producción en Sevilla
- Tabla 4.7: Cálculo de AFSC. Inclinación de captadores Latitud -15°
- Tabla 4.8: Cálculo de AFSC. Inclinación de captadores Latitud $+15^\circ$
- Tabla 4.9: Área de captadores para FSC=30%
- Tabla 4.10: Resumen AFSC para FSC=30%
- Tabla 4.11: Relación PAS/A =f(A) para distintos FSC
- Tabla 4.12: RMSE para distintos FSC
- Tabla 4.13: RMSE promedio
- Tabla 5.1: LCOE en diferentes ciudades y para distintos FSC
- Tabla 5.2: Costes de consumo de energía
- Tabla 5.3: Sensibilidad de LCOE a diferentes parámetros
- Tabla 5.4: Emisiones de CO₂ evitadas
- Tabla 8.1. Áreas necesarias para FSC=10, FSC=20
- Tabla 8.2. Áreas necesarias para FSC=30, FSC=40
- Tabla 8.3. Áreas necesarias para FSC=50, FSC=60
- Tabla 8.4. Áreas necesarias para FSC=70, FSC=80
- Tabla 8.5. Áreas necesarias para FSC=90, FSC=100

Índice de Figuras

- Figura 3.1 Concentrador cilindro-parabólico
- Figura 3.2: Concentrador Fresnel
- Figura 3.3: Central termosolar de torre
- Figura 3.4: Tecnología de disco parabólico
- Figura 3.5: Esquema de instalación solar de baja temperatura
- Figura 3.6: Instalación de circuito abierto
- Figura 3.7: Instalación de circuito cerrado
- Figura 3.8: Instalación solar para producción de ACS y calefacción
- Figura 3.9: Tecnologías de refrigeración solar
- Figura 3.10: Esquema de refrigeración por absorción
- Figura 3.11: Instalación de absorción de efecto simple
- Figura 3.12: Instalación de absorción de doble efecto
- Figura 3.13: Máquina de adsorción
- Figura 3.14: Máquina de adsorción con tres cámaras y dos evaporadores
- Figura 3.15: Comparativa entre máquinas de absorción y adsorción
- Figura 3.16: Ciclo de refrigeración evaporativo con desecante sólido
- Figura 3.17: Instalación de refrigeración evaporativa con desecante sólido
- Figura 3.18: Funcionamiento de una máquina de refrigeración con desecante líquido
- Figura 3.19: Máquina enfriadora DuHandling de Advantix Systems
- Figura 3.20: Distintas configuraciones de instalaciones de refrigeración por ciclo Rankine
- Figura 3.21: Instalación de refrigeración solar con eyector
- Figura 3.22: Funcionamiento de un eyector
- Figura 4.1: Distribución mensual de demanda de calefacción en Sevilla
- Figura 4.2: Distribución mensual de demanda de refrigeración en Sevilla
- Figura 4.3: Distribución mensual de demanda de ACS en Sevilla
- Figura 4.4: Demanda mensual en Sevilla. Perfil tipo 3.
- Figura 4.5: Demanda mensual en Burgos. Perfil tipo 2.
- Figura 4.6: Demanda mensual en Ciudad Real. Perfil tipo 1.
- Figura 4.7: Perfil de radiación. Sevilla.
- Figura 4.8: Perfil de radiación. Burgos.
- Figura 4.9: Perfil de Radiación. Ciudad Real.
- Figura 4.10: Relación entre área y PAS para FSC=50
- Figura 4.11: PAS/A frente a área de captador. FSC=10
- Figura 4.12: PAS/A frente a área de captador. FSC=40

Figura 4.13: PAS/A frente a área de captador. FSC=70

Figura 4.14: Coeficiente "a" frente a FSC

Figura 4.15: Coeficiente "b" frente a FSC

Figura 5.1: Comparativa LCOE en diferentes ciudades

Figura 5.2: LCOE frente a precio de la energía en diferentes ciudades

Figura 5.3: Sensibilidad de LCOE a α

Figura 5.4: Sensibilidad de LCOE a "n"

Figura 5.5: Sensibilidad de LCOE a "s"

Figura 5.6. Sensibilidad de LCOE a η

Figura 5.7. Sensibilidad de LCOE a "r"

Figura 5.8. Variación de LCOE al modificar α

Figura 5.9. Variación de LCOE al modificar η

Figura 5.10. Emisiones de CO₂ evitadas

1. Introducción

La implementación de mejoras en las condiciones de vida principalmente de la sociedad occidental ha llevado asociado un aumento del consumo energético. En la actualidad, la demanda energética mundial se sostiene casi en su totalidad en el uso de combustibles fósiles. Esto ha puesto a la humanidad en una encrucijada, ya que el crecimiento exponencial que se ha producido en el consumo de estos recursos ha conducido a que su agotamiento a medio plazo sea una posibilidad cada vez más cercana y de la que comienzan a hacerse eco algunos especialistas en la materia. Adicionalmente, la quema de los recursos fósiles ha provocado un aumento de la contaminación ambiental cuyos efectos comienzan a mostrarse cada vez con mayor frecuencia. La dependencia energética de los combustibles fósiles es un problema complejo que debe abordarse cuanto antes si quiere encontrarse una solución. Es aquí donde las energías renovables pueden tener un papel fundamental como alternativa sostenible de estos.

De entre las diferentes tecnologías de aprovechamiento energético renovables, la energía solar es una de las más desarrolladas y una de las más utilizadas a nivel mundial. La gran disponibilidad del recurso solar lo hacen una apuesta de futuro muy interesante a la hora de buscar una fuente de energía limpia e inagotable.

Una característica interesante de la energía solar es que puede ser aprovechada directamente en forma de calor, cediendo su energía térmica en captadores solares o bien puede ser transformada en electricidad en paneles fotovoltaicos. Otra característica que la hace muy atractiva para su uso en edificios residenciales es que la generación se produce directamente en el edificio, sin necesidad de centrales eléctricas ni de grandes infraestructuras de transporte, con las pérdidas en distribución que esto conlleva. En resumen, permite que los edificios residenciales sean más autosuficientes.

España, por su emplazamiento, dispone de un gran potencial para el aprovechamiento de la energía solar, debido a la gran cantidad de radiación que recibe a lo largo del año. Por otra parte, las temperaturas extremas alcanzadas hacen que se produzca un gran consumo de energía en climatización, principalmente en labores de refrigeración. Todo esto hace plantear la posibilidad de suplir esa demanda haciendo uso del recurso solar.

La energía solar térmica de baja temperatura constituye una forma limpia, fiable y eficiente de producción de calor a partir de la luz solar. Las tecnologías de climatización solar que pueden utilizar esta energía en el acondicionamiento térmico de edificios permite que las instalaciones alcancen un alto grado de aprovechamiento durante todo el año, contribuyendo al objetivo de alcanzar la autosuficiencia en edificios.

2. Objeto del Proyecto

El objetivo general de este proyecto es obtener una visión cualitativa de la viabilidad, tanto a nivel económico como desde el punto de vista de la sostenibilidad, del uso de instalaciones térmicas de baja temperatura para satisfacer la demanda energética tanto de climatización como de ACS en un edificio residencial en las diferentes ciudades españolas. Se trata de comprobar en qué medida estas instalaciones pueden ser una alternativa a medio plazo para sustituir la utilización de combustibles fósiles.

En primer lugar, con el propósito de facilitar la estimación económica, se tratará de encontrar una correlación entre los parámetros característicos que definen el comportamiento de la instalación. En concreto, se pretende relacionar el porcentaje de aprovechamiento solar de la instalación (PAS) con la fracción de demanda que es cubierta mediante el uso del recurso solar (FSC) así como con el área total de captadores solares instalados. Posteriormente se hará uso de la expresión obtenida para realizar un cálculo de los costes en los que se incurre en una instalación solar térmica a lo largo de toda la vida útil de la misma. Los resultados se compararán con los derivados de la utilización de otras alternativas energéticas a fin de comprobar la viabilidad económica de la instalación. Finalmente se estimará el impacto ambiental, calculando la cantidad de emisiones de CO₂ que se evitan al utilizar el recurso solar frente a las alternativas fósiles.

3. Revisión bibliográfica

3.1. Energía solar térmica.

La energía solar térmica engloba aquellas tecnologías que se basan en la captación del calor proveniente de la radiación solar ya sea para utilizarlo directamente en forma de energía térmica o bien para transformarla en electricidad previo calentamiento de un fluido caloportador.

Los sistemas de producción de energía solar térmica pueden ser clasificados en función de la temperatura que puede alcanzar el fluido calentado. De esta forma, se distinguen tres tipos distintos de instalaciones:

- **Baja temperatura.**

Sistemas en los que la temperatura que alcanza el fluido calentado no supera los 100 °C. Estas instalaciones no requieren concentrar la energía solar, por lo que habitualmente es suficiente utilizar captadores de placa plana con un serpentín en su interior por el que circula el fluido a calentar para alcanzar las temperaturas deseadas. Puesto que el objeto de este proyecto está centrado en el estudio de estos sistemas, en la Sección 3.2. se procederá a analizarlos con más detalle.

- **Media temperatura.**

Se consideran sistemas de media temperatura a los que trabajan en el rango 100°C - 250°C. Para temperaturas tan elevadas el uso de captadores solares planos es ineficiente, por lo que es necesario utilizar sistemas de concentración de forma que la energía sea acumulada en un foco lineal por el que circula el fluido caloportador. Los rayos solares deben ser reflejados mediante el uso de lentes o espejos a fin de conseguir dirigirlos hacia el foco. Puesto que la energía debe concentrarse en todo momento en el tubo absorbedor, es imprescindible que la instalación disponga de un sistema de seguimiento solar, de forma que la posición de los captadores sea siempre la óptima.

La tecnología más utilizada para alcanzar este rango de temperaturas es la de concentradores cilindroparábolicos, cuyo funcionamiento se esquematiza en la Figura 3.1. Una alternativa a estos es la tecnología Fresnel, que hace uso de varios reflectores planos con distinta inclinación, de forma que concentran la energía en un foco lineal, tal como muestra la Figura 3.2.

Las temperaturas alcanzadas en estas instalaciones las hacen idóneas para la producción de vapor en procesos industriales así como la generación de energía eléctrica.

- **Alta temperatura.**

Aquellos sistemas que alcanzan temperaturas superiores a los 250 °C. Las altas temperaturas requeridas en estos sistemas hacen que sea necesario alcanzar relaciones de concentración muy altas, por lo que es necesario dirigir la energía a un foco puntual en el que se encuentra el fluido caloportador. Actualmente son muy habituales las centrales de torre, que consiguen este objetivo mediante el uso de un campo de heliostatos que reciben la radiación solar, reflejándola de forma que se concentre en la torre, tal como se muestra de forma esquemática en la Figura 3.3. Dentro de los sistemas de alta temperatura también cabe destacar la tecnología de discos parabólicos, en las que la radiación es recibida por un disco de forma que éste la concentra en su foco, donde hay situado un elemento (habitualmente un motor Stirling) que permite el aprovechamiento de la energía térmica. El esquema de esta tecnología se muestra en la Figura 3.4. Estas centrales permiten generar vapor a muy altas temperaturas, por lo que son utilizadas para la generación de electricidad a gran escala.

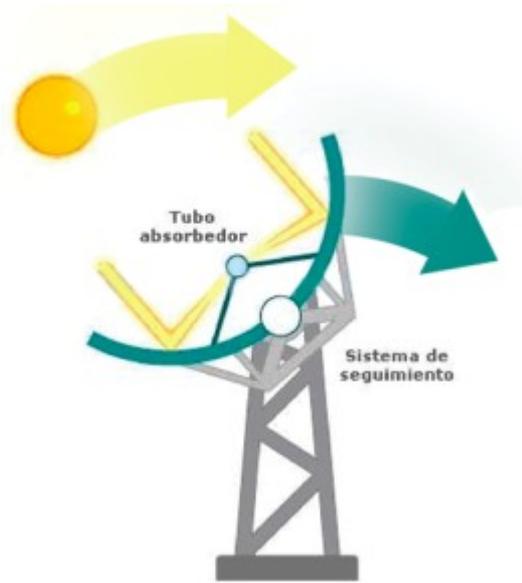


Figura 3.1. Concentrador Cilindro-Parabólico.

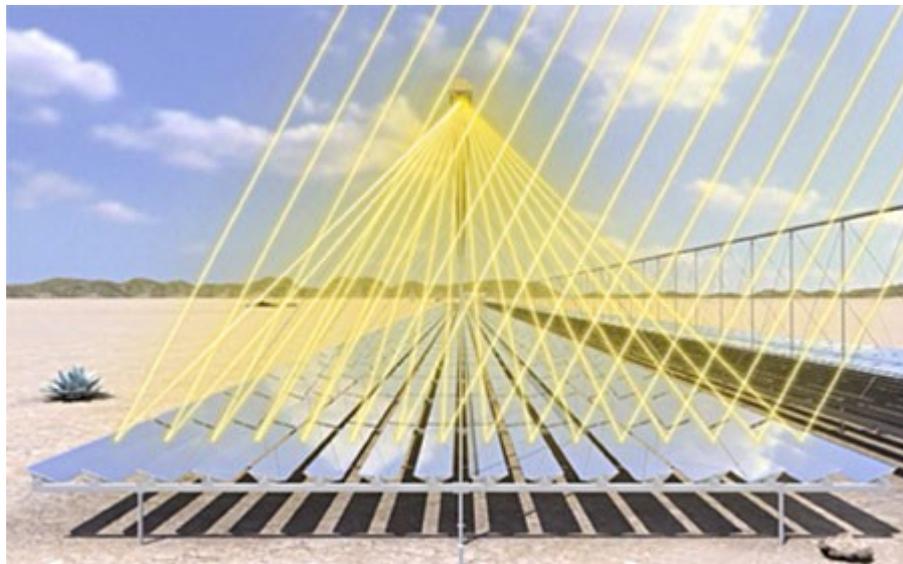


Figura 3.2. Concentrador Fresnel.

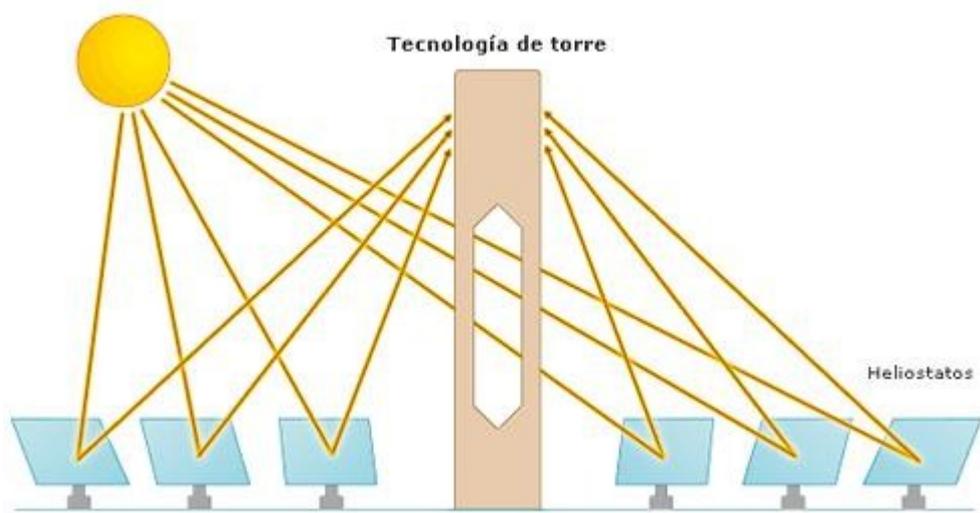


Figura 3.3. Central Termosolar de Torre.

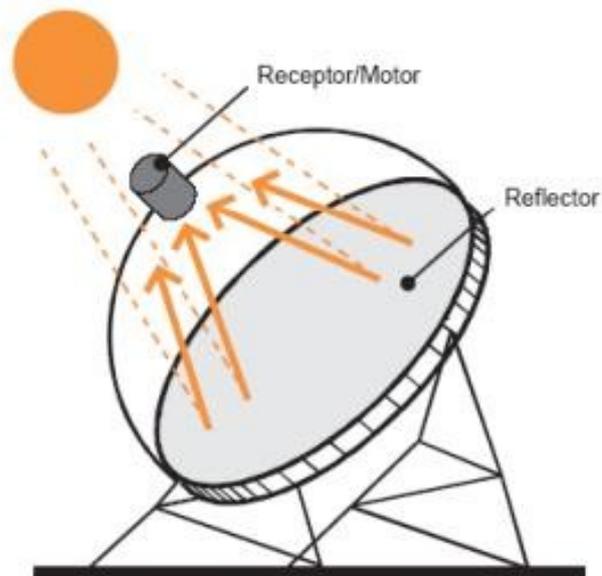


Figura 3.4. Tecnología de Disco Parabólico.

3.2. Energía solar térmica de baja temperatura.

En una instalación de baja temperatura un captador absorbe la energía de la radiación solar, transfiriéndola al fluido que circula por su interior. Esta energía puede ser consumida como Agua Caliente Sanitaria (en adelante ACS) o bien ser usada para otras aplicaciones tal como se especificará en la Subsección 3.2.2.

3.2.1. Instalación solar térmica de baja temperatura.

Los principales elementos de los que se compone una instalación de baja temperatura se muestran esquematizados en la Figura 3.5, donde se distinguen varios subsistemas que son descritos a continuación.

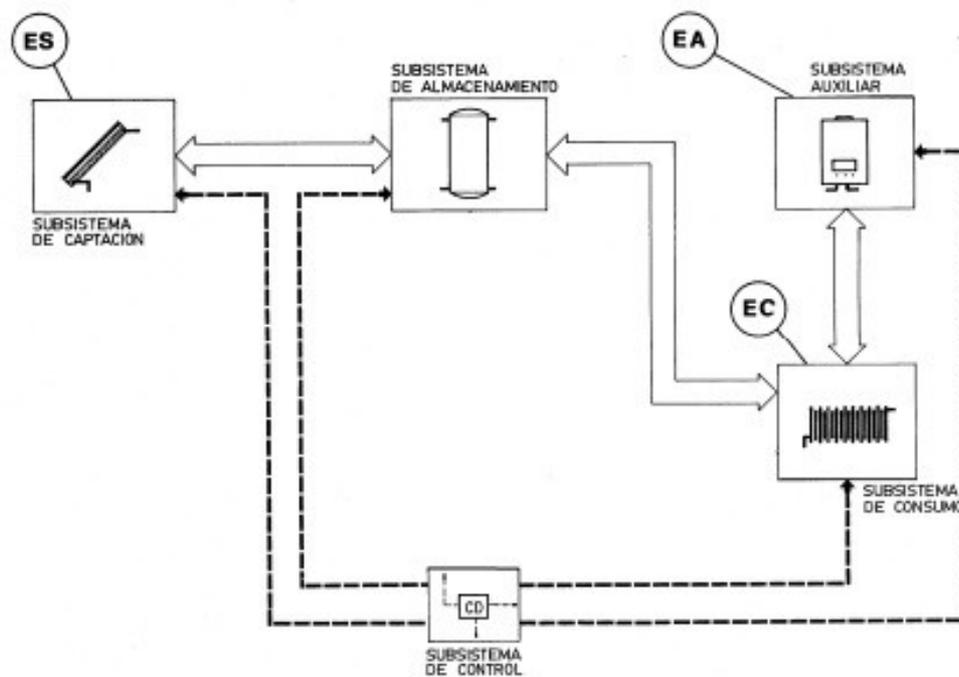


Figura 3.5. Esquema de Instalación de Baja Temperatura.

- **Subsistema de captación.**

Tiene el objetivo de absorber la energía procedente de la radiación solar y transferirla al fluido caloportador en forma de energía térmica. Este fluido puede ser directamente el agua destinada a consumo, que sería transportada al sistema de almacenamiento, aunque lo más habitual es un circuito primario de agua mezclado con algún producto anticongelante (normalmente glicol) que a su vez transferirá la energía térmica al circuito secundario por el que circulará el ACS.

En la Figura 3.6. se muestra un sistema en el que el agua circula directamente por el captador, mientras que en la Figura 3.7. se muestra la configuración con circuito primario y circuito secundario.

- **Subsistema de acumulación.**

Puesto que la energía producida en el captador no se consume instantáneamente, se hace necesario un sistema capaz de acumular el exceso de energía que se produce en las horas de radiación de forma que esta pueda ser utilizada en las horas en las que no hay producción. Para este objetivo se dimensiona un depósito acumulador aislado que conserva la energía térmica disponible en el fluido una vez que este ha sido calentado.

- **Subsistema de circulación.**

Permite que el fluido de trabajo sea transportado a través de la instalación. Está compuesto por las tuberías, el sistema de bombeo y los elementos accesorios del mismo.

- **Subsistema auxiliar.**

En toda instalación de energía térmica de baja temperatura es necesario establecer un sistema cuyo objetivo sea apoyar la instalación de forma que este se encargue de aportar energía en los periodos en los que la demanda no puede cubrirse exclusivamente mediante energía solar. En las instalaciones residenciales lo habitual será cubrir la demanda con gas aunque otras opciones como el uso de biomasa son posibles.

- **Subsistema de control.**

Se encarga de controlar los parámetros del sistema para mantener la producción óptima en cada momento.

- **Subsistema de Consumo.**

Es el sistema en el que se entregará la energía térmica que ha sido generada mediante radiación solar. En la mayoría de instalaciones que se encuentran en la actualidad, el agua se utilizará directamente como ACS para consumo doméstico, pero, como veremos en la subsección 3.2.1. existen otras aplicaciones en las que se puede utilizar el calor generado.

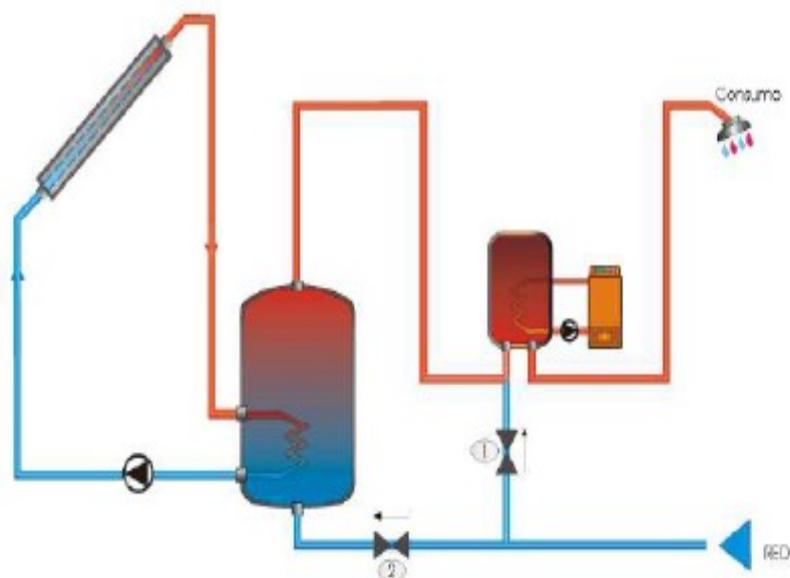


Figura 3.6. Instalación de Circuito Abierto.

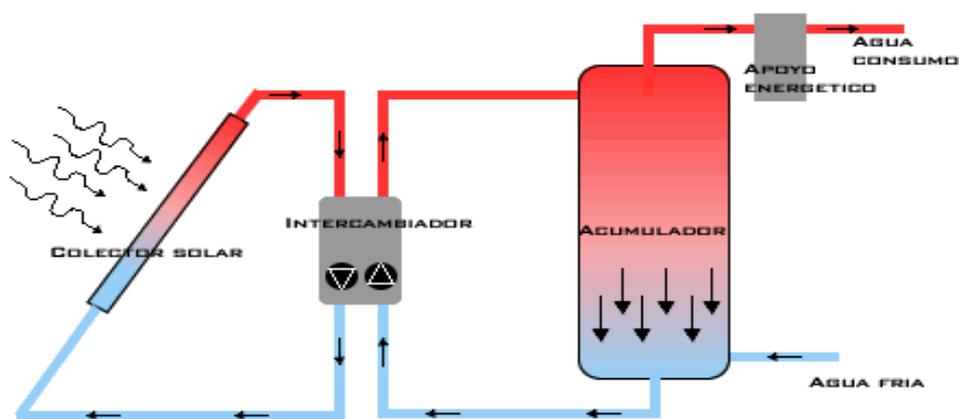


Figura 3.7. Instalación de Circuito Cerrado.

3.2.1. Aplicaciones de la energía solar térmica de baja temperatura.

Aunque la gran mayoría de las instalaciones que existen en la actualidad son utilizadas en la producción de Agua Caliente Sanitaria (en adelante ACS), la energía térmica captada por el sistema puede tener otras aplicaciones. A continuación se describen sus principales usos:

- **Agua caliente sanitaria (ACS).**

Como se ha comentado, es la aplicación más extendida de la energía térmica de baja temperatura. La energía es utilizada en calentar agua para consumo doméstico en viviendas. Puesto que el ACS supone un alto porcentaje del consumo energético medio de una vivienda, el Código Técnico de la Edificación (en adelante CTE) considera, para edificios de nueva construcción, suplir una parte de la demanda energética mediante el uso de fuentes renovables, lo que naturalmente ha llevado a la proliferación de las instalaciones solares térmicas de baja temperatura.

- **Calefacción.**

Se puede utilizar el agua calentada para que circule por el sistema de calefacción del edificio. De esta manera, el fluido cederá su energía térmica al recinto a climatizar, cubriendo la demanda de calefacción. Esto puede hacerse mediante diversos métodos, como el uso de suelos radiantes, radiadores o fan-coils.

Normalmente las instalaciones son mixtas, es decir, producen ACS y apoyo a la calefacción. La forma más habitual de calefacción en instalaciones solares es el uso de fan-coils, al requerir menores temperaturas de trabajo que, por ejemplo, los radiadores. Estas bajas temperaturas (en torno a 40°C - 45°C) favorecen la eficiencia de los captadores solares, ya que esta disminuye cuanto mayor sea el salto de temperatura que se debe aportar.

Por otra parte, otra forma de calefacción en la que se pueden utilizar instalaciones solares es en la climatización de piscinas. La baja temperatura necesaria para ceder calor a la misma hace de estas instalaciones una muy buena opción en este tipo de aplicaciones.

- **Refrigeración.**

El aprovechamiento de la energía solar para producir frío es una de las aplicaciones térmicas con mayor futuro, pues tiene la particularidad de que los periodos en los que más demanda de refrigeración existe coinciden con aquellas en las que se disfruta de mayor radiación solar, por lo que en las épocas de mayor demanda será posible satisfacer la misma en un alto porcentaje haciendo uso solo de la energía solar. El potencial de estas instalaciones es prometedor porque permite ser combinado con el sistema de calefacción, de forma que puedan ser utilizadas durante todo el año para climatizar la vivienda.

Es por ello que este estudio se centrará en este tipo de instalaciones, centrándose en el potencial que pueden tener las mismas para la producción combinada de ACS, calefacción y refrigeración, tal como se verá con detalle a partir del capítulo 4.

- **Usos industriales.**

Son muchos los ejemplos en los que la industria se vale de calor solar para desempeñar sus actividades: tintado y lavado de tejidos en la industria textil, procesos de obtención de pastas químicas en la industria papelera, baños líquidos de pintura para la limpieza y desengrasado de automóviles, secado de productos agrícolas, tratamiento de alimentos, etc.

3.3. Instalaciones de ACS y Climatización.

Para conseguir este propósito se debe aprovechar una parte de la energía térmica contenida en el fluido como fuente de calor, ya sea utilizándola directamente en sistemas de calefacción o bien como foco caliente en procesos de generación de frío.

En estas instalaciones es necesario producir agua a la temperatura deseada, de forma que parte de ella se consumirá en la vivienda como ACS mientras que otra parte se hará circular al sistema de climatización para calentar o enfriar el recinto según las necesidades de demanda de cada periodo. Existen diversos sistemas con este propósito, como pueden ser: fancoils, radiadores, suelos radiantes o nidades de tratamiento de aire (en adelante UTA) .

La obtención de calefacción mediante energía térmica solar es tan sencilla como establecer una segunda toma de agua caliente en el depósito acumulador tal como muestra en el ejemplo de la Figura 3.8. Así, se tendría una toma de la que se obtendría el ACS y otra que se haría circular al sistema de calefacción de forma que ceda su energía al recinto a climatizar. En regiones donde no exista demanda de refrigeración o éstas sean mínimas se puede realizar una instalación como la mostrada en la Figura 3.8., donde sólo hay sistema de calefacción, sin que sea necesario un sistema de producción de frío, siendo esta más sencilla y menos costosa desde el punto de vista económico.

Por su parte, para las instalaciones de refrigeración el proceso es más complejo. Será necesario introducir un foco frío que absorba el calor del recinto permitiendo mantenerlo en la temperatura deseada. Esto se consigue haciendo circular un fluido previamente enfriado por la instalación de climatización. En la sección 3.4. se detallan las diferentes formas de lograr la producción de frío haciendo uso de la energía térmica obtenida en los captadores.

Es imprescindible establecer un parámetro que nos permita describir la eficiencia de los sistemas de climatización. En sistemas de calefacción se define el Coeficiente de Eficiencia Energética (COP) como la

relación entre el calor útil que se obtiene en el proceso (el calor transferido al ambiente a climatizar) y la energía aportada al sistema . De forma análoga, en la producción de frío se define el Factor de Eficiencia Energética (EER) como el cociente entre el calor extraído del recinto y la energía aportada al sistema. Estos parámetros son clave para establecer el rendimiento de este tipo de instalaciones.

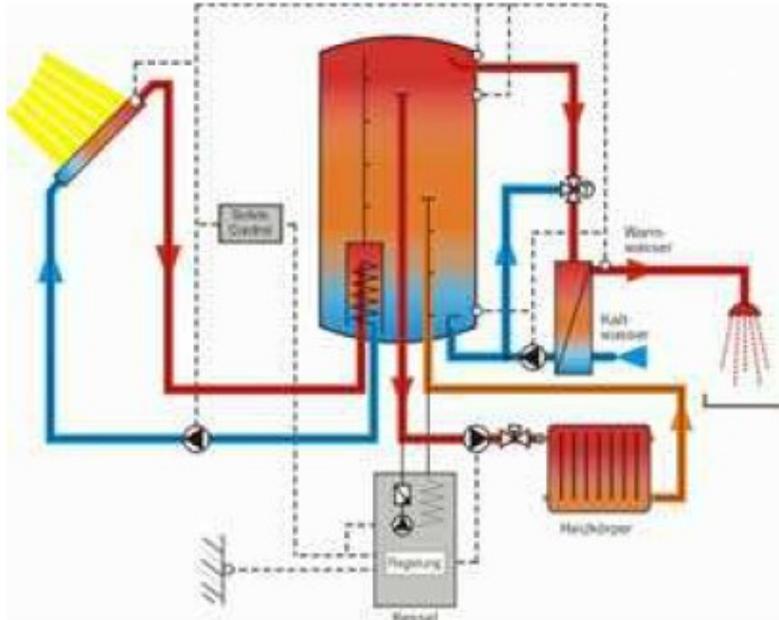


Figura 3.8. Instalación solar para producción de ACS y Calefacción.

3.4. Refrigeración Solar.

Estos sistemas tienen un funcionamiento similar al de las instalaciones clásicas y ampliamente utilizadas en climatización en las que se hace uso de un compresor eléctrico que es el encargado de aumentar por medios mecánicos la presión del refrigerante. En las instalaciones térmicas esta presión se elevará mediante mecanismos térmicos haciendo uso de la energía solar contenida en el fluido. De esta forma se puede prescindir del compresor eléctrico, que será sustituido por la instalación solar. Esto permitirá obtener el mismo objetivo (producción de frío) haciendo uso de energías renovables, si bien la instalación gana en complejidad respecto a las de compresión mecánica.

La gran ventaja que tienen los sistemas que hacen uso de la energía solar para la producción de frío es que, por lo general, la demanda de refrigeración es necesaria en los periodos en los que mayor radiación se produce, lo que provoca un aprovechamiento eficiente de la energía. Por ello se han investigado y desarrollado múltiples posibilidades que permiten la producción de frío solar.

La Figura 3.9. muestra una clasificación de las distintas tecnologías conocidas en la actualidad en función del método usado para llevar a cabo el proceso de refrigeración. Estas diferentes alternativas son explicadas detalladamente en posteriores subsecciones de esta misma sección.

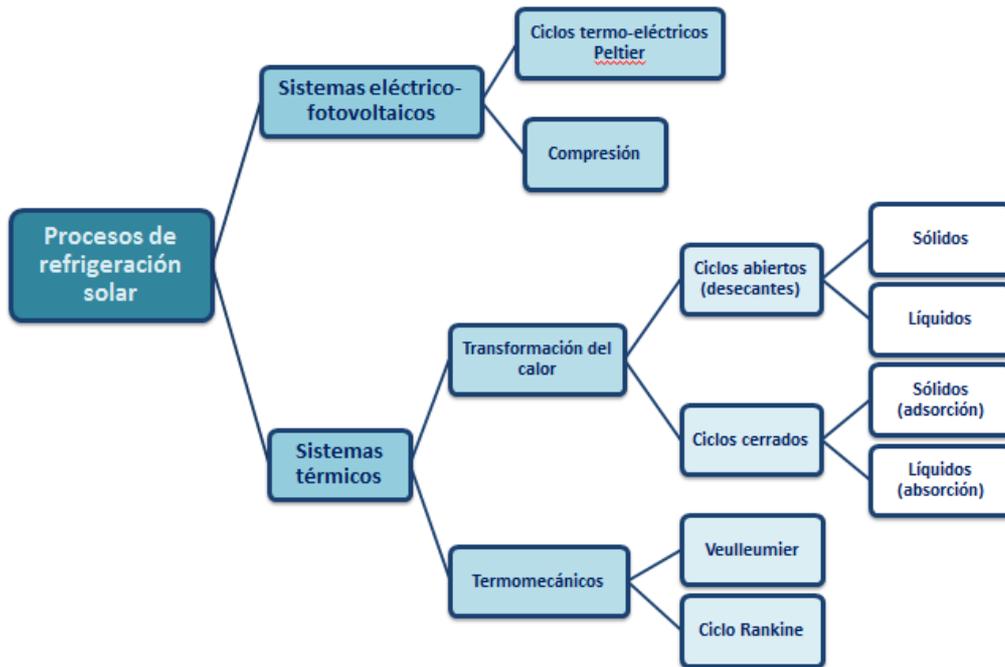


Figura 3.9. Tecnologías de refrigeración solar.

3.4.1. Sistemas basados en transformación de calor

3.4.1.1. Sistemas de refrigeración por absorción.

Las máquinas de enfriamiento por absorción son las más utilizadas en la actualidad de todos los sistemas de refrigeración solar estudiados. Es una tecnología muy desarrollada e implantada en la industria desde hace décadas. En la actualidad hay múltiples alternativas en el mercado, teniendo los fabricantes un rango de potencias que abarca desde pequeñas máquinas de 5 KW a grandes instalaciones de 5 MW. Esto hace que haya un amplio catálogo que permitirá elegir la máquina más adecuada en cada instalación. Sin embargo, la gran mayoría de máquinas fabricadas son de gran potencia, siendo las instalaciones de pequeña potencia para uso residencial mucho menos comunes.

En el ciclo de absorción, se produce un efecto de compresión del refrigerante por métodos térmicos, frente a los métodos mecánicos de los compresores convencionales. El ciclo está basado en la afinidad de una sustancia absorbente líquida para capturar el refrigerante en forma vapor. Esta absorción se produce en el absorbedor, formándose una solución absorbente -absorbato. Esta es conducida a una bomba que se encarga de elevar la presión de la misma antes de entregarla al generador. Es aquí donde es utilizada la energía térmica proveniente de la instalación solar, que se transfiere a la solución. El aumento de energía favorece el proceso de desorción, por el cual el refrigerante se libera del absorbente, obteniendo el primero en estado gaseoso y a alta presión.

La Figura 3.10. muestra el funcionamiento de una máquina de absorción activada por energía solar de forma esquemática.

Como se puede observar, el proceso de absorción y desorción del refrigerante hace aquí las funciones del compresor eléctrico, por lo que el resto del ciclo de refrigeración es análogo al de los sistemas convencionales: el fluido se hará circular por el condensador para después, ya en estado líquido, reducirle la presión en la válvula de expansión y llegar al evaporador, donde absorberá el calor del recinto a climatizar, obteniéndose el efecto de refrigeración deseado. Finalmente este vapor volverá al absorbedor, donde vuelve a ser captado en la solución, cerrándose el ciclo.

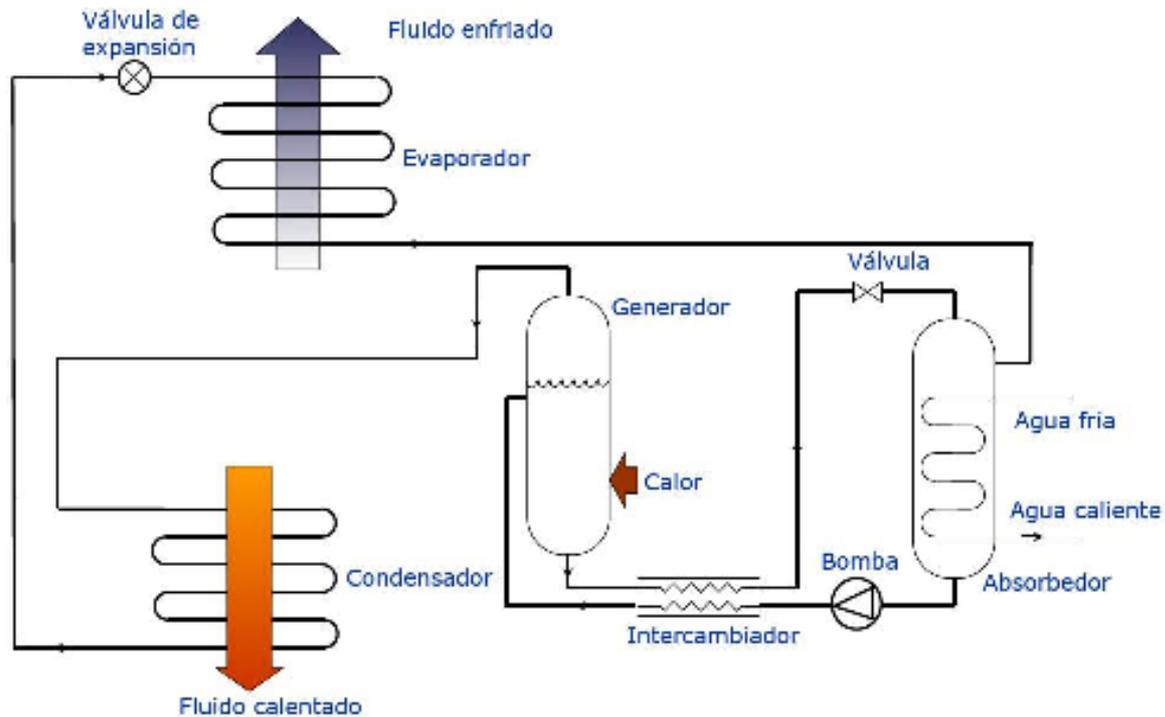


Figura 3.10. Esquema de refrigeración por absorción

La principal ventaja frente a los sistemas de compresión mecánica convencionales desde el punto de vista energético es que en este caso el aumento de presión se realiza sobre un líquido haciendo uso de una bomba hidráulica. El gasto energético de esta es muy inferior al que se produce al elevar la presión del gas en un compresor. Como contrapartida, es necesario realizar un aporte energético en el generador, pero en las instalaciones que estamos considerando este se lleva a cabo por captadores solares, por lo que estamos ante una solución más sostenible que las que hacen uso de compresión mecánica.

En la actualidad las soluciones más utilizadas para climatización son aquellas formadas por bromuro de litio (LiBr) como absorbente y agua como refrigerante. Puesto que en estas instalaciones la temperatura del refrigerante no necesita ser inferior a 0 °C, el agua es el refrigerante idóneo. En instalaciones que necesiten temperaturas más bajas, como por ejemplo en la industria de refrigeración de alimentos, sería inviable usar agua como refrigerante, teniendo que recurrir a otras soluciones.

En función del número de efectos que contengan, esto es, el número de generadores, las máquinas de absorción se pueden clasificar en:

- **Máquina de efecto simple**

Máquinas en las que solo hay un generador. Son las más utilizadas en instalaciones solares para el sector residencial, pues su temperatura de funcionamiento es, en general, baja, lo que permite que pueda obtenerse únicamente mediante el uso de captadores solares de placa plana o de tubos de vacío sin necesidad de sistemas de seguimiento. Esto hace que sean las instalaciones más económicas además de las más sencillas, aunque tienen el inconveniente de presentar menores rendimientos que las máquinas con más generadores. La Figura 3.11. esquematiza una instalación de efecto simple.

Como se ha comentado, en el mercado pueden encontrarse máquinas de muy diversa potencia, siendo las más comunes en las aplicaciones de uso doméstico las máquinas de pequeña potencia. La eficiencia de estas instalaciones se encuentra en torno a un EER = 0.7, siendo la temperatura del fluido de trabajo de 80-90°C.

- **Máquina de doble efecto**

Aparecen como una forma de mejorar la eficiencia en las instalaciones de absorción. Para ello añaden un segundo generador trabajando a distinta temperatura del primero. Así, uno de ellos funcionará a alta temperatura y otro a baja temperatura.

Debido a la temperatura de trabajo del generador, en estos sistemas el aporte de energía se realiza a una temperatura mucho mayor a las habituales en máquinas de efecto simple. El vapor producido tiene un contenido energético elevado, por lo que se hace circular hacia el generador de baja temperatura, donde el calor latente cedido en la condensación es aprovechado en la producción de vapor adicional. De esta forma ambos caudales producirán frío útil cuando se hagan circular por el evaporador.

El esquema de funcionamiento se representa en la Figura 3.12, en la que además se observa como es habitual la introducción de intercambiadores de calor a la salida del absorbedor para mejorar el rendimiento.

La principal ventaja desde el punto de vista del rendimiento respecto a las máquinas de efecto simple es que el gran aporte energético que supone el calor latente del vapor a alta temperatura es aprovechado para producir un caudal extra de vapor, mientras que en el caso de efecto simple este necesita ser evacuado al ambiente y por lo tanto se desperdiciaba.

Este proceso hace que aumente la eficiencia de la máquina, alcanzándose EER mayores a la unidad.

En la actualidad esta tecnología puede alcanzar EER de aproximadamente 1,3 frente a los aproximadamente 0.7 que se consiguen en máquinas de efecto simple. Esto supone un aumento de prácticamente el doble en la producción de frío. Sin embargo, las altas temperaturas (por encima de los 140°C) que se necesitan en el generador hacen que su uso en instalaciones de energía solar no esté muy extendido, puesto que para alcanzarlas habría que utilizar captadores solares capaces de concentrar la energía, algo que no es habitual en uso residencial. Es por ello que estas máquinas son más utilizadas con fuentes de energía fósiles, principalmente para aplicaciones alimentadas por gas.

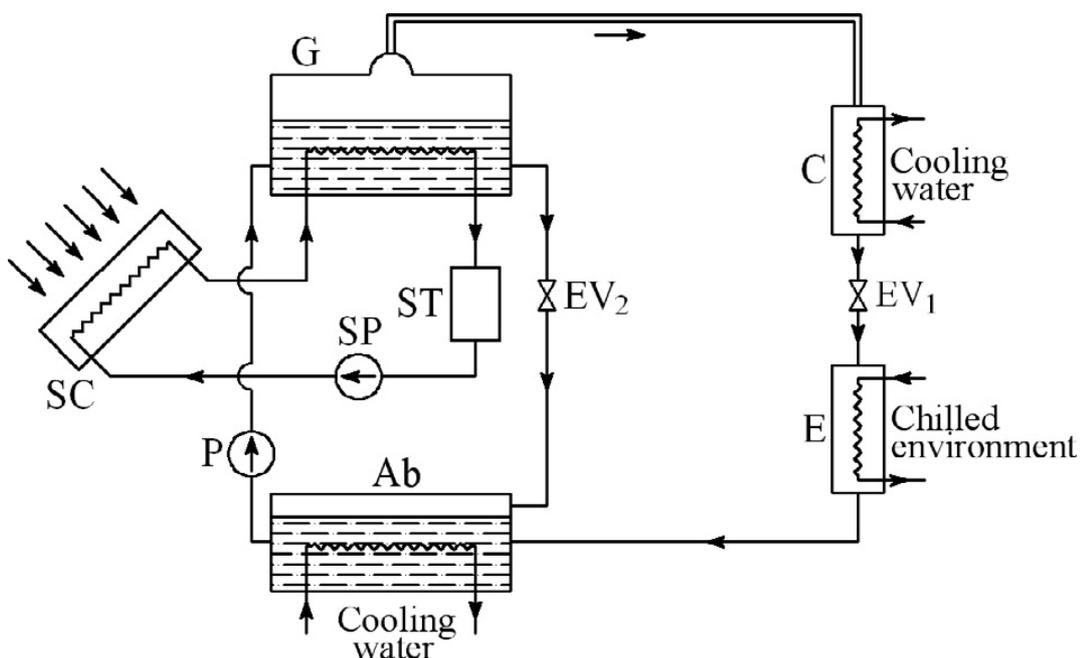


Figura 3.11. Instalación de absorción de efecto simple.

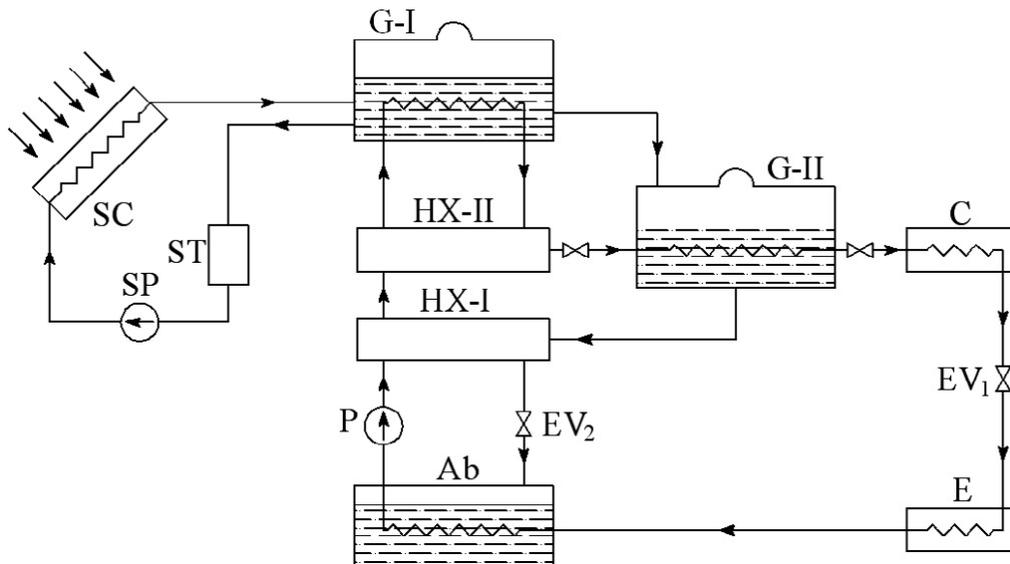


Figura 3.12. Instalación de absorción de efecto doble.

- **Máquina de efecto triple**

Tras la aparición de las máquinas de doble efecto, el paso siguiente es intentar mejorar el rendimiento de la instalación a base de incluir un tercer generador a temperatura aún mayor, de forma que el vapor producido en esta sea la fuente de un segundo generador a temperatura intermedia que a su vez alimente al de baja temperatura. En estos sistemas se alcanzarán eficiencias muy altas, con EER de hasta 1.7. Sin embargo, para conseguir estos resultados se necesitarán temperaturas en torno a los 200 °C, aunque en los últimos años se han producido avances en este tipo de instalaciones, aún no hay ningún fabricante que las tenga disponibles en el mercado.

A pesar de la gran cantidad de máquinas de absorción que se pueden encontrar en el mercado, el número de opciones disponibles se reduce notablemente si hablamos de máquinas de pequeña potencia, que serán las utilizadas para uso residencial. Si a esto añadimos que la máquina debe estar adaptada para funcionar con el agua calentada por la energía solar, sólo encontramos unos pocos fabricantes que hayan lanzado sus modelos al mercado.

En la Tabla 3.1. se tiene una comparativa con las características de las diferentes máquinas de absorción que los diferentes fabricantes tienen disponibles. Sólo se muestran máquinas de pequeña potencia (menor a 100 KW) por ser las utilizadas en las instalaciones en las que se centra este estudio. Como se observa, todas ellas son máquinas de efecto simple que utilizan una solución de bromuro de litio como absorbente. El rendimiento de todas ellas es muy similar y está, tal como se esperaba, en torno a EER = 0.7. La excepción es el modelo BCTHZ de Broad, que hace uso de una máquina de doble efecto para aumentar la eficiencia de la instalación, a costa de tener temperaturas de trabajo muy elevadas.

Fabricante	Modelo	Número de efectos	Potencia Frigorífica (KW)	EER Nominal	Temperatura caliente (°C)	Solución absorbente
Airlan	Sab-HW1	Simple	53	0.7	95	LiBr - H ₂ O
Airlan	Sab-HW2	Simple	70	0.7	95	LiBr - H ₂ O
Broad	BCTDH	Simple	45 - 70	0.75	98	LiBr - H ₂ O
Broad	BCTHZ	Doble	21 - 90	1.39	180	LiBr - H ₂ O
EAW	WEGRACAL SE 15	Simple	15	0.71	85	LiBr - H ₂ O
EAW	WEGRACAL SE 30	Simple	30	0.75	85	LiBr - H ₂ O
EAW	WEGRACAL SE 50	Simple	54	0.75	86	LiBr - H ₂ O
Thermax	LT-1	Simple	35	0.78	90,6	LiBr - H ₂ O
Thermax	LT-2	Simple	70	0.78	90,6	LiBr - H ₂ O
Yazaki	WFC SC 5	Simple	17,6	0.74	88	LiBr - H ₂ O
Yazaki	WFC SC 10	Simple	35,2	0.74	88	LiBr - H ₂ O
Yazaki	WFC SC20	Simple	70,3	0.74	88	LiBr - H ₂ O

Tabla 3.1. Características de máquinas de absorción.

3.4.1.2. Sistemas de refrigeración por adsorción

Esta tecnología hace uso de la capacidad de algunas sustancias sólidas porosas para retener en el interior de su estructura moléculas de otra sustancia. Normalmente esta adsorción se puede revertir al calentar el sólido, pues el aumento de temperatura permite a la sustancia atrapada liberarse. Es, en concepto, un proceso muy similar al que se lleva a cabo en la absorción, explicada en la Subsección 3.4.1.1, en la que la compresión mecánica tradicional ha sido sustituida por una compresión térmica, con la diferencia de que en aquella se usaba una solución líquida como absorbente mientras que en este caso la sustancia que retiene al refrigerante es sólida. La sustancia más ampliamente utilizada en este procedimiento es el gel de sílice, aunque esta puede ser sustituida por otras como el carbón vegetal activo o algunas zeolitas y alúminas. En cuanto a la potencia, existe un rango variado, existiendo máquinas de pequeña potencia que no superan los 5 KW y otras que llegan superar los 500 KW.

El esquema de la máquina de adsorción se muestra en la Figura 3.13. Esta se divide en dos compartimentos, ambos con la sustancia adsorbente en su interior, un evaporador y un condensador. En uno de los compartimentos, el agua caliente proveniente de la instalación solar cede su calor, liberando el adsorbato que estaba retenido en el sólido. Una vez liberado, el vapor sigue el ciclo de refrigeración, circulando por el condensador, y, previo paso por la válvula de expansión, por el evaporador donde se vaporiza a baja presión y, por tanto, baja temperatura. Es aquí donde se produce el efecto de frío deseado, pues en el proceso el refrigerante absorbe calor de una corriente de agua que se enfría en contacto con él. Una vez vaporizado, el refrigerante es conducido al otro compartimento de la máquina, donde el vapor vuelve a ser retenido por el adsorbente. Este compartimento necesita ser enfriado continuamente por una corriente de agua de refrigeración para evacuar el calor que se produce en la adsorción y mantener así las características adsorbentes.

Tal y como se ha presentado el funcionamiento de la máquina, llega un punto en el que el compartimento donde se produce la desorción quedaría agotado al haber liberado todo el adsorbato contenido en su interior, mientras que el otro compartimento quedaría saturado. Es por eso que los compartimentos deben invertir sus funciones de forma periódica. Para ello se instalan válvulas que invierten el ciclo cuando es necesario.

Al igual que ocurría en las máquinas de absorción, el ahorro energético de estas instalaciones se produce al eliminar el sistema de compresión mecánica en favor del recurso solar.

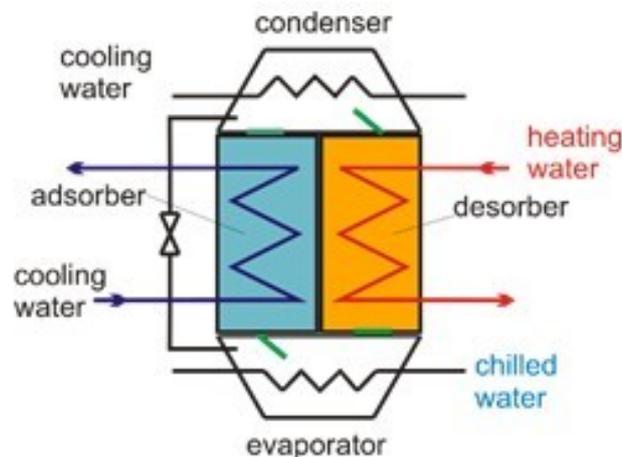


Figura 3.13. Máquina de adsorción.

Se puede hacer una clasificación de las máquinas de adsorción en función del número de efectos. El funcionamiento descrito anteriormente se corresponde con una máquina de simple efecto. Sin embargo, se pueden añadir cámaras con idea de mejorar el rendimiento de la instalación. Un ejemplo se muestra en la Figura 3.14. en la que se muestra una instalación con tres cámaras y 2 evaporadores que funcionan a distinta presión. Otras alternativas que buscan aumentar aún más la eficiencia son la variante de doble efecto, con 4 cámaras de adsorbente o la de triple efecto, con seis cámaras. El concepto de estas instalaciones es análogo a lo visto en las máquinas de absorción, pues el objetivo es aumentar el rendimiento del sistema al aprovechar el refrigerante de alta temperatura como fuente secundaria de energía. Al igual que ocurría en las máquinas de absorción, la adición de efectos tiene como consecuencia un aumento de la temperatura que deben alcanzar los captadores solares.

La principal ventaja de estas instalaciones frente a las de absorción es que para temperaturas bajas de trabajo presenta mejores rendimientos, por lo que su uso en aplicaciones residenciales en las que la fuente de energía sea solar térmica de baja temperatura es una opción a considerar. Sin embargo, para aplicaciones en las que la temperatura en el generador supere los 90 °C, las máquinas de absorción presentan mejor comportamiento. Esto puede verse en la Figura 3.15. que muestra una gráfica comparativa de la eficiencia de ambas tecnologías en función de la temperatura de trabajo. Una cuestión a destacar de dicha figura es cómo las prestaciones de la máquina de absorción decaen rápidamente cuando baja la temperatura de agua caliente, comprobándose que el sistema de adsorción es mucho más estable ante cambios en las condiciones de trabajo. Como se observa en la gráfica, los valores típicos de eficiencia en este tipo de instalaciones rondan un valor de EER en torno a 0.6.

Por último En la Tabla 3.2. se representan las características técnicas de algunas de las máquinas que existen en el mercado. En general, se aprecian las características que se han descrito previamente. Todas las máquinas consiguen eficiencia algo menor a los ciclos de absorción, estando el EER en torno a 0.6. En las condiciones típicas de operación las temperaturas de trabajo están en torno a 80°C, sin embargo, estas

instalaciones son mucho más flexibles que las de absorción, pudiendo trabajar a 60°C sin una pérdida sensible de rendimiento.

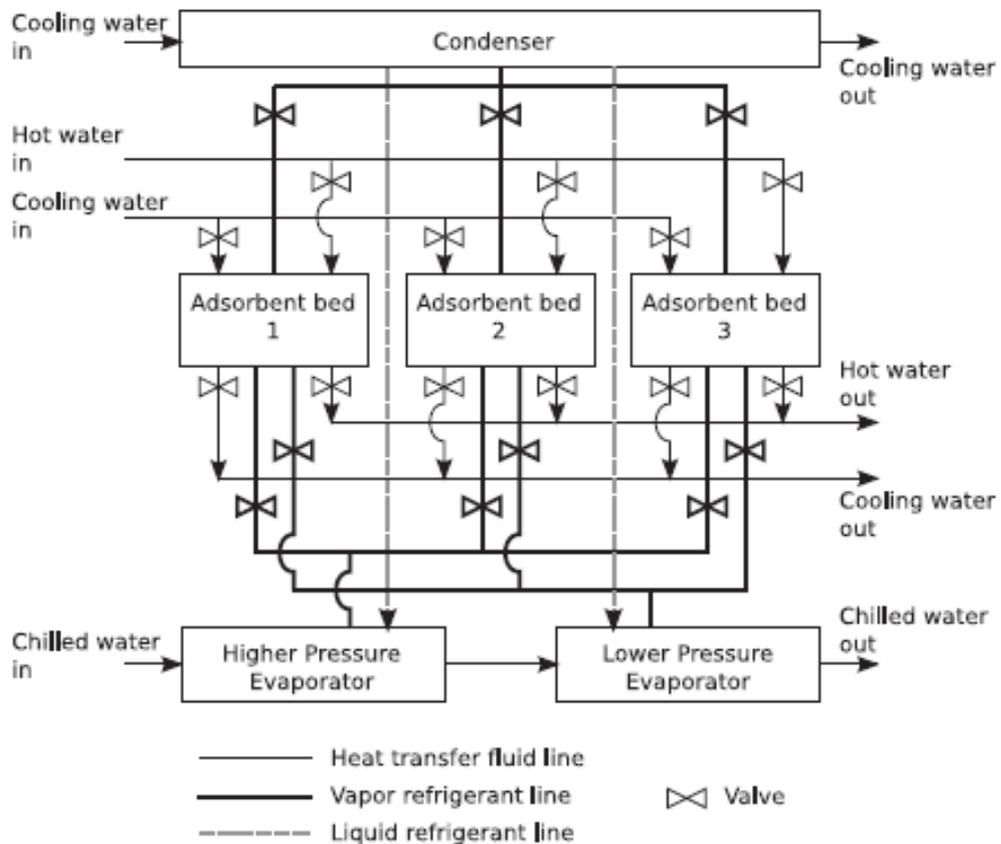


Figura 3.14. Máquina de adsorción con tres cámaras y dos evaporadores

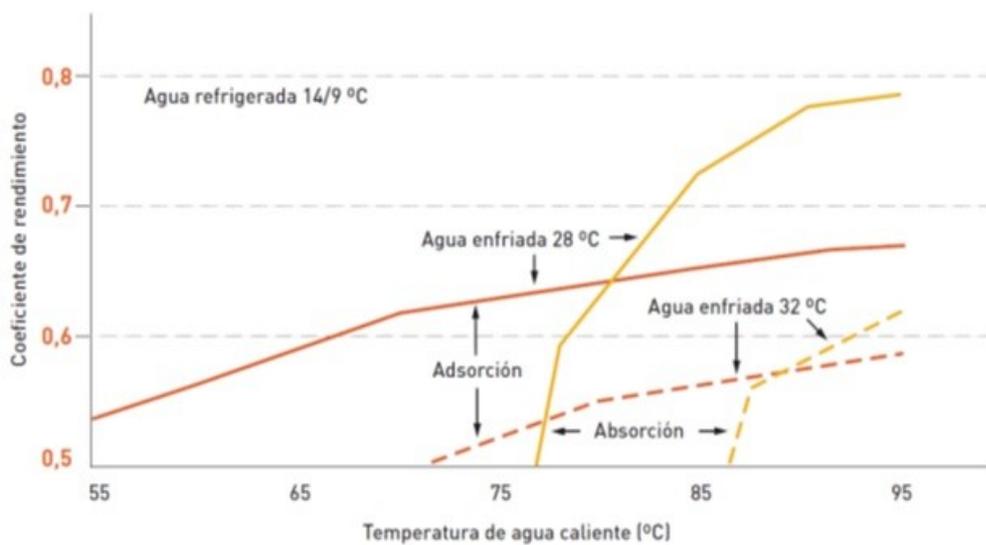


Figura 3.15. Comparativa entre máquinas de absorción y Adsorción.

Fabricante	Modelo	Potencia Frigorífica (KW)	EER Nominal	Temperatura caliente (°C)	Adsorbente
BryAir	ADC D-75	76	0,65	52 - 93	Gel de Sílice
Invensor	LTC 30E	35	0,72	60 - 95	Zeolita
Invensor	LTC HTC 18	22	0,52	85	Zeolita
GBU	NAK 20/70	71	0,65	50 - 80	Gel de sílice
Sortech	eCoo 2.0. Varios tamaños	16 -80	0,65	50 - 95	Gel de sílice
Sortech	eZea Varios tamaños	13 -96	0.53	75 - 95	Zeolita

Tabla 3.2. Características de las máquinas de adsorción.

3.4.1.3. Sistemas de refrigeración evaporativos con desecante.

Los sistemas de refrigeración evaporativa con desecante son procesos de ciclo abierto. Esto implica que, a diferencia de los ciclos cerrados, el refrigerante no se recupera tras producir el efecto frigorífico, siendo necesario un aporte continuo del mismo. Esto es debido a que en este proceso el enfriamiento se produce por contacto directo entre el aire y el agua utilizado como refrigerante.

Estas instalaciones son muy interesantes en especial en climas muy húmedos, donde la gran cantidad de vapor en el ambiente hace que los sistemas de refrigeración habituales pierdan eficacia. Esto es debido a que gran parte de la energía se consume en evacuar la gran cantidad de calor latente contenido en el agua.

En función del estado en el que se encuentre la sustancia que se utilice como desecante, se distingue entre sistemas con sorbente líquido (absorción) y sistemas con sorbente sólido (adsorción).

- **Sistemas evaporativos con sorbente sólido.**

La tecnología más comunmente utilizada es la de rueda desecante, cuyo esquema se muestra en la Figura 3.16. El funcionamiento básico de la instalación se explica a continuación.

El aire proveniente del ambiente pasa por la rueda desecante. Esta contiene una sustancia adsorbente, por lo que el vapor de agua contenido en el aire es retenido en la rueda. A continuación se instala una rueda de recuperación cuya función no es más que preenfriar el aire cediendo parte de su calor al aire de extracción. De esta forma se mejora el rendimiento de la instalación. Por último, puesto que el aire está muy seco tras su paso por el adsorbente, se utiliza un enfriador evaporativo directo, que mezcla el aire y el refrigerante, de forma que además de bajar la temperatura se alcancen las condiciones de humedad deseadas en la impulsión.

Hay que destacar que el desecante debe ser regenerado, pues de lo contrario la rueda acabaría saturándose y perdiendo efectividad. Esto se consigue haciendo uso del aire de retorno, que al entrar en contacto con la rueda se humidificará, secando la misma. Puesto que el proceso de desorción necesita altas temperaturas para producirse de forma eficaz, el aire de retorno debe ser

calentado previamente. Este aporte de energía es el que puede realizarse haciendo uso de la instalación solar, tal y como muestra la Figura 3.17.

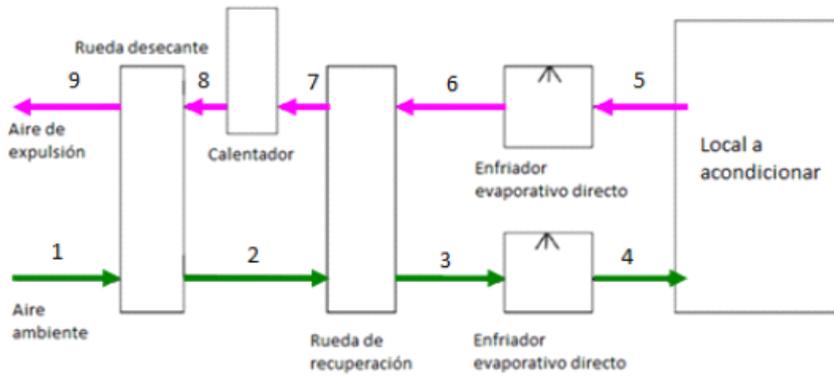


Figura 3.16. Ciclo de refrigeración evaporativa con desecante sólido.

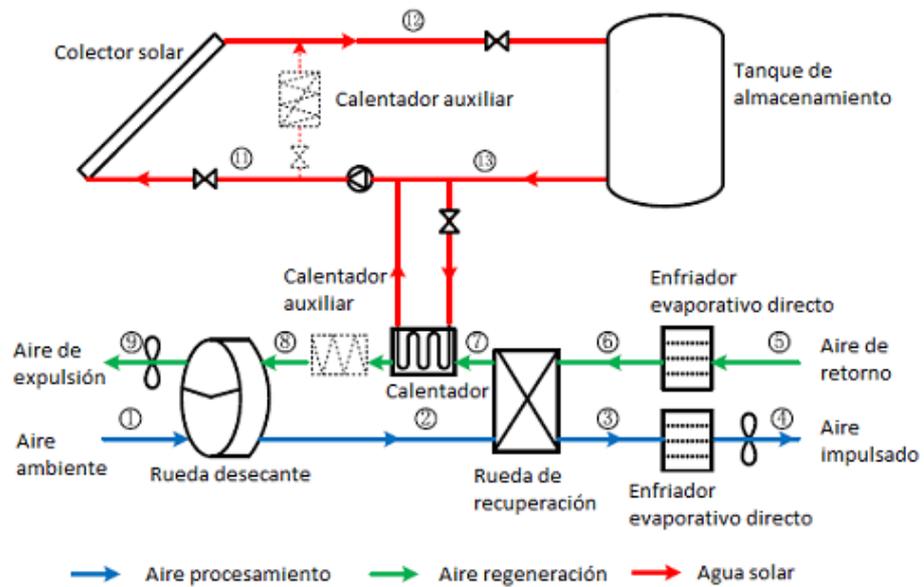


Figura 3.17. Instalación de refrigeración evaporativa con desecante sólido.

- **Sistemas evaporativos con sorbente líquido.**

En este caso, el desecante es una solución líquida con gran capacidad para absorber el vapor contenido en el aire. Entre los desecantes líquidos más utilizados se encuentran el cloruro de litio, el cloruro de calcio y, principalmente, el bromuro de litio.

En la Figura 3.18. se ha representado el esquema de funcionamiento de una instalación de refrigeración evaporativa con desecante líquido.

En el absorbedor, el aire húmedo a tratar, 1, se pone en contacto con el líquido desecante, 2, que circula en sentido contrario. Este proceso es exotérmico, por lo que debe ser refrigerado continuamente. El aire sale del absorbedor frío y deshumidificado, 3, mientras que la solución líquida, habitualmente LiBr como absorbente y agua como absorbato, sale más concentrada. Esta se hace circular al regenerador, 4, donde deberá ceder el vapor de agua a otra corriente de aire que circula en sentido contrario, 5. Como sucedía en los sistemas de desecante sólido, en el regenerador debe producirse un aporte de energía que favorezca la desorción del vapor de agua. Esta energía será aportada por el circuito de agua calentada mediante el uso de energía solar. Por último, la solución, ya diluida y de nuevo con capacidad para absorber vapor, vuelve al absorbedor donde cierra el ciclo. Para aumentar el rendimiento de la instalación, se instala un recuperador de calor, no mostrado en la figura, de forma que la solución concentrada precaliente a la solución diluida antes de que esta entre en el generador.

Los sistemas con desecantes líquidos presentan una serie de ventajas con respecto a los sólidos, siendo la principal de ellas la menor temperatura de regeneración, lo que permite que los captadores solares trabajen a mejor rendimiento. La temperatura de trabajo que se alcanza en el regenerador está en el rango 50°C - 80°C. Una ventaja adicional es que en el proceso de deshumidificación no calientan el aire, por lo que necesitan menos potencia de refrigeración para alcanzar las mismas condiciones en la impulsión. Por contra son instalaciones más voluminosas y costosas que las que hacen uso de desecante sólido.

Esta tecnología se ha introducido en el mercado recientemente y en la actualidad apenas se está comenzando a desarrollar. Esto hace que su potencial de mejora sea considerable. Por otra parte, sus bajas temperaturas de funcionamiento la hacen una tecnología idónea para ser alimentada mediante el uso de captadores solares. Es por ello que, con vistas al futuro, sea una de las alternativas más prometedoras para sustituir los sistemas de climatización habituales por la refrigeración solar.

Actualmente sólo se ha encontrado un fabricante que disponga de máquinas que utilicen desecante líquido. Se trata de la empresa Advantix Systems, que, con su serie DuHandling (DH), representada en la Figura 3.19, presenta varias opciones de distintos tamaños con potencias frigoríficas que van desde los 9.6KW del modelo DH-300 hasta los 80 KW del DH-3400. Sin embargo, no ha sido posible obtener información de la eficiencia de dichas máquinas.

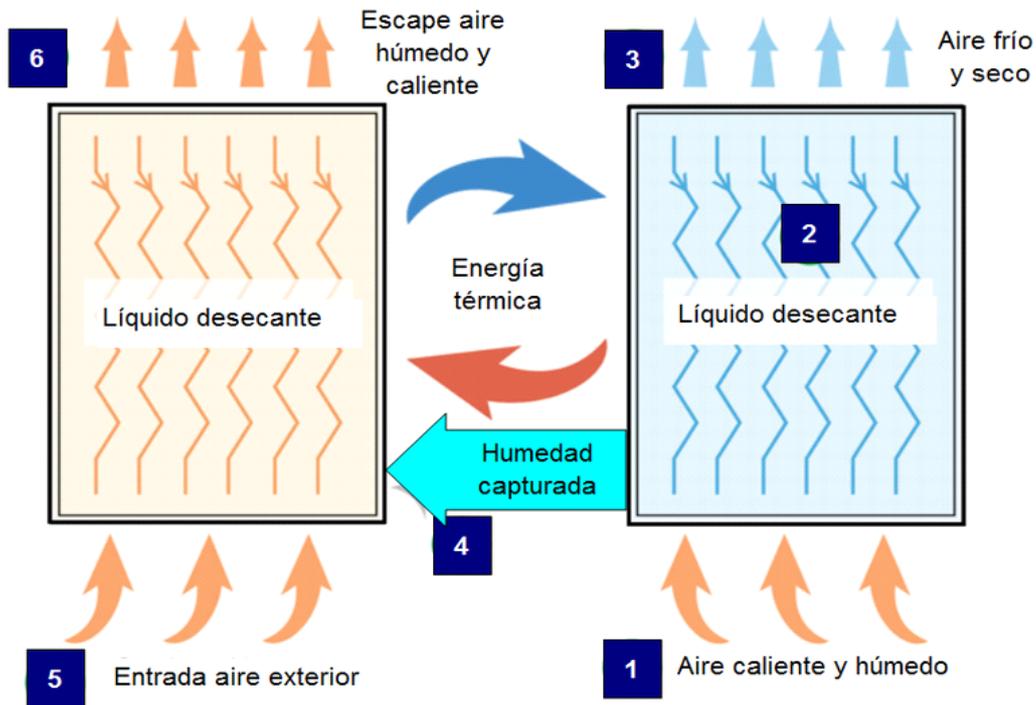


Figura 3.18. Funcionamiento de una máquina de refrigeración con desecante líquido.

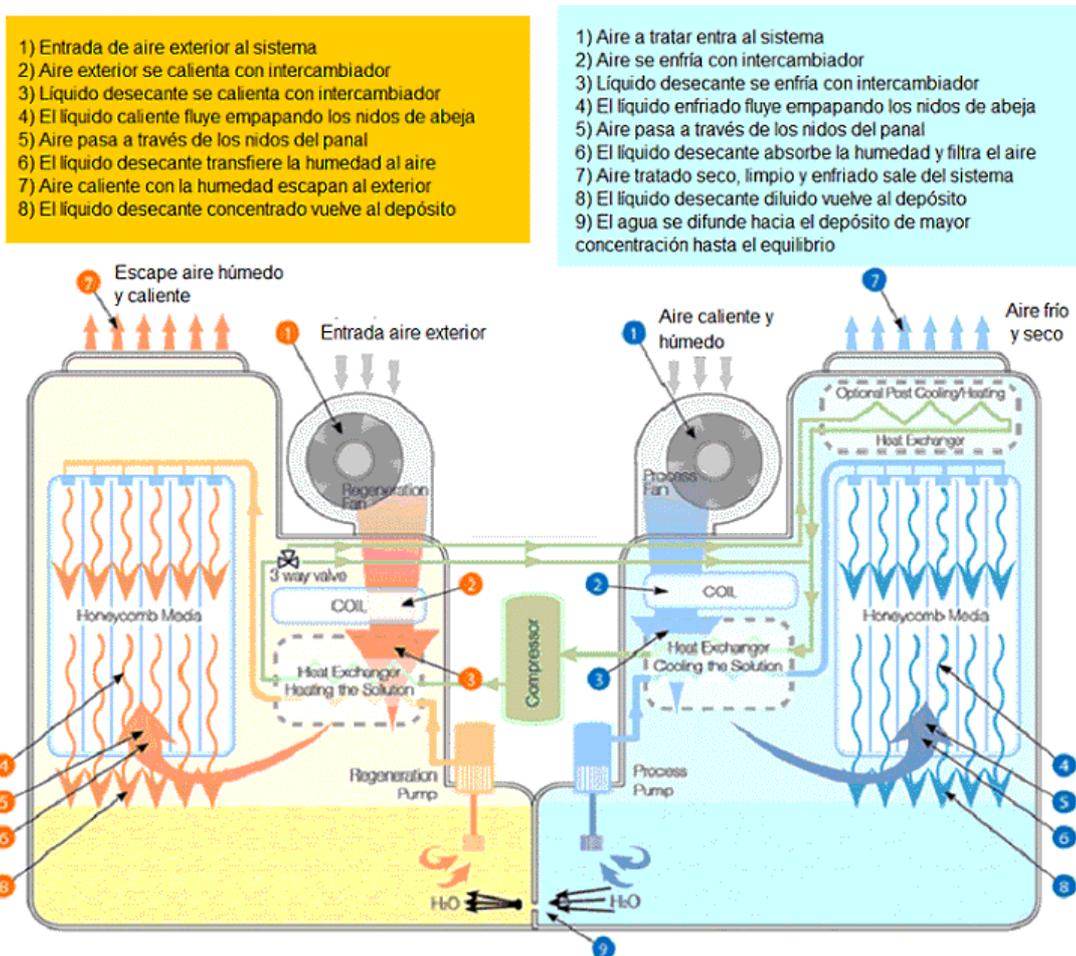


Figura 3.19. Máquina enfriadora DuHandling de Advantix Systems.

En general, se puede decir que los sistemas evaporativos que hacen uso de desecantes pueden alcanzar unos rangos de eficiencia muy similares a los que se obtienen con las máquinas de absorción de efecto simple, esto es, EER en torno a 0.7, aunque tienen la ventaja de que la temperatura de trabajo puede ser menor. Esto hace que aumente la eficiencia global de la instalación, pues los captadores solares disminuyen su eficiencia cuando aumenta el salto de temperaturas que deben aportar. Sin embargo, estas instalaciones son más complejas y costosas, por lo que, aunque en los últimos años se están realizando avances, apenas se han comercializado instalaciones que hagan uso de esta tecnología.

3.4.2. Sistemas Termomecánicos.

En este tipo de instalaciones, el calor obtenido en los colectores solares es transformado en trabajo mecánico, que se utiliza para satisfacer la etapa de compresión en el ciclo del refrigerante. Actualmente las dos tecnologías principales que hacen uso de estos procesos son el ciclo Rankine y el ciclo de compresión con eyector. Otra alternativa que estaría englobada en los sistemas termomecánicos es la que hace uso de máquinas de Stirling, pero las elevadas temperaturas de trabajo necesarias en el ciclo, por encima de 500°C, las hace inviables para su uso en instalaciones solares residenciales, por lo que no serán consideradas en este estudio.

3.4.2.1. Refrigeración por Ciclo Rankine.

En esta tecnología, la idea es la utilización de la energía térmica obtenida en los captadores solares para alimentar un compresor mecánico que será el encargado de elevar la presión del vapor refrigerante tal y como ocurre en los ciclos convencionales. Los recientes avances desarrollados en los equipos necesarios para llevar a cabo el ciclo han hecho que en los últimos años se haya recuperado la investigación en este modo de refrigeración tras dos décadas en las que el estudio del mismo se había abandonado para centrarse en otras tecnologías.

Dos posibles configuraciones de instalaciones con ciclo de Rankine son representadas en la Figura 3.20. En la primera, se tienen dos ciclos separados. El primero de ellos es un ciclo de Rankine alimentado por la energía térmica de los captadores solares, que se encarga de producir vapor a alta temperatura en el generador que posteriormente se expandirá en una turbina. En el segundo se tiene un ciclo de compresión de vapor convencional que será el encargado de producir frío en el evaporador del mismo. El acople mecánico de la pequeña turbina del ciclo Rankine con el compresor permite que el trabajo generado en la expansión del vapor caliente se transfiera al compresor, aumentando la presión del refrigerante. En la segunda configuración ambos ciclos están integrados, de forma que comparten condensador.

Como se ha señalado previamente, la investigación de las instalaciones con ciclo Rankine se ha retomado hace tan solo unos años. Por tanto, a día de hoy no hay ningún fabricante en el mercado que disponga de este método de refrigeración. Sin embargo, se han realizado diversos estudios experimentales, obteniéndose resultados dispares, aunque en general, inferiores a los valores de eficiencia que se alcanzan en otro tipo de instalaciones que se han desarrollado en este trabajo. Es necesario destacar que la poca madurez que presenta aún esta tecnología implica un potencial de mejora prometedor con vistas al futuro. Actualmente se están probando distintas configuraciones que mejoren las prestaciones del sistema, por lo que a medio plazo podría ser una alternativa a otros sistemas más desarrollados que ya existen en el mercado.

La Tabla 3.3. muestra un resumen de algunos estudios experimentales llevados a cabo. En ellos los autores prueban diversas condiciones de operación, modificando parámetros como la temperatura de entrada del agua caliente, el tipo de refrigerante o la temperatura exterior para comprobar las variaciones en las prestaciones del sistema. Es por ello que la tabla muestra resultados tan diversos para cada uno de los estudios. Por ejemplo, Li et Al. obtienen EER que varían desde 0.05 hasta 0.75 al modificar las temperaturas de operación, mientras que Kaushik et Al. analizan el comportamiento de varios refrigerantes en su estudio. Es significativo comparar los estudios actuales con los realizados por Prigmore and Barber en 1975 para comprobar cómo la tecnología ha evolucionado en los últimos años,

alcanzándose eficiencias comparativamente mayores con las mismas temperaturas de generación de vapor.

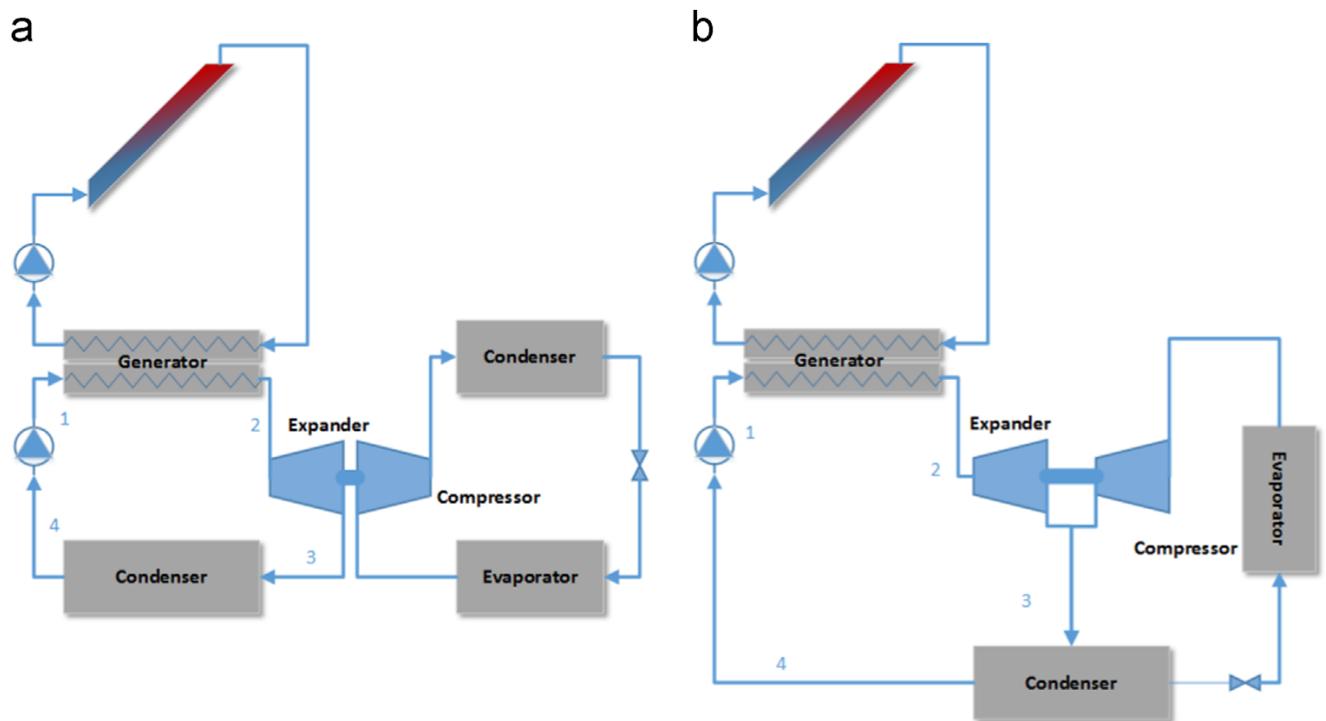


Figura 3.20. Distintas configuraciones de instalaciones de refrigeración por ciclo Rankine.

Estudio	Año	EER	Temperatura agua caliente (°C)
Aphornratana and Sriveerakul	2010	0.1 - 0.6	60 - 95
Li et Al.	2013	0.05 - 0.75	60 - 90
Prigmore and Barber	1975	0.09 - 0.50	75 - 105
Biancardi and Sitler	1982	0.55 - 0.75	66 - 160
Kaushik et al.	1994	0.76 - 1.36	90 - 110
Demierre et al.	2011	1.2 - 1.7	170 - 180

Tabla 3.3. Estudios experimentales. Refrigeración por ciclo de Rankine.

3.4.2.2 Refrigeración por eyector solar.

El esquema básico de refrigeración por eyector solar es representado en la Figura 3.21. La principal diferencia de estas instalaciones con los ciclos convencionales de compresión es que el aumento de presión se realiza mediante un eyector como el mostrado en la Figura 3.22, que, mediante un proceso termo-mecánico sustituye al compresor mecánico.

En estas instalaciones, el refrigerante recibe un aporte térmico proveniente de los captadores solares en el generador, donde se produce vapor a alta temperatura que es conducido al eyector. En la entrada del mismo, la sección convergente hace que el vapor sea acelerado antes de entrar a una cámara en la que se mezcla con el caudal proveniente del evaporador. Posteriormente, a medida que la sección en el difusor crece (ver Figura 3.22.), el fluido se decelera, transformando su energía cinética en un aumento de presión. A la salida del eyector el vapor ya se encuentra a alta presión, por lo que puede dirigirse al condensador para seguir el ciclo de refrigeración. Tras su paso por el condensador, una parte de la corriente líquida se bombeará al generador mientras que el resto se hará circular a la válvula de expansión y al evaporador para producir el enfriamiento deseado.

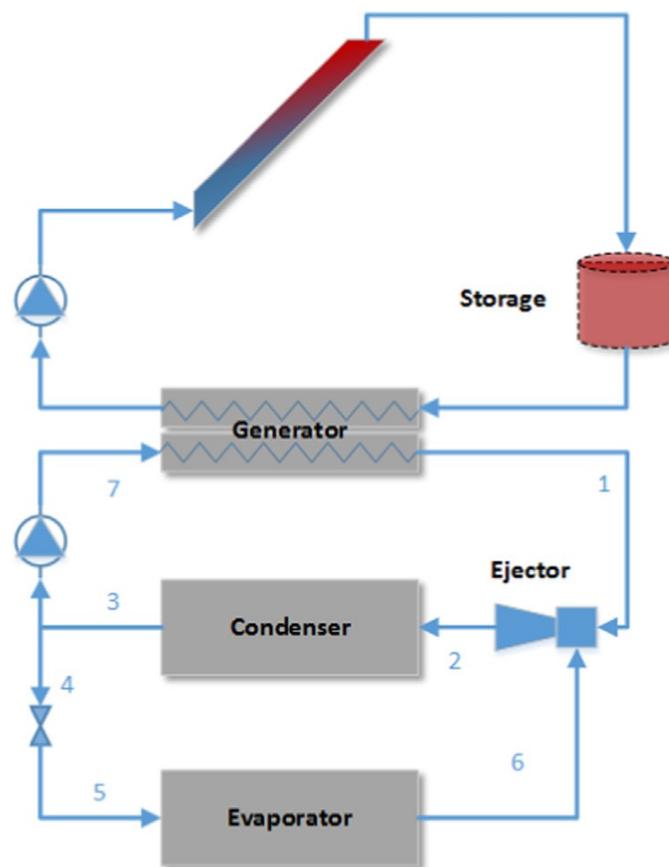


Figura 3.21. Instalación de refrigeración solar con eyector.

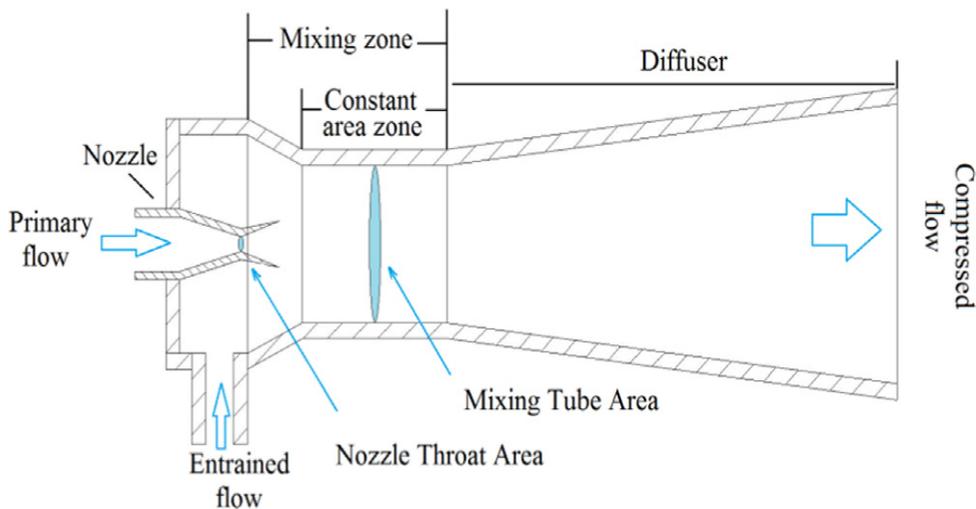


Figura 3.22. Funcionamiento de un eyector.

El bajo rendimiento que presentan los sistemas con eyectores frente a otras alternativas como las máquinas de absorción hace que su uso no se haya popularizado. Sin embargo, estas instalaciones presentan la ventaja de ser más económicas, ya que por su sencillez tanto los costes de instalación como los de mantenimiento son inferiores a los de otras instalaciones.

En la bibliografía se pueden encontrar múltiples estudios que analizan la viabilidad de este sistema para diferentes condiciones climáticas además de probar diferentes configuraciones y condiciones de operación. Los resultados de algunos de esos estudios son comparados en la Tabla 3.4. En todos ellos, la energía usada para alimentar el generador proviene de captadores solares. En la tabla puede comprobarse que la eficiencia de las instalaciones con eyector es, por lo general, muy inferior a las de otros vistos en este trabajo. Los valores habituales de EER en instalaciones con eyectores se encuentran en torno a 0.2 - 0.3. Solo se alcanzan eficiencias aceptables cuando las temperaturas de trabajo son muy altas, como demuestran los estudios de Pollerbert et al, Sarbu y Sebarchier -Vici o Huang et al. , que alcanzan EER de 0.6 pero necesitan temperaturas en el generador de 130 °C. Para estas temperaturas de operación hay opciones más interesantes como la absorción de doble efecto, capaz de alcanzar eficiencias mucho mayores para las mismas condiciones del fluido.

Estudio	Año	EER	Temperatura agua caliente (°C)
Pollerbert et al.	2009	0.5	130
Sarbu and Sebarchier - Vici	2013	0.65	130
Cizungu et al.	2001	0.05 - 0.4	60 - 90
Huang et al.	2001	0.05 - 0.6	70 - 130
Nehdi et al.	2008	0.26 - 0.42	90
Pridasawas and Lundqvist	2013	0.25 - 0.50	50 - 90
Butrymowicz and Bergander	2010	0.05 - 0.15	70 - 100

Tabla 3.4. Estudios experimentales. Refrigeración por eyector.

3.5. Conclusiones de la revisión bibliográfica.

Para finalizar este capítulo, se presenta una tabla en la que se resumen las características de las diferentes tecnologías que permiten hacer uso del recurso solar térmico para producir frío. Este resumen se muestra en la Tabla 3.5.

Tecnología de Refrigeración	EER	Temperatura agua caliente (°C)	Coste Instalación	Estado de la tecnología
Absorción Simple Efecto	0.7 - 0.8	85 - 95	Medio	Desarrollada.
Absorción Doble Efecto	1.39	180	Alto	Tecnología desarrollada. Se puede encontrar en el mercado.
Absorción Triple Efecto	1.7	220	Muy Alto	Tecnología experimental. No comercializado.
Adsorción	0.52 - 0.72	52 - 93	Medio	Tecnología desarrollada. Se puede encontrar en el mercado.
Desecante Sólido	0.7	60 - 95	Medio	Tecnología desarrollada. Se puede encontrar en el mercado.
Desecante Líquido	-	50 - 80	Alto	En desarrollo. Primeros modelos en el mercado.
Ciclo Rankine	0.1 - 1.7	60 - 180	Alto	Experimental. No comercializado.
Eyector	0.2 - 0.6	70 - 130	Bajo	Experimental. No comercializado.

Tabla 3.5. Resumen tecnologías de refrigeración solar.

Como conclusión, se puede afirmar que, a día de hoy, las tecnologías más desarrolladas y más utilizadas en refrigeración solar son las instalaciones que hacen uso de máquinas de absorción, pues estas presentan el mejor compromiso entre eficiencia y coste económico. Sin embargo, con vistas al futuro se han realizado avances prometedores tanto en la tecnología de refrigeración haciendo uso de desecante líquido como en las que utilizan ciclo de Rankine, lo que hace pensar en una posible implementación de las mismas para uso doméstico.

4. Metodología

4.1. Introducción

Se pretende estudiar la viabilidad económica del uso de instalaciones térmicas de baja temperatura para satisfacer, ya sea total o parcialmente, la demanda de calefacción, refrigeración y ACS en un edificio residencial en las diferentes ciudades españolas. Se trata de comprobar en qué medida estas instalaciones pueden ser una alternativa a medio plazo para sustituir la utilización de otras energías menos sostenibles. Por otra parte, se tratará de encontrar una relación que permita estimar el coste de la instalación con tan solo conocer el emplazamiento y el porcentaje de demanda que se pretende cubrir haciendo uso del recurso solar.

En la Sección 4.2. se explicará la metodología que se ha seguido para lograr los objetivos descritos. Previamente, en la Subsección 4.1.1. se definen una serie de parámetros que serán utilizados en el mismo.

4.1.1. Definición de parámetros

Se definen los siguientes términos:

- **Radiación global incidente (H_g):** radiación que recibe el captador solar para una inclinación dada.
- **Fracción Solar Cubierta (FSC):** definida como el porcentaje de la demanda energética que es satisfecha por la instalación solar.

$$FSC = \frac{E_{AP}}{D_{anual}}$$

- **Porcentaje de Aprovechamiento Solar (PAS):** si se produce un exceso de energía que no pueda ser almacenado en la instalación solar, esta se perderá. Se define el PAS como la proporción de la energía producida que es aprovechada para satisfacer la demanda.

$$PAS = \frac{E_{AP}}{E_P}$$

- **$A_{PAS=100\%}$:** Área máxima de captación para la cual se tiene un aprovechamiento total de la energía térmica generada en la instalación. Esto es, área máxima para la que se tiene PAS = 100%
- **$A_{FSC=x}$:** Área mínima que asegura que un determinado porcentaje de demanda es cubierto por la instalación solar. Esto es, área mínima para la que se tiene un cierto FSC. Así, por ejemplo, $A_{FSC=30}$ es el área mínima que asegura que el 30% de la demanda es satisfecha por los captadores.

- **Costenivelado de la energía (LCOE):** es la valoración económica del coste unitario de generación del sistema, considerando todo el ciclo de vida del mismo, desde la instalación hasta el valor residual del mismo una vez finalizada su operación. Se trata de un parámetro muy útil al realizar comparativas entre diferentes tecnologías. Puesto que dicha comparativa es uno de los objetivos de este estudio, el LCOE se definirá de forma extensa en la Sección 4.4.
- **Rendimiento de la instalación solar (η) :** capacidad de la instalación para transformar la radiación recibida en energía térmica.

4.2. Metodología

Se pretende obtener el coste nivelado en el que se incurre al satisfacer la demanda energética de un edificio residencial tipo haciendo uso de una instalación solar térmica de baja temperatura. Esto se realizará para cada una de las 52 ciudades españolas. La comparativa de los resultados con los costes de otras fuentes de energía permitirán estimar la viabilidad económica de la instalación frente a otras alternativas. Puesto que, como se verá en el apartado correspondiente, el LCOE depende fuertemente del porcentaje de aprovechamiento de la instalación, previamente al cálculo del LCOE, se determinará una relación que demuestre de forma experimental la existencia de una dependencia entre el FSC, el PAS y el área de captador. Esto permitirá estimar el PAS de cualquier instalación conociendo el emplazamiento y el porcentaje de demanda que se pretende satisfacer mediante el uso de energía solar, simplificando la estimación de LCOE que se desea obtener.

A fin de facilitar los cálculos, se partirá de una serie de hipótesis que serán establecidas en la Subsección 4.2.1. Posteriormente, en la Subsección 4.2.2. se muestran los datos necesarios y se explica cómo se obtiene la demanda energética en cada una de las ciudades bajo estudio. En la Subsección 4.2.3. se hará un proceso análogo para determinar la energía producida. Se van a considerar dos inclinaciones distintas de captadores, que serán 15° por encima y 15° por debajo de la latitud del lugar (se denominarán LAT $+15^\circ$ y LAT -15°), eligiendo en cada una de las ciudades la inclinación que mayor energía útil produzca. Los datos obtenidos permitirán calcular, mediante un proceso iterativo, el área de captadores necesaria para cubrir un determinado porcentaje de la demanda. Es decir, se establecerá el A_{FSC} . En concreto se obtendrán los A_{FSC} para fracciones solares que irán desde FSC=10 hasta FSC=100 variando de 10 en 10 para cada una de las 52 ciudades. Esto se llevará a cabo en la Subsección 4.2.4. Por su parte, en 4.2.5. se ajusta la curva que relaciona FSC y área de captador.

Una vez obtenida la correlación entre los parámetros de la instalación, esta se utilizará en la Sección 5.1. para realizar una estimación de los costes de la instalación, haciéndose un cálculo del LCOE en cada ciudad y para cada FSC. Finalmente, en 5.2. se realizará la comparativa con los costes derivados de la utilización de otras fuentes de energía.

4. 2.1. Hipótesis

Debido a la gran cantidad de parámetros a tener en cuenta al analizar la instalación, se realizarán una serie de hipótesis que permitan simplificar el estudio.

1. Se considerará un edificio tipo de 30 viviendas con una superficie de 90 m^2 cada una, haciendo un total de 2700 m^2
2. Se establece un rendimiento de la instalación solar del 50%
3. La demanda de refrigeración se satisface haciendo uso de una máquina de absorción de simple efecto con EER = 0.7. Como se vio en la revisión bibliográfica, este es un valor típico de estas máquinas, que actualmente son las más utilizadas en refrigeración solar.

4. La demanda de calefacción se satisface con COP =1.
5. Los sistemas de climatización tan solo serán activados en horario de 08:00h a 23:00 h
6. La temperatura a la que se obtiene el ACS será de 45 °C
7. El caudal de ACS será constante para todos los días del año, variando solo la temperatura de agua fría.
8. La vida útil de la instalación (n) se establece en 20 años.

4.2.2. Caracterización de la demanda energética.

Puesto que se pretende satisfacer tanto la demanda de ACS como la de calefacción y refrigeración, será necesario determinar, para cada una de las ciudades bajo estudio, la distribución de cada una de ellas a lo largo del año. Esto permitirá realizar un perfil del total de energía demandada para cada emplazamiento.

El Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) en su "Escala de calificación energética para edificios de nueva construcción" estima la cantidad de energía anual que demanda un bloque de viviendas típico en las diferentes ciudades del territorio español para cada uno de los tres conceptos definidos. En el documento del IDAE, la demanda de calefacción y refrigeración se determina utilizando el programa LIDER. La calidad constructiva de la vivienda será la que deriva del cumplimiento estricto de los requisitos del HE1 del CTE. Por su parte, la demanda de ACS se calcula de acuerdo con las especificaciones del HE4 del CTE, considerando el caudal y la temperatura de alimentación de agua fría indicada en dicho documento. Para la tasa de ocupación de cada vivienda, se han tomado los datos medios del Censo de Edificación del INE, que establece una tasa de 1 ocupante cada 33.3 m².

Puesto que una de las hipótesis establecida es que la refrigeración se produce con EER = 0.7, la energía que debe aportar el sistema es mayor a la demandada. Se define así la energía primaria de refrigeración como:

$$D_{p,ref} = \frac{D_{ref}}{EER}$$

siendo D_{ref} la demanda de refrigeración, establecida en el documento del IDAE. Esto mismo debe ser considerado al estimar la demanda de calefacción, pero puesto que se ha supuesto COP = 1, la energía térmica a aportar será igual a la demandada.

Finalmente, la demanda total de la vivienda será la suma de la demanda de calefacción, la energía primaria de refrigeración y la demanda de ACS. El presente estudio tomará los datos reflejados en el IDAE como referencia. Dichos datos se muestran en la Tabla 4.1.

Una vez obtenidos los datos de demanda anual, se procede a determinar la distribución mensual tanto para ACS como para calefacción y refrigeración, de forma que se obtenga el perfil a lo largo del año.

Hay que destacar que todos los datos que se van a determinar corresponden a la demanda por metro cuadrado de vivienda, por lo que para obtener el total a satisfacer debe multiplicarse este valor por los 2700 m² que ocuparán en total las 30 viviendas de 90 m² cada una que se establecieron en las hipótesis.

Ciudad	Demanda Calefacción (KWh/m ²)	Demanda Refrigeración (KWh/m ²)	Energía Primaria Refrigeración (KWh/m ²)	Demanda ACS (KWh/m ²)	Demanda Total (KWh/m ²)
Albacete	49.1	9.7	13,9	13.1	76,1
Alicante	13.2	16.7	23,9	12.3	49,4
Almería	10.8	19.1	27,3	12.1	50,2
Ávila	69.5	0.0	0,0	13.7	83,2
Badajoz	27.4	17.1	24,4	12.6	64,4
Barcelona	28.3	8.0	11,4	12.8	52,5
Bilbao	40.0	0.0	0,0	13.0	53,0
Burgos	77.1	0.0	0,0	13.8	90,9
Cáceres	32.1	19.0	27,1	12.7	71,9
Cádiz	9.0	14.6	20,9	12.3	42,2
Castellón	21.4	13.1	18,7	12.5	52,6
Ceuta	18.3	5.7	8,1	12.6	39,0
Ciudad Real	45.0	13.2	18,9	13.0	76,9
Córdoba	23.5	22.4	32,0	12.4	67,9
Cuenca	60.9	5.6	8,0	13.3	82,2
Gerona	42.4	6.4	9,1	13.0	64,5
Granada	37.4	12.5	17,9	12.9	68,2
Guadalajara	50.4	7.8	11,1	13.1	74,6
Huelva	12.6	18.3	26,1	12.3	51,0
Huesca	50.6	7.9	11,3	13.1	75,0
Jaén	26.2	22.3	31,9	12.3	70,4

Tabla 4.1. Demanda Anual en bloques de viviendas.

Ciudad	Demanda Calefacción (KWh/m2)	Demanda Refrigeración (KWh/m2)	Energía Primaria Refrigeración (KWh/m2)	Demanda ACS (KWh/m2)	Demanda Total (KWh/m2)
La Coruña	30.0	0.0	15,9	13.0	43,0
Las Palmas de Gran Canaria	3.5	11.1	0,0	11.8	31,2
León	65.5	0.0	17,7	13.6	79,1
Lérida	42.0	12.4	8,4	13.0	72,7
Logroño	47.4	5.9	0,0	13.2	69,0
Lugo	60.2	0.0	15,4	13.5	73,7
Madrid	43.2	10.8	23,0	13.0	71,6
Málaga	13.4	16.1	20,3	12.3	48,7
Melilla	9.3	14.2	17,9	12.2	41,8
Murcia	19.8	12.5	8,1	12.5	50,2
Orense	43.2	5.7	0,0	13.0	64,3
Oviedo	48.3	0.0	0,0	13.3	61,6
Palencia	61.2	0.0	22,7	13.5	74,7
Palma de Mallorca	14.4	15.9	0,0	12.4	49,5
Pamplona	57.5	0.0	0,0	13.3	70,8
Pontevedra	26.5	0.0	3,9	12.9	39,4
Salamanca	62.3	2.7	0,0	13.5	79,7
San Sebastián	46.9	0.0	0,0	13.2	60,1
Santander	33.0	0.0	22,3	13.0	46,0
Santa Cruz de Tenerife	3.5	15.6	6,0	11.8	37,6
Segovia	65.7	4.2.	15,9	13.5	85,2

Tabla 4.1 (Continuación). DemandaAnual en bloque de viviendas.

Ciudad	Demanda Calefacción (KWh/m ²)	Demanda Refrigeración (KWh/m ²)	Energía Primaria Refrigeración (KWh/m ²)	Demanda ACS (KWh/m ²)	Demanda Total (KWh/m ²)
Sevilla	16.6	23.4	33,4	12.3	62,3
Soria	72.1	0.0	0,0	13.7	85,8
Tarragona	21.8	16.4	23,4	12.4	57,6
Teruel	64.5	2.8	4,0	13.5	82,0
Toledo	39.0	18.9	27,0	12.8	78,8
Valencia	21.3	12.6	18,0	12.5	51,8
Valladolid	60.6	4.5	6,4	13.3	80,3
Vitoria	65.4	0.0	0,0	13.5	78,9
Zamora	56.3	5.3	7,6	13.3	77,2
Zaragoza	40.6	11.4	16,3	12.9	69,8

Tabla 4.1 (Continuación). Demanda anual en bloque de viviendas.

a) Demanda de Calefacción.

La estimación de los perfiles de demanda se basará en la premisa de que la instalación de calefacción sólo es necesaria cuando la temperatura descienda de 21°C. Los datos de temperatura han sido proporcionados por el programa informático Meteonorm, que permite obtener los datos medios de temperatura ambiente para cada hora del año en cada ciudad española. A partir de estos datos y teniendo en cuenta que el sistema de calefacción sólo actuará un máximo de 15 horas diarias, tal y como se establece en las hipótesis de la Subsección 4.2.1, se va a realizar una distribución diaria de la demanda.

El procedimiento que se va a seguir para conseguir este objetivo consistirá en realizar una ponderación del total anual de calefacción de la forma que se detalla a continuación.

Para cada día del año se va a considerar el horario de 08:00h a 23:00h en el que el sistema puede activarse. Durante ese horario, se tomarán las horas del día en las que la temperatura media ambiente desciende de 21°C. Se define el factor de ponderación "P" como la suma a lo largo del día de la diferencia entre 21°C y la temperatura ambiente siempre que esta diferencia sea positiva, ya que será entonces cuando el sistema entre en funcionamiento. Se tendrá por tanto un factor P distinto para cada día del año.

$$P = \sum_{h=8}^{h=23} (21 - T_{amb,h})$$

Este factor permite establecer la proporción del total de demanda anual que se tiene para un día cualquiera. Esa proporción vendrá dada por el factor P del día bajo consideración dividido por la suma de los 365 factores correspondientes a todos los días del año.

Por tanto, la demanda de calefacción para un día determinado será igual al total anual multiplicado por el porcentaje del total de la demanda que se corresponde con ese día.

Así, la siguiente expresión permite obtener la demanda diaria en un día "i" cualquiera:

$$D_{cal,i} = \frac{P_i}{\sum_{j=1}^{365} P_j} \cdot D_{cal,anual}$$

Puesto que la demanda anual es conocida según los datos dados por el IDAE, la ponderación detallada permite obtener la distribución diaria de demanda a lo largo del año.

A modo ilustrativo, se muestra un ejemplo de lo explicado para estimar la demanda que se tendría en Sevilla el día 1 de Marzo. Los datos de temperatura que se han obtenido de Meteonorm en cada franja horaria se exponen en la Tabla 4.2. Sumando la diferencia (21 - Ta) para el total de horas que el sistema de calefacción ha estado funcionando, se obtiene un factor de ponderación de 46,4. Haciendo este mismo cálculo para todos los días del año y sumando los 365 factores obtenidos, se tiene un total de 14857. Por tanto, aplicando la expresión para el cálculo de la demanda diaria se tiene:

$$D_{Cal,1Marzo} = \frac{46,4}{14857} \cdot 16.6 (KWh/m^2) = 0,052 KWh/m^2$$

Realizando este mismo procedimiento para el resto de días del año, se puede obtener la demanda que se produce en cada uno de ellos de forma aproximada. Una vez estimada la demanda diaria, se calcula la distribución mensual como suma de los valores diarios.

La Figura 4.1. muestra la demanda mensual de calefacción en Sevilla.

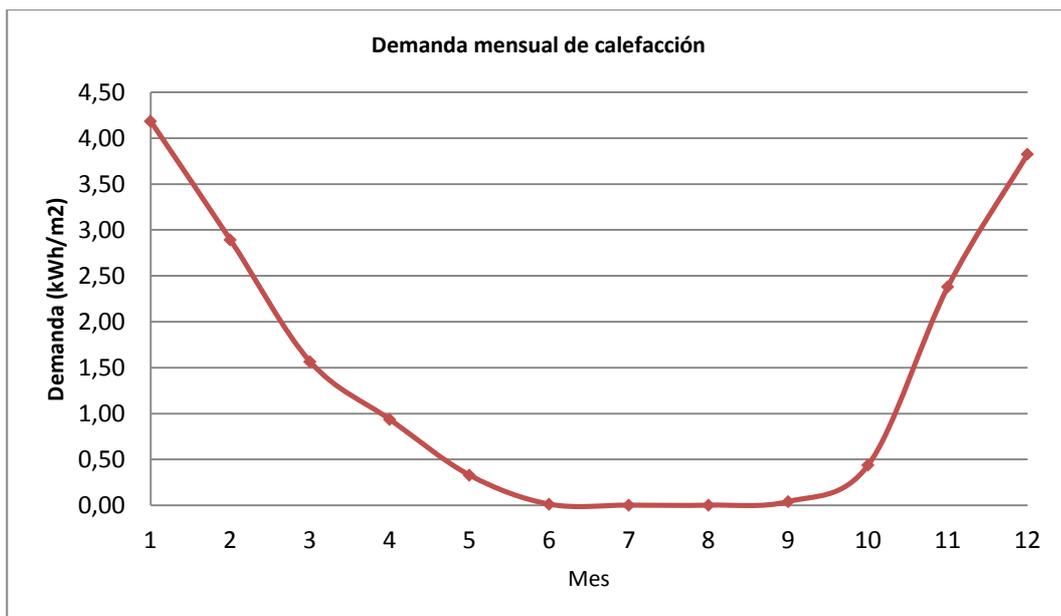


Figura 4.1. Distribución mensual de demanda de calefacción en Sevilla.

Mes	Día	Hora	Temperatura Ambiente (°C)	Sistema Funcionando	21 - Ta (°C)	21 - Ta >0
3	1	1	14,2	NO	-	-
3	1	2	13,5	NO	-	-
3	1	3	12,8	NO	-	-
3	1	4	12,4	NO	-	-
3	1	5	12,0	NO	-	-
3	1	6	11,7	NO	-	-
3	1	7	11,4	NO	-	-
3	1	8	11,1	NO	-	-
3	1	9	11,8	SI	9,2	9,2
3	1	10	13,9	SI	7,1	7,1
3	1	11	15,9	SI	5,1	5,1
3	1	12	17,8	SI	3,2	3,2
3	1	13	19,3	SI	1,7	1,7
3	1	14	20,5	SI	0,5	0,5
3	1	15	21,3	NO	-0,3	-
3	1	16	21,6	NO	-0,6	-
3	1	17	21,4	NO	-0,4	-
3	1	18	20,6	SI	0,4	0,4
3	1	19	19,3	SI	1,7	1,7
3	1	20	17,9	SI	3,1	3,1
3	1	21	17,0	SI	4,0	4,0
3	1	22	16,2	SI	4,8	4,8
3	1	23	15,4	SI	5,6	5,6
3	1	24	14,5	NO	-	-
					Factor "P"	46,4

Tabla 4.2. Ponderación de demanda para el día 1 de enero en Sevilla.

b) Demanda de refrigeración

El enfoque es análogo al explicado para la demanda de calefacción. En este caso se supone que el sistema de refrigeración funcionará sólo cuando la temperatura ambiente supere los 24°C siempre que esto ocurra entre las 08:00 h y las 23:00h. Para realizar la estimación de la demanda diaria se realiza el mismo proceso de ponderación explicado en el apartado a, teniendo en cuenta que para el cálculo del factor de ponderación ahora se toma la diferencia ($T_a - 24$), siempre que esta sea positiva. Una vez estimados los datos diarios, se estima la distribución mensual sumando los valores diarios correspondientes a cada mes.

A modo de ejemplo, en la Figura 4.2. se representa la distribución mensual que se produce en Sevilla.

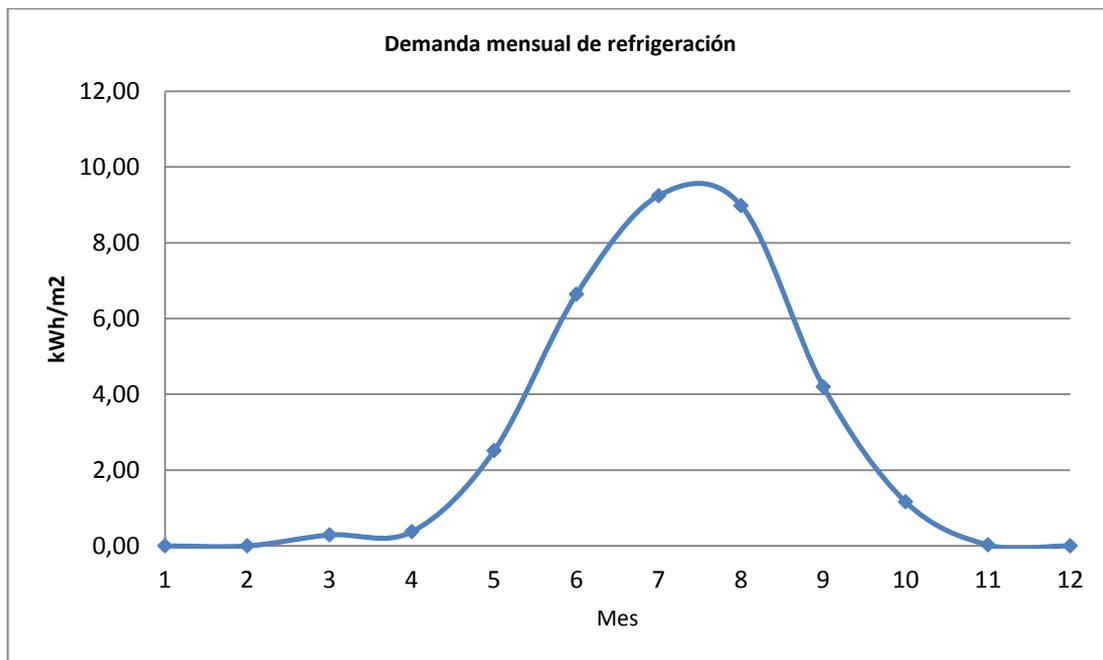


Figura 4.2. Distribución mensual de demanda de refrigeración en Sevilla.

c) Demanda de ACS.

Tal como se estableció en las hipótesis (ver 4.2.1.), el caudal de ACS se considerará constante. Esto hace que, conocida la demanda anual, se pueda realizar una estimación diaria considerando sólo la diferencia entre la temperatura del ACS y la de entrada de agua fría.

Estos datos serán obtenidos de la norma UNE 94002:2005. En ella se establece una temperatura para el ACS de 45°C. Por otra parte, también muestra un cálculo de la temperatura media mensual de agua fría en todas las capitales de provincia españolas. En este trabajo se utilizarán estos valores para realizar una ponderación de la demanda energética diaria y mensual debido al consumo de ACS. Puesto que la citada norma UNE proporciona la media mensual en lugar de los valores diarios de temperatura de agua fría, en este trabajo se considerará la demanda media mensual, de forma que se supone la misma demanda para todos los días de un mes determinado. Esto permite estimar la distribución de demanda utilizando, para cada mes, un factor de ponderación dado por la diferencia de temperatura anteriormente citada multiplicada por el número de días del mes en cuestión.

Así, para un mes determinado "i", la demanda se estima de acuerdo a la siguiente expresión:

$$D_{ACS_i} = \frac{n_i \cdot (T_{ACS} - \bar{T}_{Af,i})}{\sum_{j=1}^{j=12} n_j \cdot (T_{ACS} - \bar{T}_{Af,j})} \cdot D_{anual}$$

donde "n_i" es el número de días que tiene el mes considerado, T_{ACS} es la temperatura a la que se produce el ACS y \bar{T}_{Af} es la temperatura media mensual de entrada del agua fría. Se definirá el término que multiplica a la demanda anual como "Factor de ponderación", pues permite establecer el peso que tiene cada mes en el total anual.

Para ilustrar esto, se procede a la estimación de la energía que es demandada para consumo de ACS en Sevilla en cada mes del año. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.3. En ella se ha realizado la ponderación del total de energía anual consumida (12,38 KWh/m²) de la forma anteriormente explicada. Estos resultados son representados gráficamente en la Figura 4.3, que muestra la distribución mensual de la demanda.

Mes	Número de Días (n)	T _{ACS} (°C)	Temperatura Agua Fria (°C)	Diferencia T _{ACS} - T _{AF} (°C)	Factor de ponderación	Demanda Mensual (KWh/m2)
Enero	31	45	11	34	0,098	1,21
Febrero	28	45	11	34	0,088	1,09
Marzo	31	45	13	32	0,092	1,13
Abril	30	45	14	31	0,086	1,06
Mayo	31	45	16	29	0,084	1,03
Junio	30	45	19	26	0,073	0,89
Julio	31	45	21	24	0,069	0,85
Agosto	31	45	21	24	0,069	0,85
Septiembre	30	45	20	25	0,070	0,86
Octubre	31	45	16	29	0,084	1,03
Noviembre	30	45	13	32	0,089	1,10
Diciembre	31	45	11	34	0,098	1,21

Tabla 4.3. Demanda Mensual de ACS en Sevilla

d) Demanda total

Una vez caracterizados los tres términos que intervienen en la demanda de energía térmica de una vivienda, se puede obtener el total de energía a satisfacer como la suma de las demandas de calefacción, refrigeración y ACS. Tomando de nuevo el ejemplo de Sevilla, en la Figura 4.4. se realiza la representación de la distribución mensual total de demanda. De forma conjunta, en esta misma gráfica también se muestran las distribuciones de los términos de calefacción, refrigeración y ACS, que ya fueron establecidos en los apartados a, b y c.

Como se aprecia en la Figura 4.4. el término predominante en Sevilla, que determinará en buena medida el dimensionamiento de la instalación, es el debido a la demanda de refrigeración. Este supone un 53% del total, siendo muy superior a las exigencias de calefacción (27%) y ACS (20%).

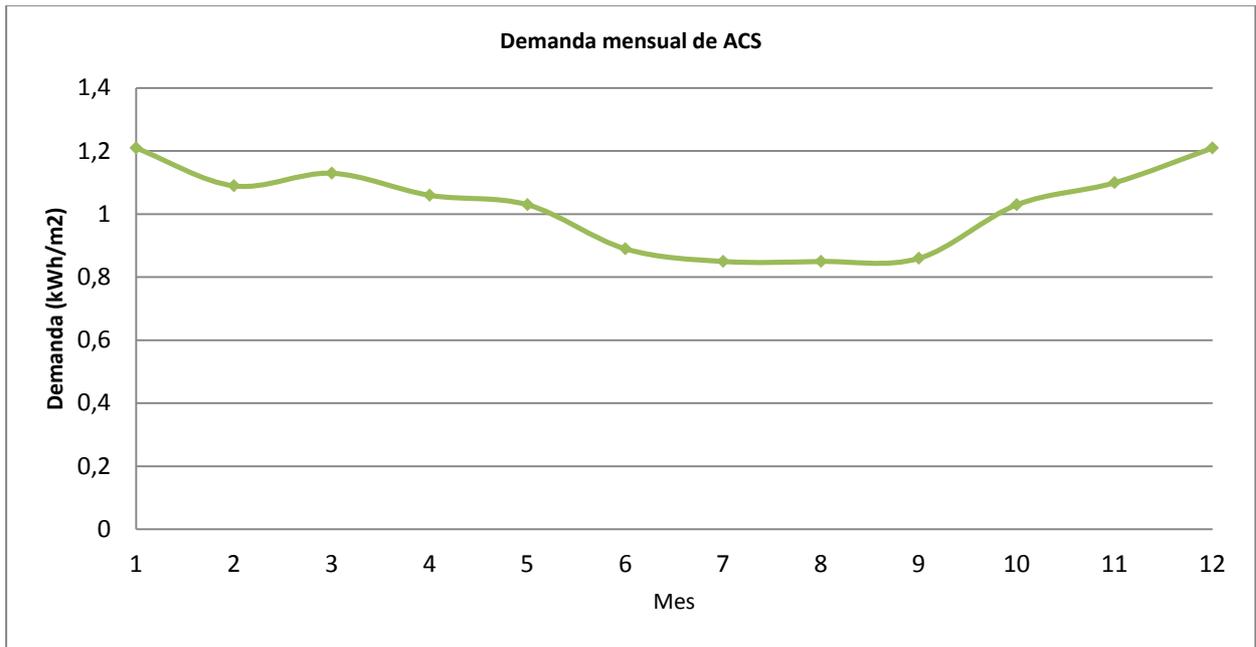


Figura 4.3. Distribución mensual de demanda de ACS en Sevilla

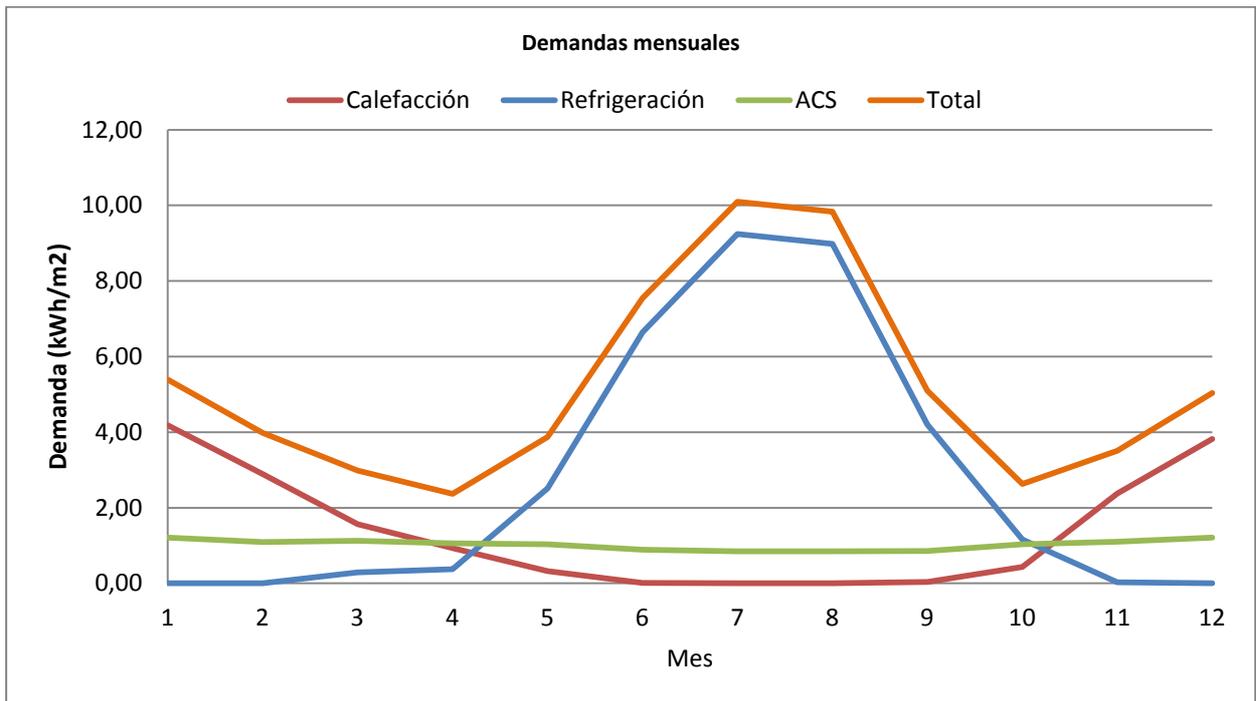


Figura 4.4. Demanda mensual en Sevilla.

Establecido el perfil de demanda para cada una de las 52 capitales de provincia bajo estudio, se puede realizar una clasificación según la forma que este presente. Cabe destacar que la demanda de ACS presentará curvas semejantes en todas las ciudades y nunca será el término más importante de los tres considerados. Esto se puede verificar en el anexo A. Por tanto, se distinguirán tres tipos de perfil, definidos de la siguiente forma:

- **Perfil tipo 1.**

Climas fríos donde predomina la demanda de calefacción. y en los que apenas será necesario hacer uso del sistema de refrigeración. Un ejemplo de este tipo de perfil se aprecia en la distribución de demanda de Burgos, representada en la Figura 4.5.

- **Perfil tipo 2.**

En este caso, el consumo de refrigeración y calefacción son similares, teniéndose dos picos de demanda diferenciados a lo largo del año. La Figura 4.6. que muestra la distribución en Ciudad Real , es un ejemplo de este tipo de perfil.

- **Perfil tipo 3.**

El ejemplo de Sevilla, analizado previamente, es un caso de distribución de demanda de tipo 3. Aquí, como se observa en la Figura 4.4, la mayor exigencia energética se produce en verano debido a la refrigeración, siendo esta muy superior a la demanda de calefacción.

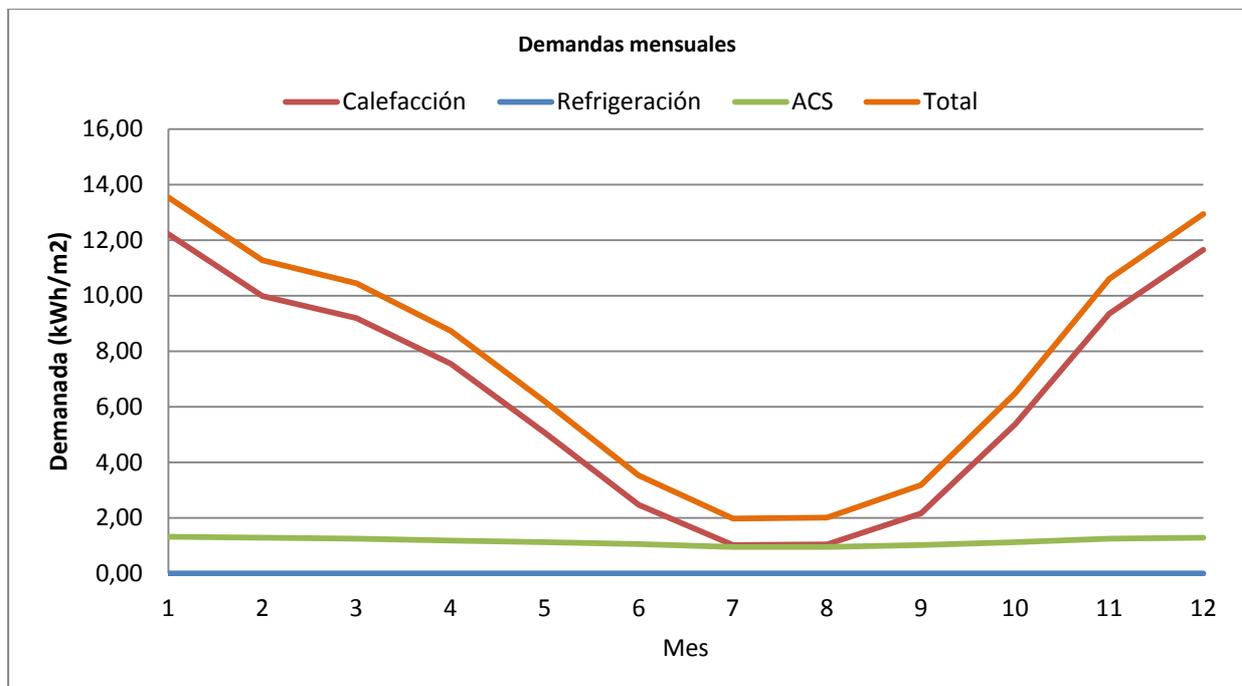


Figura 4.5. Demanda mensual en Burgos. Perfil tipo 1.

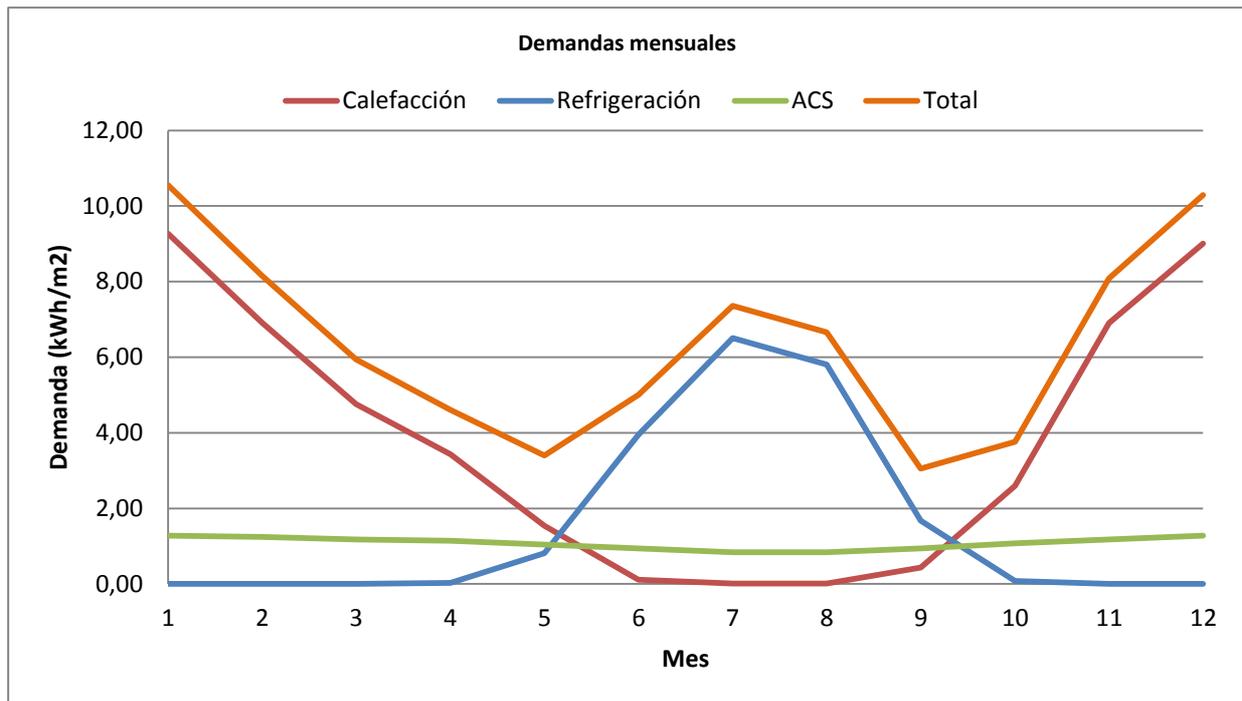


Figura 4.6. Demanda mensual en Ciudad Real. Perfil tipo 2.

4. 2.3. Caracterización de la Energía Producida.

La energía producida en un emplazamiento determinado, será proporcional a la radiación recibida en los captadores solares (H_g), el área total de captadores solares instalado (A_c) y el rendimiento de la instalación (η). Así, puede realizarse una estimación de la producción térmica haciendo uso de la siguiente expresión:

$$E_{PR} = \eta \cdot H_g \cdot A_c$$

En este trabajo se van a considerar dos inclinaciones distintas de captadores en cada ciudad, eligiendo posteriormente para el estudio de viabilidad económica aquella para la que se tiene un mayor porcentaje de energía aprovechada. En concreto, se va a estimar la producción para una inclinación igual a la latitud de la ciudad bajo estudio más 15°C y para una inclinación 15 °C inferior a la latitud. Por tanto, serán necesarios los perfiles de radiación que los captadores reciben en ambas situaciones en cada una de las capitales de provincia consideradas para poder realizar la estimación de la energía producida.

Los datos de radiación que se utilizarán son tomados del software Meteonorm, una base de datos que contiene valores meteorológicos que son generados continuamente en estaciones instaladas por todo el planeta. Esto permite que puedan obtenerse datos en todos los emplazamientos deseados y con las dos inclinaciones de captadores previamente definidas. Así, se puede realizar un perfil de radiación a lo largo de todo el año, ya sea utilizando valores diarios o bien mensuales. En este caso, se va a hacer uso de los valores mensuales, más estables y por tanto más fiables que los diarios.

Al igual que se hiciera para la caracterización de la demanda, se van a mostrar varios ejemplos que ilustren lo explicado en esta subsección. Por coherencia con lo explicado en 4.2.2. se van a representar las ciudades de Sevilla, Burgos y Ciudad Real, de modo que se tengan los perfiles de radiación de tres ciudades con climas muy distintos. Se han tomado los valores de radiación horarios generados por Meteonorm y, sumándolos para cada mes del año, se han obtenido los datos que se exponen en la Tabla 4.4. En ella se muestra la

radiación mensual recibida en cada una de las tres ciudades citadas y para dos inclinaciones de captadores diferentes. En las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se representan gráficamente los datos de la tabla, obteniéndose los perfiles de radiación correspondientes a cada una de las ciudades.

Si se comparan las dos inclinaciones de captadores estudiadas consideradas, se puede decir que, en términos relativos, las tres gráficas mostradas presentan un comportamiento similar. En todos los casos los captadores situados a menor inclinación (Latitud - 15º) reciben una radiación netamente superior en verano, mientras que en invierno la captación será ligeramente inferior a la obtenida en la alternativa Latitud + 15º. En conjunto, la radiación anual es mayor para el caso (Latitud - 15º) en las tres ciudades .

Puesto que la energía que producirá la instalación es directamente proporcional a la radiación recibida, los perfiles que se obtienen al estimar la producción tendrán la misma forma que los mostrados en las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9. Considerando que, según las hipótesis establecidas en 4.2.1, se ha establecido un rendimiento global de la instalación igual a 0.5, la energía que producirá la misma será igual a la mitad de la radiación recibida. Los datos de energía producida se muestran en la Tabla 4.5.

	Radiación Mensual (KWh/m2)					
	Sevilla		Burgos		Ciudad Real	
	Latitud - 15ºC	Latitud + 15ºC	Latitud - 15ºC	Latitud + 15ºC	Latitud - 15ºC	Latitud + 15ºC
Enero	116,0	143,7	74,8	90,5	96,9	119,3
Febrero	120,1	135,8	96,8	106,0	121,6	137,7
Marzo	174,3	179,2	153,5	157,2	166,8	172,0
Abril	170,9	154,6	171,7	156,1	182,3	166,5
Mayo	206,2	170,9	186,1	153,6	190,4	157,4
Junio	211,1	167,6	201,0	158,4	216,9	171,2
Julio	233,0	187,6	212,2	170,2	229,0	184,1
Agosto	211,3	185,3	198,8	172,6	219,0	193,0
Septiembre	185,7	183,1	163,5	158,3	174,3	171,1
Octubre	152,8	167,7	119,6	126,7	138,4	152,5
Noviembre	103,8	122,9	79,3	91,0	87,9	102,9
Diciembre	100,0	124,8	65,9	79,4	81,3	98,8
Total	1985,2	1923,2	1723,2	1620,0	1905,1	1826,5

Tabla 4.4. Radiación mensual en varias ciudades.

Se puede comprobar que todos los perfiles de radiación son, cualitativamente, similares a los aquí expuestos. Por tanto, se podría considerar que la menor inclinación de captadores es la mejor opción al realizar la instalación. En general, esto se cumple en ciudades que requieran una gran demanda de refrigeración, pues la mayor producción que se tiene en los meses de verano podrá ser aprovechada en un alto porcentaje para satisfacerla. Sin embargo, en climas fríos con un perfil de demanda tipo 1, la demanda de refrigeración será muy baja, por lo que gran parte de la producción no podrá ser aprovechada. En esos casos podría ser mejor opción situar los captadores a mayor inclinación para producir más en los meses de invierno.

Por tanto, para elegir la mejor inclinación de captadores en cada caso, no debe ser considerada la energía producida, sino la cantidad de ella que es aprovechada para satisfacer la demanda. La forma de llevarlo a cabo se explica detalladamente a continuación en la Subsección 4.2.4.

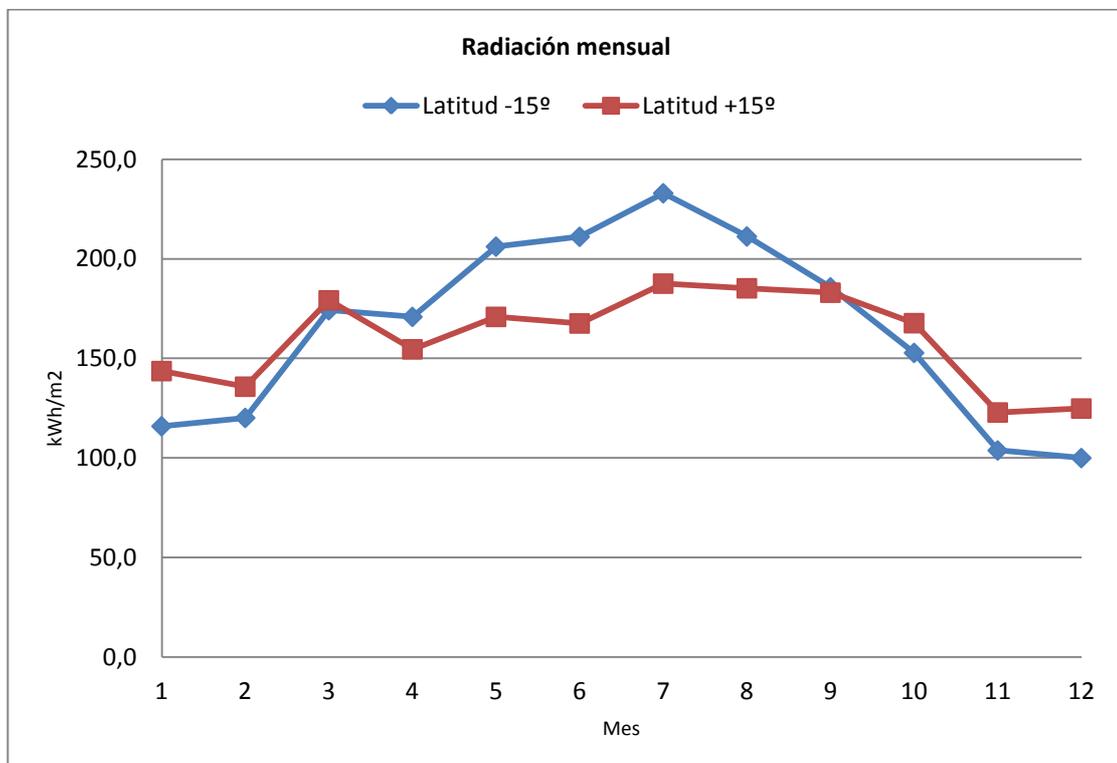


Figura 4.7. Perfil de Radiación. Sevilla.

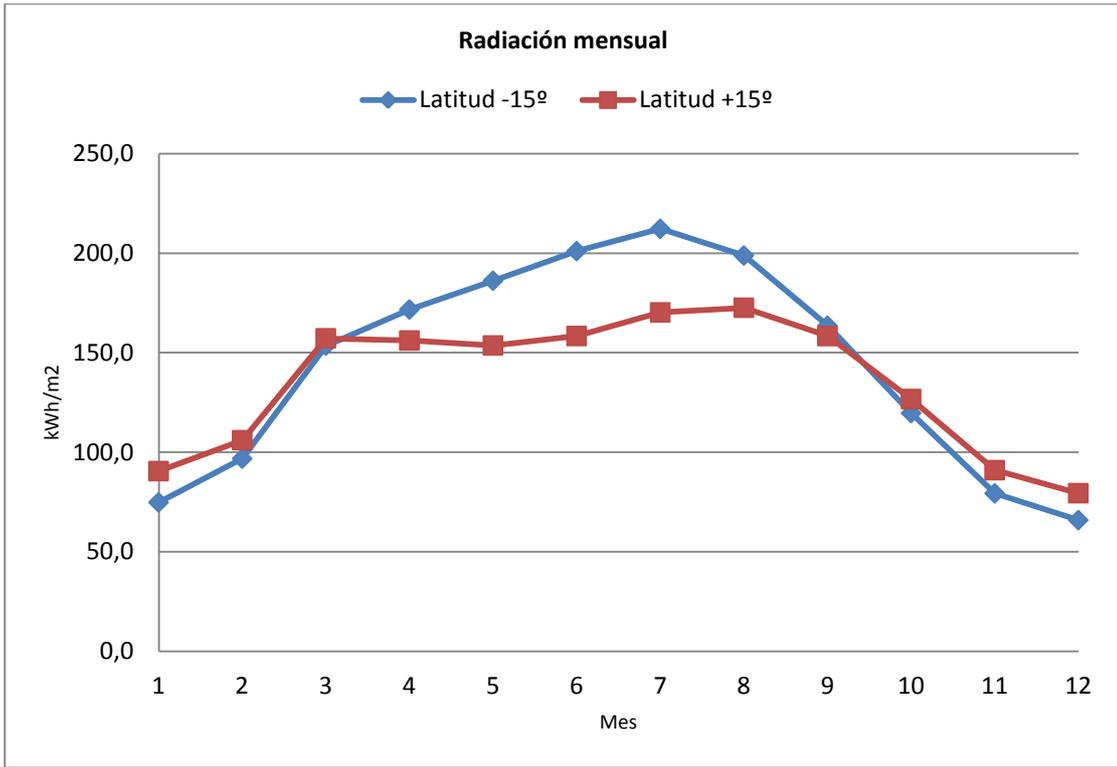


Figura 4.8. Perfil de Radiación. Burgos

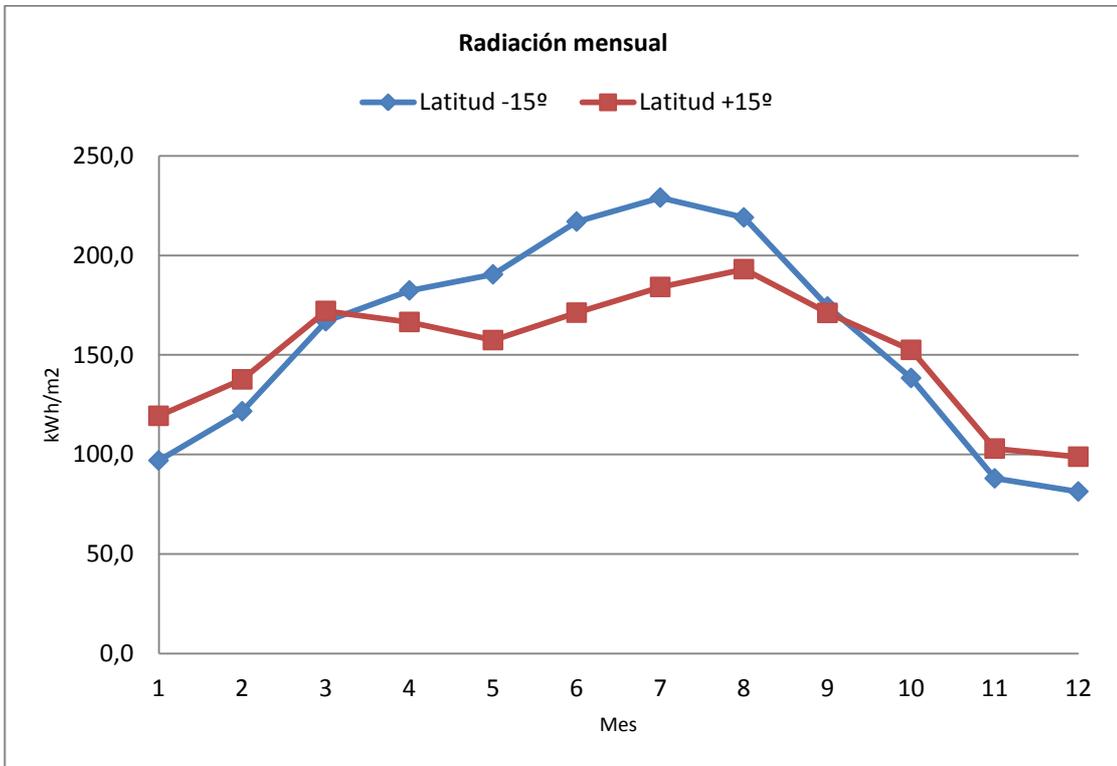


Figura 4.9. Perfil de Radiación. Ciudad Real.

Energía Térmica Producida Mensual (KWh/m2)						
	Sevilla		Burgos		Ciudad Real	
	Latitud - 15°C	Latitud + 15°C	Latitud - 15°C	Latitud + 15°C	Latitud - 15°C	Latitud + 15°C
Enero	58,0	71,9	37,4	45,3	48,5	59,7
Febrero	60,1	67,9	48,4	53,0	60,8	68,9
Marzo	87,2	89,6	76,8	78,6	83,4	86,0
Abril	85,5	77,3	85,9	78,1	91,2	83,3
Mayo	103,1	85,5	93,1	76,8	95,2	78,7
Junio	105,6	83,8	100,5	79,2	108,5	85,6
Julio	116,5	93,8	106,1	85,1	114,5	92,1
Agosto	105,7	92,7	99,4	86,3	109,5	96,5
Septiembre	92,9	91,6	81,8	79,2	87,2	85,6
Octubre	76,4	83,9	59,8	63,4	69,2	76,3
Noviembre	51,9	61,5	39,7	45,5	44,0	51,5
Diciembre	50,0	62,4	33,0	39,7	40,7	49,4
Total	992,6	961,6	861,6	810,0	952,6	913,3

Tabla 4.5. Energía producida mensual en varias ciudades.

4.2.4. Cálculo de AFSC

Se pretende realizar el cálculo del área de captación que será necesario instalar en varias situaciones, que se definirán más adelante en esta misma subsección.

Los resultados que se obtendrán permitirán alcanzar un triple objetivo.

En primer lugar, al realizar los cálculos para dos inclinaciones diferentes, se pueden comparar los resultados obtenidos en ambos casos, pudiendo elegir la inclinación de captadores que produce un mejor aprovechamiento de la energía en cada ciudad y para cada uno de los porcentajes de demanda satisfechos (FSC). Por otra parte, para un FSC determinado, el cálculo del área permite obtener el porcentaje de aprovechamiento solar (PAS) que se alcanza en la instalación. Por último, para cada FSC, se determinarán un PAS y un área de captador. Esto posibilita la obtención de una relación entre estos tres parámetros. Este es uno de los objetivos principales de este estudio y será desarrollado en la Subsección 4.2.5.

El método que se va a llevar a cabo para el cálculo de cada una de las áreas es el proceso iterativo que se define a continuación.

1. Conocido el emplazamiento, se tienen datos de la demanda total a satisfacer así como de la energía producida por m^2 de captador.
2. Se define la FSC, fracción de la demanda que va a ser cubierta mediante energía solar.
3. Se establece un área de captador.
4. Se calculan para cada mes la energía térmica producida y la energía aprovechada por los captadores
5. Se calcula el PAS y la FSC que se obtienen con el área de captadores establecidas en (3).
6. Se modifica el área hasta que la FSC sea la definida en (2)
7. El área obtenida es la que permite el FSC deseado. Esto es, A_{FSC}

El procedimiento detallado se va a realizar en cada una de las 52 capitales de provincia española. Para cada una de ellas, se procederá al cálculo del área para dos inclinaciones diferentes de los captadores. Se estimará el área necesaria cuando la inclinación es 15° superior a la latitud del lugar (Latitud $+15^\circ$) y cuando esta es 15° inferior a la latitud (Latitud -15°).

En cuanto a la demanda satisfecha, se van a obtener datos para diez situaciones diferentes. Se modificará la fracción solar cubierta desde un 10% hasta un 100%, en intervalos del 10%. De esta manera, para cada ciudad e inclinación, se obtendrán un total de diez áreas A_{FSC} , cada una de ellas satisfaciendo la FSC correspondiente.

Con esta metodología se ha llevado a cabo un análisis de toda la casuística posible. Esto permite, para cada ciudad, obtener el área de captadores necesaria para satisfacer una determinada demanda así como la inclinación óptima que permite minimizar dicho área en cada caso.

A continuación se muestra un ejemplo ilustrativo del proceso iterativo previamente explicado. En concreto, se va a proceder a calcular el área mínima de captadores que permite satisfacer un 30% de la demanda energética en un edificio residencial en la ciudad de Sevilla.

Conocido el emplazamiento, se toman los datos de demanda del documento del IDAE tal como se estableció en la Subsección 4.2.2. En el citado documento, los datos de demanda se muestran por m^2 de inmueble. De acuerdo a las hipótesis establecidas en 4.2.1, se ha supuesto un edificio de $2700 m^2$, lo que permite establecer la demanda total del mismo. Por su parte, los datos de radiación fueron obtenidos en 4.2.3. del Software Meteonorm.

La Tabla 4.6. muestra de forma conjunta los datos de demanda mensuales así como la radiación recibida por m^2 de captador solar. Se representan en la misma tabla los datos para las dos inclinaciones consideradas. También se muestra la energía térmica producida, por m^2 de captador, al considerar un rendimiento $\eta=0.5$.

Una vez definidos los datos climáticos, y con el objetivo de alcanzar un $FSC = 30$, se establece un primer área de captadores, que en este caso será $A = 40m^2$. Este valor sirve de primera aproximación y a partir de él, se calcula la cantidad de energía térmica producida y cuanta de ella es aprovechada para satisfacer la demanda del edificio. Con estos datos se realiza un primer cálculo tanto del PAS como del FSC.

Mes	Demanda (KWh/m2)	Demanda (KWh)	Radiación (KWh/m2)	Energía Producida (KWh/m2)	Radiación Recibida (KWh/m2)	Energía Producida (Kwh/m2)
			Latitud - 15°		Latitud + 15°	
Enero	5,36	14484	116,0	58,0	143,7	71,8
Febrero	4,07	10996	120,1	60,1	135,8	67,9
Marzo	2,97	8008	174,3	87,1	179,2	89,6
Abril	2,39	6444	170,9	85,4	154,6	77,3
Mayo	3,85	10392	206,2	103,1	170,9	85,4
Junio	7,56	20406	211,1	105,6	167,6	83,8
Julio	10,08	27209	233,0	116,5	187,6	93,8
Agosto	9,82	26501	211,3	105,6	185,3	92,6
Septiembre	5,11	13792	185,7	92,9	183,1	91,5
Octubre	2,61	7036	152,8	76,4	167,7	83,9
Noviembre	3,52	9503	103,8	51,9	122,9	61,4
Diciembre	5,01	13516	100,0	50,0	124,8	62,4
Total	62,33	168287	1985,2	992,6	1923,2	961,6

Tabla 4.6. Datos de Demanda y Producción. Sevilla.

En la Tabla 4.7. se muestran los datos obtenidos de esta primera aproximación para la inclinación de captadores igual a Latitud - 15°, mientras que la Tabla 4.8. representa los mismos valores para inclinación igual a Latitud +15°. Se puede comprobar como, para un área $A=40m^2$, la fracción solar cubierta por la instalación no alcanza el 30% deseado. Es preciso por tanto aumentar el área de captadores. Se realiza un proceso iterativo hasta que finalmente se alcanza el área mostrada en la Tabla 4.9.

En este caso, el área mínima es $A = 50.86 m^2$, siendo la inclinación óptima igual a Latitud -15°.

Mes	Demanda (KWh)	Energía Producida (KWh)	Energía Aprovechada (KWh)	Energía Perdida (KWh)	PAS	FSC
Enero	14484	2319,0	2319,04	0,0	100	16,01
Febrero	10996	2402,7	2402,74	0,0	100	21,85
Marzo	8008	3485,1	3485,08	0,0	100	43,52
Abril	6444	3417,9	3417,92	0,0	100	53,04
Mayo	10392	4124,3	4124,32	0,0	100	39,69
Junio	20406	4222,9	4222,86	0,0	100	20,69
Julio	27209	4660,1	4660,1	0,0	100	17,13
Agosto	26501	4225,9	4225,94	0,0	100	15,95
Septiembre	13792	3714,6	3714,6	0,0	100	26,93
Octubre	7036	3056,1	3056,1	0,0	100	43,43
Noviembre	9503	2075,9	2075,9	0,0	100	21,85
Diciembre	13516	1999,2	1999,22	0,0	100	14,79
Total	168287	39703,8	39703,82	0,0	100	23,59

Tabla 4.7. Cálculo de $A_{FSC=30}$. Inclinación de captadores Latitud -15° .

El proceso descrito será repetido para cada uno de los diez FSC en cada una de las capitales de provincia. En la Tabla 4.10 se representa una tabla resumen en la que se muestra, para cada ciudad, la inclinación óptima, el área de captadores necesaria y el PAS que se obtienen para un $FSC = 30$. En el Anexo de este estudio se pueden verificar las tablas resumen en las que se muestra el área necesaria en cada ciudad para cada uno de los FSC.

Mes	Demanda (KWh)	Energía Producida (KWh)	Energía Aprovechada (KWh)	Energía Perdida (KWh)	PAS	FSC
Enero	14484	2873,4	2873,4	0,0	100,00	19,84
Febrero	10996	2716,5	2716,54	0,0	100,00	24,70
Marzo	8008	3583,9	3583,9	0,0	100,00	44,75
Abril	6444	3092,0	3092,02	0,0	100,00	47,98
Mayo	10392	3417,9	3417,92	0,0	100,00	32,89
Junio	20406	3351,9	3351,86	0,0	100,00	16,43
Julio	27209	3752,1	3752,1	0,0	100,00	13,79
Agosto	26501	3705,4	3705,36	0,0	100,00	13,98
Septiembre	13792	3661,3	3661,32	0,0	100,00	26,55
Octubre	7036	3354,8	3354,8	0,0	100,00	47,68
Noviembre	9503	2457,1	2457,12	0,0	100,00	25,86
Diciembre	13516	2496,9	2496,88	0,0	100,00	18,47
Total	168287	38463,2	38463,22	0,0	100,00	22,86

Tabla 4.8. Cálculo de $A_{FSC=30}$. Inclinación de captadores Latitud +15°.

FSC = 30%					
Inclinación	AFSC 30% (m ²)	Demanda (KWh)	Energía Aprovechada (KWh)	Energía Perdida (KWh)	PAS
Latitud - 15°	50,86	168287	50483	0,0	100
Latitud + 15°	52,50	168287	50483	0,0	100

Tabla 4.9. Área de captadores para FSC = 30%

Capital de provincia	Demanda térmica (kWh/año)	Tipo de perfil	FSC 30%		
			Inclinación Óptima	AFSC 30% (m ²)	PAS(FSC30)
Ávila	224640	1	15	81,18	92,28
Bilbao	143100	1	-15	61,03	100,00
Burgos	245430	1	-15	96,05	88,96
Cuenca	221940	1	-15	68,68	100,00
Gerona	174266	1	-15	59,12	100,00
Guadalajara	201536	1	-15	64,04	100,00
Huesca	202461	1	-15	66,93	100,00
La Coruña	116100	1	-15	44,98	100,00
León	213570	1	15	85,70	86,20
Logroño	186377	1	-15	67,18	100,00
Lugo	198990	1	-15	77,22	96,90
Ourense	173726	1	-15	60,30	100,00
Oviedo	166320	1	-15	71,57	96,40
Palencia	201690	1	15	84,65	85,26
Pamplona	191160	1	-15	82,17	89,85
Pontevedra	106380	1	-15	39,20	98,70
Salamanca	215074	1	-15	71,05	98,55
San Sebastián	162270	1	-15	73,07	94,84
Santander	124200	1	-15	54,42	96,36
Segovia	230040	1	-15	73,92	100,00
Soria	231660	1	-15	88,40	87,76
Teruel	221400	1	-15	72,55	100,00
Valladolid	216887	1	-15	72,55	100,00
Vitoria	213030	1	15	101,10	86,69
Zamora	208363	1	-15	68,62	100,00
Albacete	205354	2	-15	65,16	100,00
Badajoz	173957	2	-15	52,76	100,00
Barcelona	141827	2	-15	46,19	100,00
Cáceres	194246	2	-15	59,95	100,00
Ceuta	105416	2	-15	31,40	100,00

Tabla 4.10. Resumen A_{FSC} para FSC = 30

Capital de provincia	Demanda térmica (kWh/año)	Tipo de perfil	FSC 30%		
			Inclinación Óptima	AFSC 30% (m ²)	PAS(FSC30)
Ciudad Real	207514	2	-15	65,35	100,00
Granada	184024	2	-15	52,12	100,00
Lleida	196329	2	-15	63,20	100,00
Madrid	193397	2	-15	61,88	100,00
Toledo	212760	2	-15	66,67	100,00
Valencia	139860	2	-15	45,37	100,00
Zaragoza	188421	2	-15	62,73	100,00
Alicante	133264	3	-15	40,63	100,00
Almería	135501	3	-15	40,40	100,00
Cádiz	113824	3	-15	33,16	100,00
Castellón	142059	3	-15	46,00	100,00
Córdoba	183330	3	-15	54,75	100,00
Huelva	137816	3	-15	39,82	100,00
Jaén	189964	3	-15	55,80	100,00
Las Palmas de G.C.	84124	3	-15	25,81	100,00
Málaga	131490	3	-15	38,48	100,00
Melilla	112821	3	-15	33,62	100,00
Murcia	135424	3	-15	41,03	100,00
Palma de Mallorca	133689	3	-15	43,02	100,00
Sª Cruz de Tenerife	101481	3	-15	32,81	100,00
Sevilla	168287	3	-15	50,86	100,00
Tarragona	155597	3	-15	50,60	100,00

Tabla 4.10. (Continuación). Resumen A_{FSC} para FSC =30%

Puede comprobarse que las ciudades con un perfil de demanda tipo 3 son las que tienen un mejor aprovechamiento de la energía y las que, en general, necesitan un menor área de captadores para satisfacer la demanda. Este resultado era esperable, debido a que en estas ciudades la gran mayoría de la energía es utilizada en refrigeración, y por tanto, es demandada en los periodos del año en los que mayor es la producción de energía.

En cambio, en las ciudades de climas fríos con un perfil de demanda del tipo 1, apenas se necesita refrigeración. Por tanto, en los meses de verano se produce más energía de la que el edificio demanda y la producción, en la mayoría de ciudades con este perfil, no puede ser aprovechada al 100%.

4.2.5. Correlación entre parámetros de la instalación solar.

Se pretende utilizar los datos calculados en 4.2.4. con el objetivo de obtener una expresión que permita relacionar los tres parámetros bajo estudio: A, PAS y FSC. Esto permitirá realizar una estimación rápida del porcentaje de aprovechamiento que se puede alcanzar en un emplazamiento determinado una vez que se ha definido la fracción de demanda que se quiere cubrir mediante el uso de energía solar térmica.

En primera instancia, se comprueba si existe una relación directa entre PAS y área. Para ello, en la Figura 4.10. se ilustran en una gráfica los datos obtenidos para cada una de las ciudades cuando se quiere alcanzar un FSC=50. Se tiene, por tanto, una muestra de 52 puntos, uno por cada capital de provincia, habiéndose diferenciado entre los tres perfiles de demanda posibles. En el eje de abscisas se representa el área de captadores necesaria ($A_{FSC=50}$) mientras en las ordenadas se muestra el PAS que se obtiene al instalar dicha área de captadores.

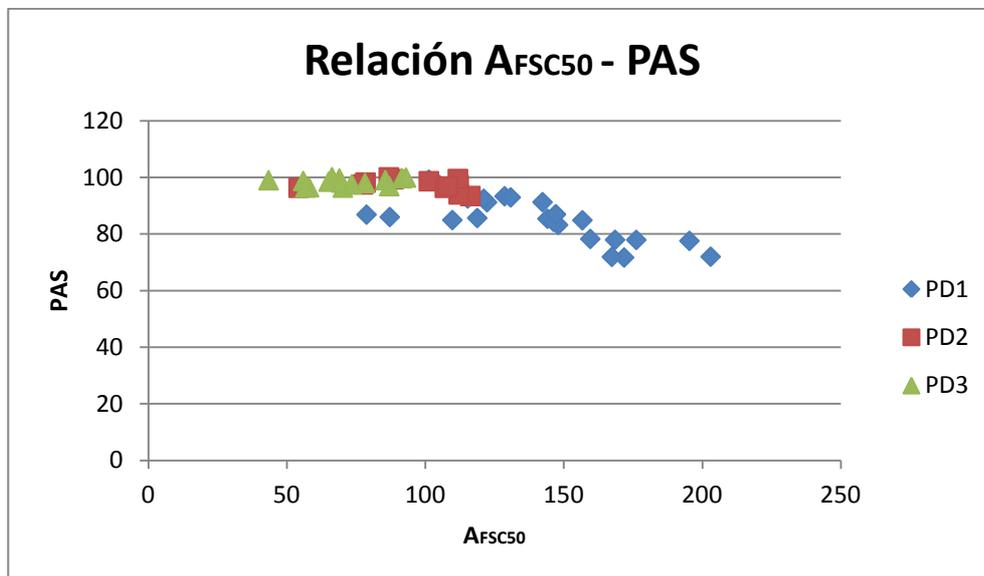


Figura 4.10. Relación entre área y PAS para FSC =50

De esta gráfica, así como de las realizadas para cada uno de los diez FSC para los que se tienen datos, no puede desprenderse que exista ninguna relación entre los parámetros representados.

Se va a considerar ahora la relación entre la variable PAS/A_{FSC} y el área de captador. Se ha obtenido dicha variable para cada una de las ciudades así como para cada uno de los FSC bajo estudio. La Figura 4.11. muestra la gráfica obtenida para un FSC=10. En ella se puede intuir que existe dependencia entre los parámetros mostrados. Para verificar esta tendencia, se representan también los valores obtenidos para FSC=40 (Figura 4.12.) y para FSC=70 (Figura 4.13). En todas ellas se muestran el valor de PAS/A_{FSC} para cada una de las ciudades, obteniéndose una muestra de 52 puntos.

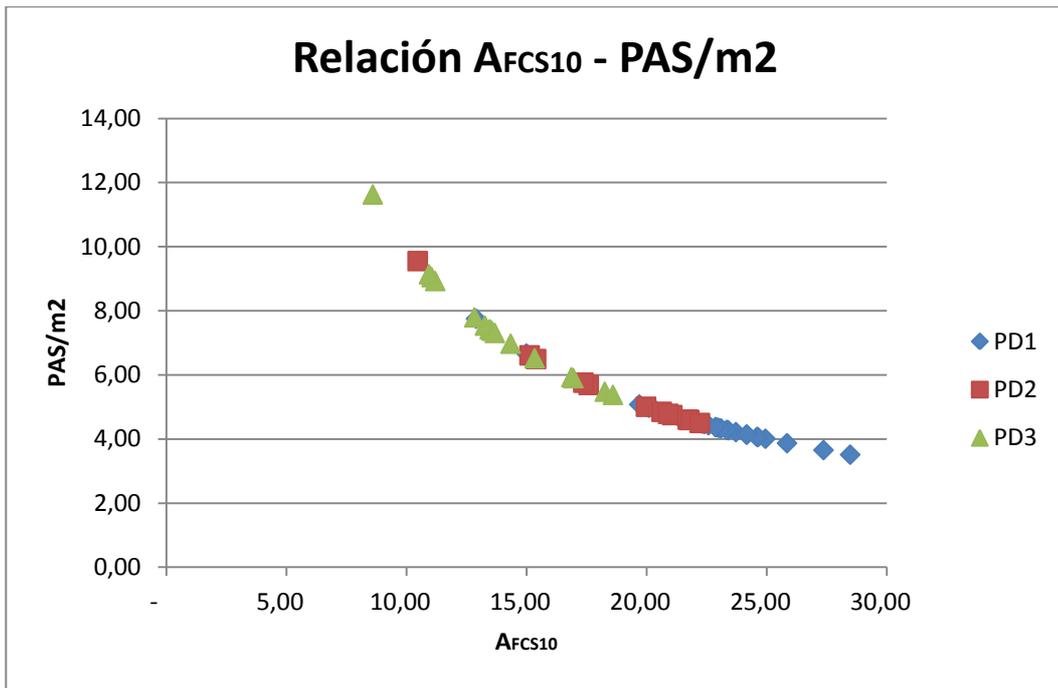


Figura 4.11. Relación PAS/A frente a área de captador. FSC =10

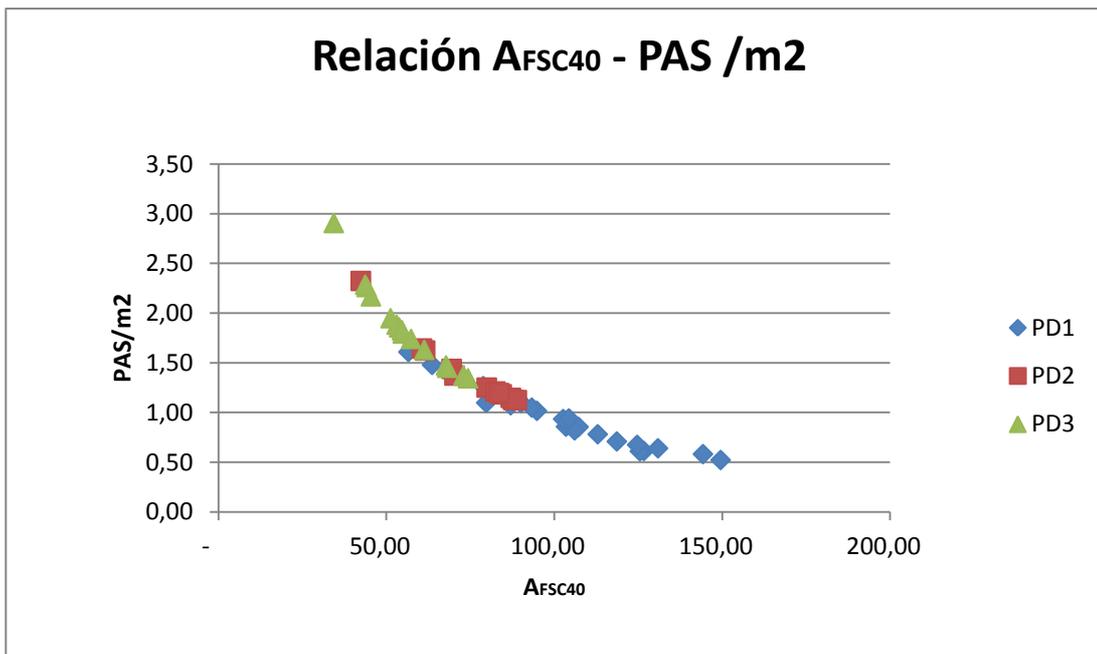


Figura 4.12. Relación PAS/A frente a área de captador. FSC =40

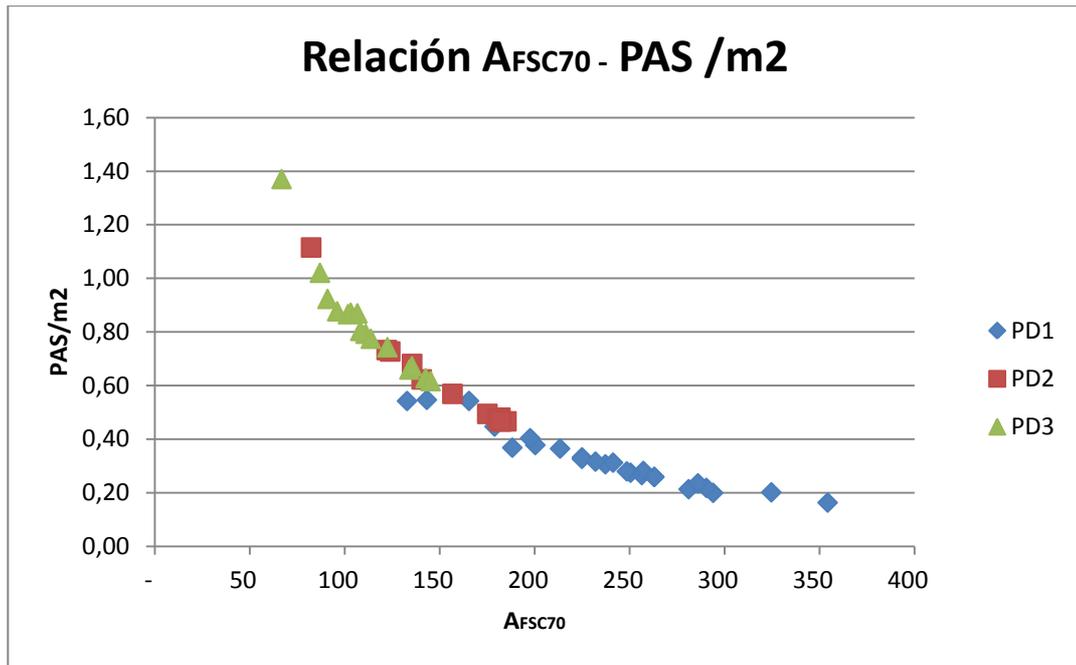


Figura 4.13. PAS/A frente a área de captador. FSC=70

De estas gráficas puede desprenderse que existe una relación que presenta la siguiente expresión:

$$y = a \cdot x^{-b}$$

donde "y" es la variable PAS/A mientras que "x" representa el área del captador.

Para cada FSC se obtendrá una curva distinta, siendo los parámetros a y b diferentes en cada una de ellas. Se tendrán por tanto diez expresiones distintas, que han sido calculadas y se pueden ver en la Tabla 4.11.

FSC (%)	$y=a \cdot x^{-b}$	A	b	r ²
10	$y = 100x^{-1}$	100,00	1,000	1,000
20	$y = 110.5x^{-1.03}$	110,50	1,030	0,996
30	$y = 138.14x^{-1.085}$	138,14	1,085	0,989
40	$y = 181.76x^{-1.148}$	181,76	1,148	0,980
50	$y = 230x^{-1.199}$	230,00	1,199	0,981
60	$y = 271.89x^{-1.235}$	271,89	1,235	0,982
70	$y = 332.23x^{-1.279}$	332,23	1,279	0,980
80	$y = 436.03 \cdot x^{-1.34}$	436,03	1,340	0,980
90	$y = 490.49x^{-1.372}$	490,49	1,372	0,979
100	$y = 589.83x^{-1.428}$	589,83	1,428	0,982

Tabla 4.11. Relación PAS/A =f(A) para distintos FSC.

En todos los casos, el coeficiente de correlación es cercano a la unidad, verificándose que existe una fuerte dependencia entre variables.

De esta manera, se ha conseguido obtener, para cada FSC, una relación de forma que se pueda expresar el porcentaje de aprovechamiento solar en función del área una vez que FSC es conocido. Se tienen por tanto expresiones de la forma $\frac{PAS}{A} = f(A)$.

A partir de estos resultados, se pretende encontrar una relación que sea válida para cualquier FSC, de forma que se alcance una expresión única que permita alcanzar el objetivo buscado en esta subsección, esto es, hallar una relación entre las tres variables descritas. Se utilizarán los datos de la Tabla 4.11. para obtener una expresión del PAS en función de FSC y área.

$$\frac{PAS}{A} = f(FSC, A)$$

Para ello se tomarán las diez curvas $y = a \cdot x^{(-b)}$ realizándose con ellas un ajuste de los parámetros a y b, de forma que estos se expresen en función de FSC: $a = f(FSC)$, $b = f(FSC)$. De esta forma se podrán obtener a y b para cualquier FSC dado y por tanto también la variable PAS/A.

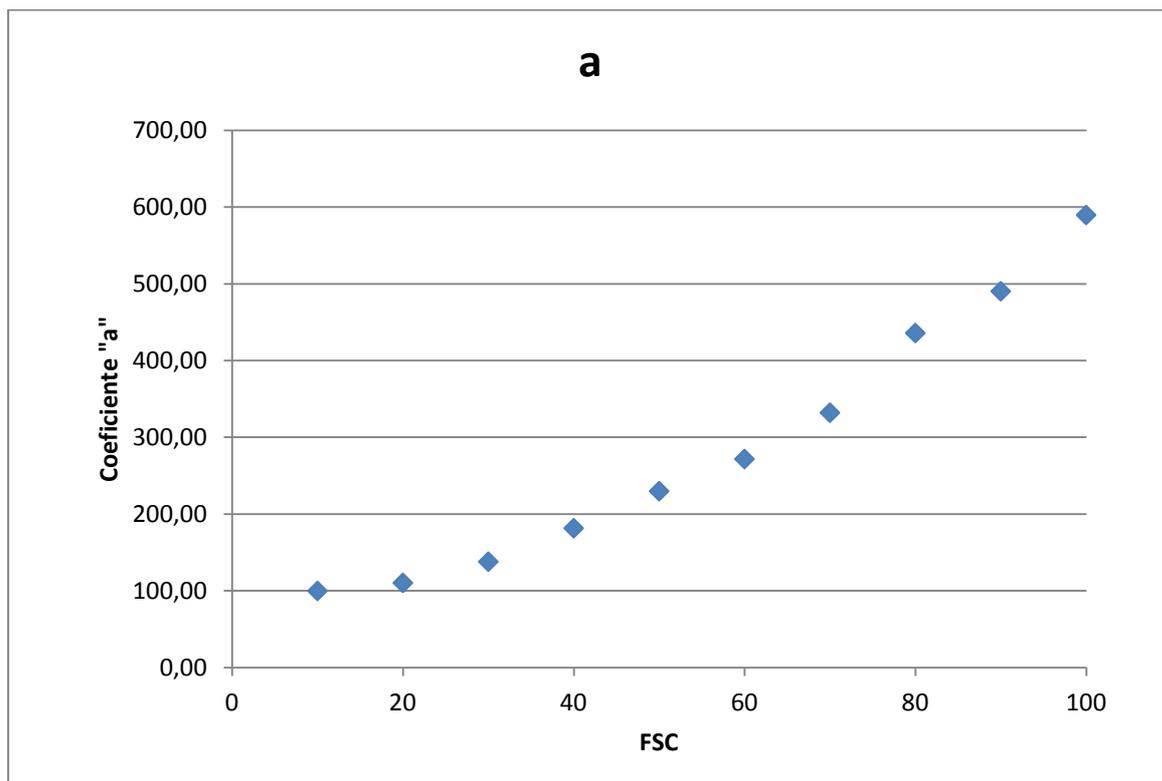


Figura 4.14. Coeficiente "a" frente a FSC.

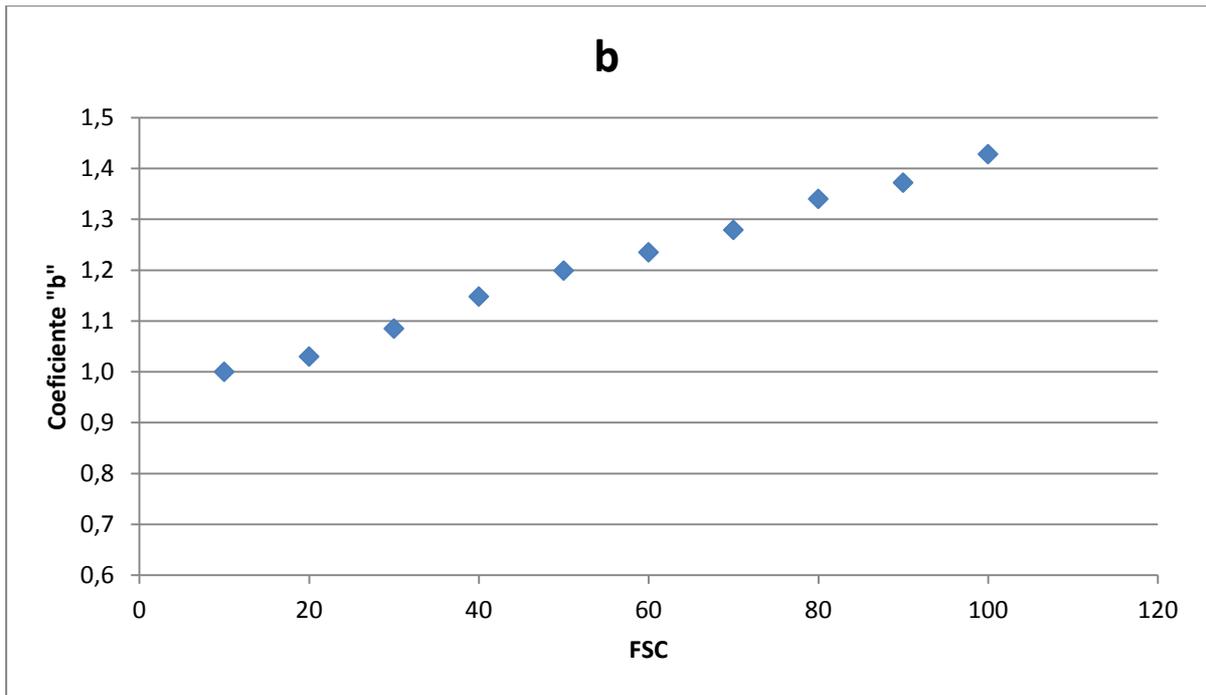


Figura 4.15. Coeficiente "b" frente a FSC.

A partir de las figuras representadas se deduce que el mejor ajuste para el coeficiente "b" es lineal, mientras que para el coeficiente "a" esto no es suficiente, por lo que se debe recurrir a una expresión polinómica.

Tras realizar los ajustes de las curvas se obtienen las siguientes expresiones:

$$a = 0,0461 \cdot FSC^2 + 0,4136 \cdot FSC + 87,82$$

$$b = 0,0048 \cdot FSC + 0,9466$$

Finalmente, si en la expresión $\frac{PAS}{A} = a \cdot FSC^{(-b)}$ sustituimos los valores de a y b por los obtenidos en función de FSC, se tiene la relación entre las tres variables que se pretendía obtener.

$$\frac{PAS}{A_{FSC}} = (0,0461 \cdot FSC^2 + 0,4136 \cdot FSC + 87,82) \cdot [A^{(-0,0048 \cdot FSC - 0,9466)}]$$

Para comprobar hasta qué punto esta correlación puede suponer una buena aproximación, se va a calcular el error que se comete al utilizarla frente a los datos obtenidos experimentalmente.

Como medida de la precisión obtenida, se va a utilizar la raíz del error cuadrático medio, rmse por sus siglas en inglés, cuya expresión se muestra a continuación :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - x_i^*)^2}$$

En ella, x_i es la muestra experimental, mientras que x_i^* hace referencia al valor obtenido haciendo uso de la correlación. De esta forma se tiene una visión del error medio en el que se incurre al hacer uso de la expresión.

Utilizando como muestra representativa las 52 capitales españolas, se ha obtenido el rmse que se produce. Puesto que los datos de los distintos parámetros que intervienen en la correlación son conocidos para varios valores de FSC, se ha hecho una distinción. Así, la Tabla 4.12. muestra los rmse calculados para diez FSC diferentes, tanto en términos absolutos como el error porcentual. Finalmente, tomando la media de todos los datos sin hacer distinción de FSC, se obtiene el rmse representado en la Tabla 4.13.

FSC	rmse	Error (%)
10	0,0119	0,191
20	0,0049	0,216
30	0,0059	0,364
40	0,0076	0,623
50	0,0073	0,725
60	0,0059	0,719
70	0,0049	0,770
80	0,0041	0,854
90	0,0032	0,938
100	0,0019	0,999

Tabla 4.12. RMSE para distintos FSC.

rmse	Error (%)
0,0634	0,696

Tabla 4.13. RMSE.

5. Estimación Económica y Ambiental.

5.1. Estimación de costes económicos.

Se pretende realizar un análisis del coste económico de las instalaciones solares térmicas, a fin de comprobar si estas pueden ser una alternativa económicamente viable a las fuentes de energía habitualmente utilizadas para cubrir la demanda en edificios residenciales. Para ello se van a utilizar las expresiones que se han obtenido en la Sección 4.2.5.

Las diferentes características que tienen las distintas tecnologías hace que sea muy complicado realizar una comparación entre ellas, ya que cada una tiene distintos costes, capacidad de producción, rendimiento, vida útil etc. Una de las maneras más extendidas de lograr el propósito buscado es la definición de una herramienta conocida como "coste nivelado de la energía" (en adelante LCOE por sus siglas en inglés). Este es un parámetro que trata de normalizar los costes entre las diferentes tecnologías de forma que sea más sencillo realizar comparaciones económicas entre ellas.

El LCOE estima todos y cada uno de los costes en los que se incurre al producir energía considerando todo el proceso desde la inversión inicial en la instalación hasta el desmantelamiento de la misma, relacionándolos con la energía producida, de forma que se obtiene un coste unitario de producción (en €/KW·h) que permite una comparación relativamente sencilla entre tecnologías. Otra forma de entender el concepto de LCOE es verlo como el precio mínimo al que se debe vender la energía generada para recuperar el dinero invertido sin incurrir en pérdidas. Así, el LCOE puede expresarse como:

$$LCOE = \frac{\sum Costes}{E_{AP}}$$

Los flujos económicos, tanto costes como beneficios, que deben ser considerados en la expresión del LCOE son los siguientes:

- Coste de inversión (I): coste inicial de la instalación
- Coste de operación y mantenimiento (O&M): aquellos en los que se incurre a lo largo de un año en tareas de mantenimiento de la instalación. El coste total asociado a este concepto hasta que se produce el desmantelamiento de la instalación será la suma de los costes anuales durante toda la vida útil de la misma.
- Coste de combustible (F): en estas instalaciones la fuente de energía es el recurso solar, por lo que este término tiene coste nulo y no debe ser tenido en cuenta en la expresión.
- Valor residual (VR): beneficio que se obtiene por el desmantelamiento de la instalación al final de su vida útil, por ejemplo al vender los materiales utilizados.

La expresión del LCOE queda de la siguiente manera:

$$LCOE = \frac{I + \sum_{i=1}^n \frac{O\&M}{(1+r)^i} - \frac{VR}{(1+r)^n}}{\sum_{i=1}^n \frac{E_{AP}}{(1+s)^i}}$$

en ella se ha tenido en consideración la actualización anual del valor del dinero, a la que se denomina "r", al evaluar los flujos económicos anuales. Por su parte, la energía se ha ponderado según la actualización anual del valor de la energía, "s", que tiene en cuenta como varía el precio de la energía año a año. Finalmente, la variable "n" que aparece en la ecuación indica los años de vida útil que se prevee que dure la instalación en funcionamiento.

Sin embargo, la cantidad de factores que influyen en los costes de la instalación y que no pueden ser debidamente controlados hace que realizar un cálculo preciso del LCOE sea muy complicado. Por ello se hace necesario el uso de hipótesis. A continuación se muestran las que ha sido necesario incluir en este estudio.

Hipótesis:

1. Los costes de instalación son dependientes linealmente del área de captador: $I = \alpha \cdot A$
2. El coste de instalación es de 200 €/m² de área de captador
3. Se supone un coste de mantenimiento anual igual al 3% del coste de instalación: $O\&M = 0,03 \cdot \alpha \cdot A$
4. El valor residual al final de la vida útil es del 5% del coste de instalación: $VR = 0,05 \cdot \alpha \cdot A$
5. Se considera una vida útil de la instalación de 20 años: $n = 20$
6. Tanto la actualización anual del valor del dinero como la actualización del valor de la energía se estiman en un 3% : $r = 3$; $s = 3$

Tras establecer las hipótesis, el LCOE se puede reescribir según la siguiente expresión, que será la que se utilizará en el análisis económico que se pretende realizar.

$$LCOE = \frac{\alpha \cdot A + \sum_{i=1}^{20} \left\{ 0,03 \cdot \alpha \cdot A \cdot \frac{1}{(1+r)^i} \right\} - 0,05 \cdot \alpha \cdot A \cdot \frac{1}{(1+r)^{20}}}{\sum_{i=1}^{20} \left\{ \frac{PAS \cdot H_g \cdot \eta \cdot A}{(1+s)^i} \right\}}$$

Si se conoce el emplazamiento en el que se va a realizar la instalación solar, se puede estimar la radiación recibida tal como se vio en la Subsección 4.2.3. Por su parte, la expresión obtenida en 4.2.5. permite calcular el PAS que alcanzarán los captadores solares una vez establecido el FSC que se quiere cubrir sobre el total de la demanda del edificio. En la Tabla 5.1. se han calculado los diferentes LCOE que se obtienen en cada una de las 52 capitales de provincia bajo estudio. Este cálculo se ha realizado para diferentes FSC, de forma que puede apreciarse cómo varían los costes en cada ciudad según el porcentaje de demanda cubierto. Esto se ha representado gráficamente en la Figura 5.1, que muestra los LCOE en todas las ciudades para distintos FSC.

	Tipo de Perfil	FSC									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Ávila	1	0,021	0,021	0,022	0,022	0,024	0,026	0,029	0,034	0,041	0,057
Bilbao	1	0,028	0,028	0,028	0,029	0,030	0,032	0,036	0,041	0,051	0,068
Burgos	1	0,023	0,023	0,024	0,025	0,027	0,030	0,034	0,041	0,050	0,069
Cuenca	1	0,020	0,021	0,021	0,021	0,022	0,024	0,027	0,032	0,039	0,053
Gerona	1	0,022	0,022	0,022	0,023	0,023	0,025	0,028	0,032	0,039	0,051
Guadalajara	1	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022	0,024	0,027	0,032	0,039	0,054
Huesca	1	0,022	0,022	0,022	0,022	0,023	0,025	0,029	0,035	0,043	0,058
La Coruña	1	0,026	0,025	0,025	0,025	0,026	0,027	0,030	0,034	0,041	0,057
León	1	0,022	0,022	0,022	0,023	0,025	0,027	0,031	0,037	0,045	0,061
Logroño	1	0,024	0,024	0,024	0,024	0,026	0,028	0,031	0,037	0,046	0,064
Lugo	1	0,025	0,025	0,025	0,026	0,028	0,030	0,034	0,041	0,051	0,072
Ourense	1	0,023	0,023	0,023	0,023	0,024	0,025	0,028	0,032	0,039	0,055
Oviedo	1	0,029	0,030	0,030	0,031	0,033	0,035	0,039	0,046	0,056	0,077
Palencia	1	0,022	0,022	0,023	0,024	0,025	0,028	0,031	0,037	0,047	0,063
Pamplona	1	0,025	0,026	0,026	0,027	0,029	0,032	0,036	0,044	0,053	0,075
Pontevedra	1	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024	0,025	0,027	0,031	0,037	0,050
Salamanca	1	0,021	0,022	0,022	0,023	0,024	0,026	0,029	0,035	0,043	0,057
San Sebastián	1	0,028	0,028	0,029	0,030	0,031	0,034	0,038	0,045	0,055	0,077
Santander	1	0,028	0,028	0,028	0,028	0,029	0,032	0,035	0,041	0,050	0,066
Segovia	1	0,021	0,021	0,022	0,022	0,023	0,026	0,029	0,034	0,041	0,058
Soria	1	0,022	0,022	0,023	0,024	0,025	0,028	0,031	0,037	0,045	0,061
Teruel	1	0,021	0,021	0,021	0,022	0,023	0,026	0,029	0,035	0,044	0,060
Valladolid	1	0,022	0,022	0,023	0,023	0,025	0,027	0,031	0,037	0,047	0,064
Vitoria	1	0,025	0,026	0,027	0,028	0,030	0,033	0,038	0,046	0,057	0,079
Zamora	1	0,022	0,022	0,022	0,022	0,024	0,026	0,029	0,034	0,043	0,058
Albacete	2	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022	0,024	0,026	0,030	0,037	0,051
Badajoz	2	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,021	0,023	0,026	0,030	0,041
Barcelona	2	0,022	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022	0,024	0,027	0,031	0,041
Cáceres	2	0,020	0,020	0,020	0,021	0,021	0,022	0,024	0,028	0,032	0,045
Ceuta	2	0,020	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,020	0,021	0,024	0,029
Ciudad Real	2	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022	0,023	0,026	0,031	0,038	0,052

Tabla 5.1. LCOE en diferentes ciudades y para distintos FSC.

	Tipo de Perfil	FSC									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Granada	2	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,020	0,021	0,024	0,028	0,037
Lleida	2	0,021	0,021	0,021	0,022	0,022	0,024	0,027	0,030	0,036	0,049
Madrid	2	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022	0,024	0,026	0,031	0,038	0,054
Toledo	2	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022	0,023	0,026	0,030	0,035	0,048
Valencia	2	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022	0,024	0,027	0,031	0,038
Zaragoza	2	0,022	0,022	0,022	0,022	0,023	0,025	0,027	0,032	0,040	0,055
Alicante	3	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,022	0,024	0,028	0,036
Almería	3	0,020	0,019	0,019	0,019	0,019	0,020	0,021	0,024	0,028	0,036
Cádiz	3	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,021	0,025	0,031
Castellón	3	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022	0,024	0,027	0,031	0,038
Córdoba	3	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,021	0,023	0,026	0,030	0,039
Huelva	3	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,020	0,022	0,026	0,031
Jaén	3	0,019	0,019	0,019	0,019	0,020	0,021	0,023	0,026	0,030	0,038
Las Palmas de G.C.	3	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,021	0,024	0,029
Málaga	3	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,020	0,023	0,026	0,033
Melilla	3	0,020	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,020	0,023	0,026	0,034
Murcia	3	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,021	0,024	0,027	0,033
Palma de Mallorca	3	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022	0,023	0,026	0,030	0,037
Sª Cruz de Tenerife	3	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022	0,024	0,028	0,035
Sevilla	3	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,021	0,023	0,025	0,029	0,036
Tarragona	3	0,021	0,021	0,021	0,021	0,022	0,023	0,025	0,028	0,032	0,040

Tabla 5.1. (Continuación). LCOE en diferentes ciudades y para distintos FSC.

Una conclusión que se desprende de los datos mostrados en la Tabla 4.12. es el hecho de que cuanto mayor sea el porcentaje de demanda que se pretende cubrir, mayor es el coste unitario de la instalación en el que se incurre. Esta conclusión es lógica ya que FSC altos implican un aumento de la cantidad de energía desaprovechada, disminuyendo el PAS lo que, de acuerdo a la expresión utilizada, aumenta los costes unitarios de producción.

Por otra parte, en la tabla se han clasificado las ciudades en función del tipo de perfil de demanda que ofrecen. Puede comprobarse que, en general, la energía solar térmica es más rentable cuando el perfil que se presenta es de tipo 3. Las ciudades que cumplen con curvas de demanda de este tipo tienen LCOE más bajos. Un motivo para esto es que en ellas se tiene un clima cálido por lo que la radiación que reciben es mayor, pudiendo producir más energía a lo largo del año que otras capitales con climas más fríos. Además, tal como se verificó en 4.2.4, las ciudades tipo 3, en las que predomina la demanda de calefacción, presentan un mejor aprovechamiento de la energía, lo que implica menores áreas de instalación para obtener la misma cantidad de energía útil. Esto repercute tanto en los costes de instalación como en los de mantenimiento,

haciendo que en este tipo de climas se tengan menores LCOE, lo que hace de estas ciudades las más interesantes para las instalaciones térmicas solares.

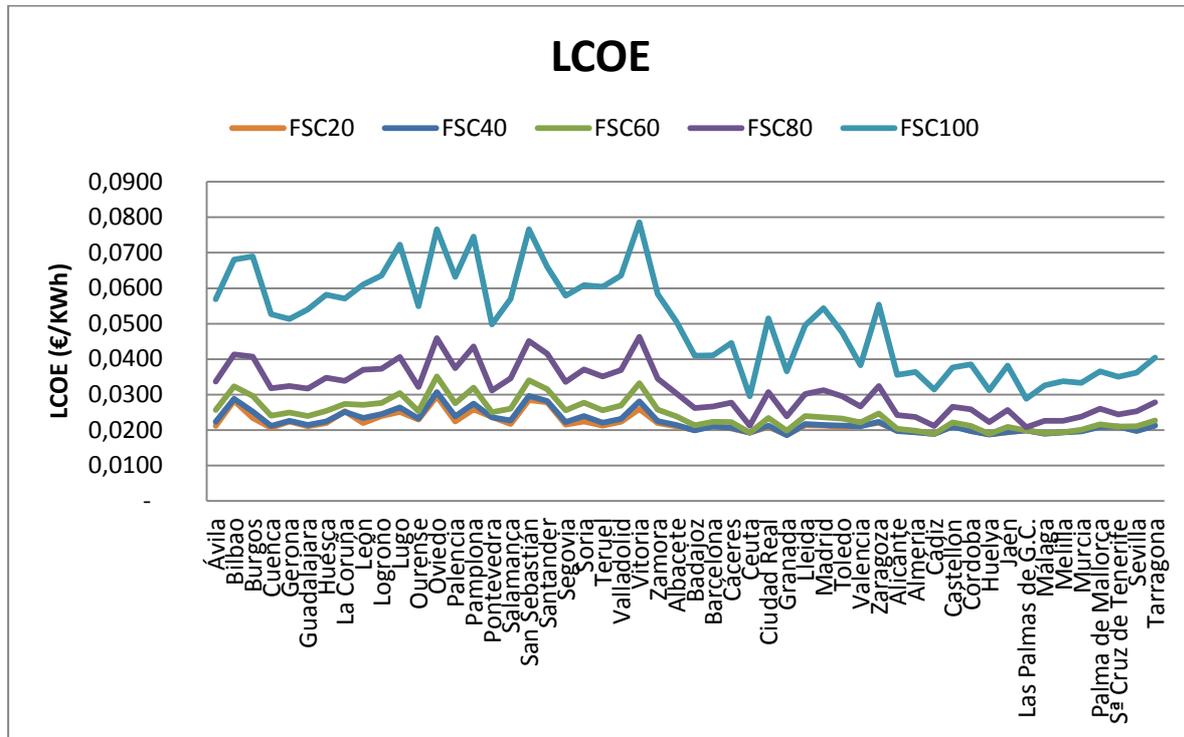


Figura 5.1. Comparativa LCOE en diferentes ciudades

5.2. Comparativa con otras energías.

Con el propósito de estudiar la viabilidad económica de las instalaciones solares térmicas se propone una comparativa de los costes de producción de estas, analizados en 5.1, frente a otras alternativas. Esta se realizará desde el punto de vista del consumidor, a fin de comprobar si le es rentable el uso de captadores o bien es mejor opción contratar un abastecimiento de energía a una empresa distribuidora.

Tal y como se comprobó al caracterizar la demanda energética de las distintas ciudades en 4.2.2, en todas ellas la mayor parte de esta demanda que se pretende suplir está destinada a la climatización del edificio. Actualmente, la manera principal de obtener confort térmico en edificios residenciales es mediante aparatos eléctricos de climatización, generalmente bombas de calor que son usadas tanto en refrigeración como en calefacción. Por este motivo, es interesante comparar el LCOE de las instalaciones solares frente a los costes derivados del consumo de energía eléctrica en España. Otras opciones para suplir la demanda de energía pasan por el uso de un combustible fósil para calentar agua que, al igual que se explicó en el caso de las instalaciones solares térmicas de baja temperatura, podrá ser utilizada en refrigeración, calefacción o para consumo como ACS. Las opciones más comunes son el uso de una instalación de gas natural o el gas butano.

Tras consultar las principales a las comercializadoras, se utilizarán un precio medio para el consumo eléctrico que se estiman en 0,014 €/KW·h. sin embargo, estos costes aún no son comparables con los obtenidos en 5.1. para la energía solar térmica. Los datos calculados en esta sección hacen referencia a la electricidad y, por tanto, se estima como energía aprovechada tan sólo la producción eléctrica. Esta consideración es errónea, ya que como se ha analizado a lo largo de este estudio, la mayor parte de esta estaría destinada a climatización. Por tanto, la energía útil a utilizar será la térmica producida por el aparato de climatización, que será mayor que el aporte eléctrico.

Se estiman valores de rendimiento atendiendo a parámetros típicos en climatización. Para simplificar los cálculos, se va a considerar que la bomba de calor funciona con una eficiencia igual a 3 tanto en climatización

(COP=3) como en refrigeración (EER=3). Esto es, que por cada KWh eléctrico consumido se consiguen 3 KWh de energía útil térmica, por lo que los costes unitarios de producción cuando la electricidad está destinada a climatización serán iguales a 0,0466€/KWh.

Por su parte, tanto el gas natural como el butano serían utilizados para calentar agua de forma similar a lo explicado para la solar térmica de baja temperatura. Por tanto, se considera que en ellas se alcanza COP = 1, obteniéndose la misma energía útil que la consumida.

En la Tabla 5.2. se resumen los costes de las distintas fuentes de energía, donde a la electricidad ya se le ha aplicado la corrección al aplicarle el COP.

	Costes (€/KW·h)
Electricidad	0,047
Gas Natural	0,050
Butano	0,080

Tabla 5.2. Costes de consumo de energía.

Son estos los valores que se utilizarán como referencia para evaluar la rentabilidad de las instalaciones solares. Los datos de LCOE obtenidos en la Tabla 5.1. se comparan con los valores mostrados en la Tabla 5.2. para verificar en cuales de las capitales de provincia es interesante el uso de captadores solares desde el punto de vista económico y qué porcentaje de demanda máximo se puede cubrir con ellos. La comparativa se ha realizado en la Figura 5.2. En ella se representa el coste nivelado en todas las ciudades bajo estudio y para distintos FSC, al mismo tiempo que se muestran como constantes los costes estimados para el consumo eléctrico, el gas natural y el butano de manera que puede apreciarse en qué ciudades los costes son inferiores a las referencias y en cuales son más elevados. Esto permite estudiar a grandes rasgos y de forma cualitativa los emplazamientos en los que es más aconsejable el uso de captadores solares.

Puede concluirse que, atendiendo a criterios puramente económicos, los captadores solares son una opción viable para cubrir una parte de la demanda del edificio, pero su uso se hace menos atractivo a medida que aumenta la cantidad de demanda que se quiere satisfacer. También se comprueba que las instalaciones térmicas de baja temperatura son más interesantes en zonas climáticas en las que predomina la demanda de refrigeración, pudiendo alcanzar FSC muy elevadas de manera viable. En zonas más frías sigue siendo rentable su utilización para cubrir una pequeña parte de la demanda, pero sus costes se elevan rápidamente a medida que aumenta el FSC que se pretende satisfacer.

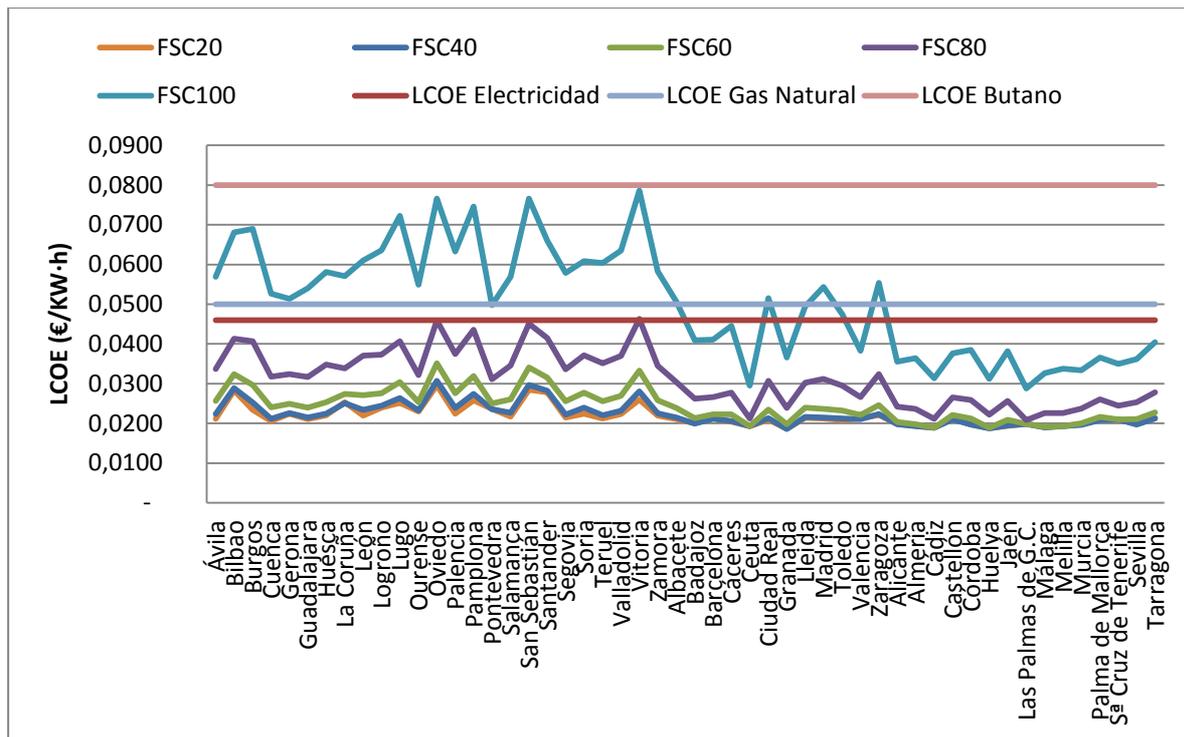


Figura 5.2. LCOE en diferentes ciudades frente a precio de la energía.

5.2. Análisis de sensibilidad.

Los costes de producción estimados en 5.1. son aquellos en los que se incurre durante toda la vida útil de la instalación. Esto implica realizar previsiones a largo plazo, pues es necesario considerar los posibles escenarios económicos que se pueden desarrollar durante los años en los que se va a realizar la producción de energía. En estas previsiones siempre existirá una incertidumbre, por lo que es interesante realizar un análisis de sensibilidad con el objetivo de comprobar cómo se ve afectado el LCOE cuando se producen variaciones en los principales parámetros de los que este depende.

Si se tiene en cuenta la expresión utilizada en 5.1, son varias las variables que pueden afectar en mayor o menor medida al LCOE:

- Coste de inversión (α)
- Vida útil (n)
- Rendimiento (η)
- Tasa de actualización anual del precio del dinero (r)
- Tasa de actualización anual del precio de la energía (s)

Estos cinco parámetros se modificarán a fin de analizar cuales de ellos tienen mayor influencia sobre el LCOE. Se variará cada uno de ellos en un 10%, tanto por exceso como por defecto, respecto a los valores de referencia establecidos en las hipótesis y se comprobará en que medida se ven modificados los costes.

Se han tomado como ejemplo los LCOE que se tienen en la ciudad de Sevilla. En cada una de las figuras desde la 5.3. a la 5.7. se ha variado uno de los parámetros bajo estudio y se han representado mediante un gráfico de barras los costes que se obtendrían en Sevilla. La parte inferior de las barras se corresponde con el LCOE mínimo en las condiciones dadas, que se alcanza para $FSC=10$, mientras que la parte superior es el valor máximo, obtenido cuando $FSC=100$.

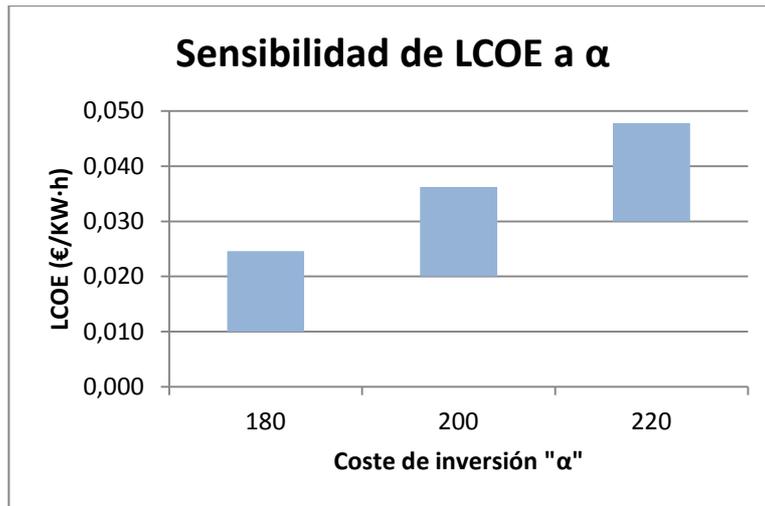


Figura 5.3. Sensibilidad de LCOE a α

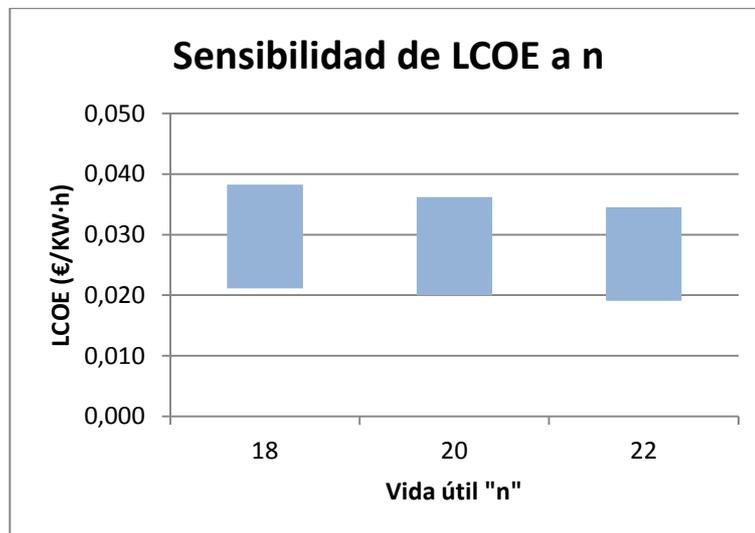


Figura 5.4. Sensibilidad de LCOE a "n"

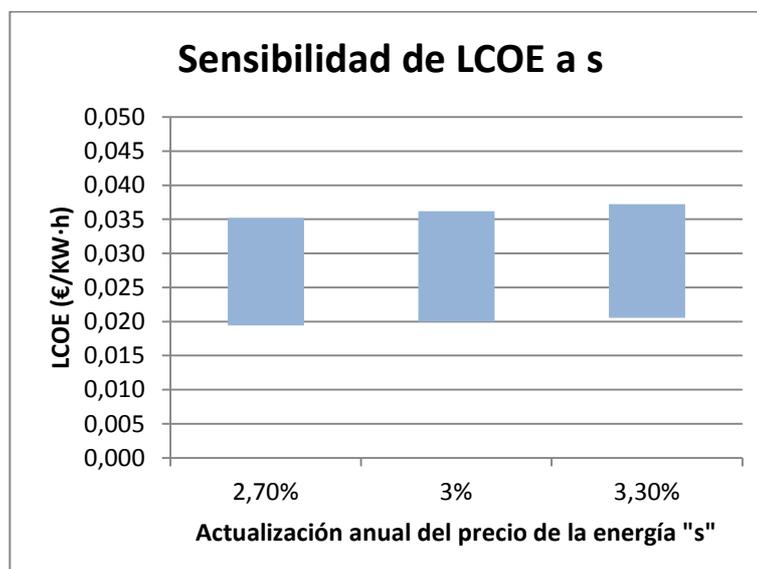


Figura 5.5. Sensibilidad de LCOE a "s"

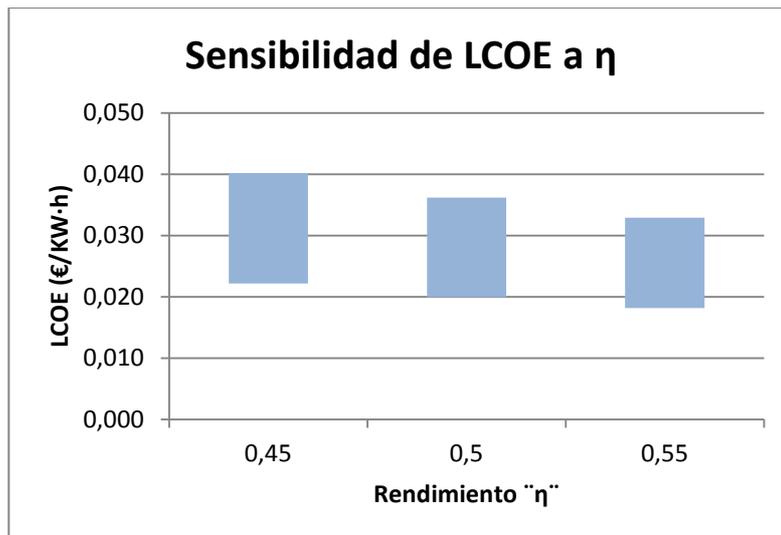


Figura 5.6. Sensibilidad de LCOE a η

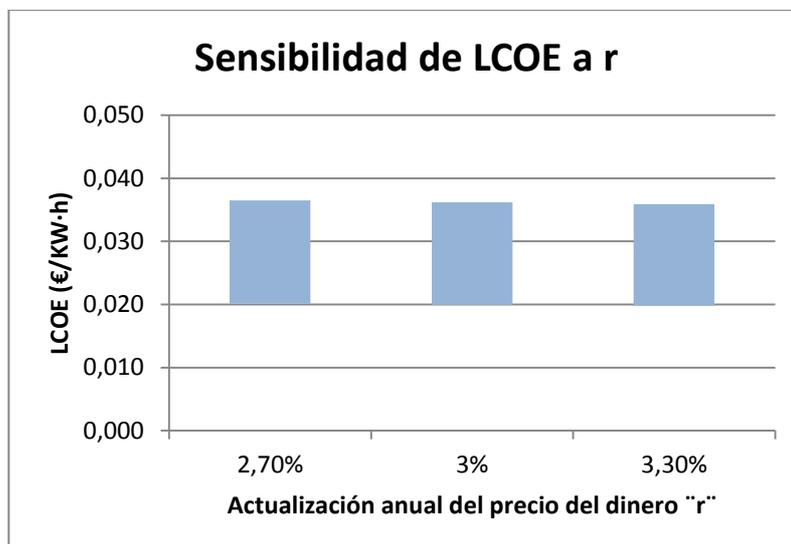


Figura 5.7. Sensibilidad de LCOE a "r"

La Tabla 5.3. muestra cómo se modifican los costes de forma porcentual en cada uno de los casos analizados. Puede comprobarse que los parámetros que más influyen son el rendimiento de la instalación y los costes de instalación. Estos son los valores obtenidos para la ciudad de Sevilla, pero puede verificarse que, para cualquier otra capital se tienen resultados similares.

Se va a realizar un análisis de sensibilidad más detallado de las dos variables más influyentes en los resultados. Así, en la Figura 5.8. se ha calculado el LCOE en todas las ciudades españolas y para distintos valores de α , modificando este desde un escenario optimista en el que los costes son de 200€/m² hasta el peor de los escenarios en el que se han estimado unos costes de 600€/m². De igual modo, en la Figura 5.9. se ha variado el rendimiento desde 0,3 hasta un valor de 0,6.

		Variación de LCOE (%)	
$\Delta\alpha$	-10%	-10%	-10%
	10%		10%
Δn	-10%		6%
	10%		-5%
Δr	-10%		1%
	10%		-1%
$\Delta\eta$	-10%		11%
	10%		-9%
Δs	-10%		-3%
	10%		3%

Tabla 5.3. Sensibilidad de LCOE a diferentes parámetros.

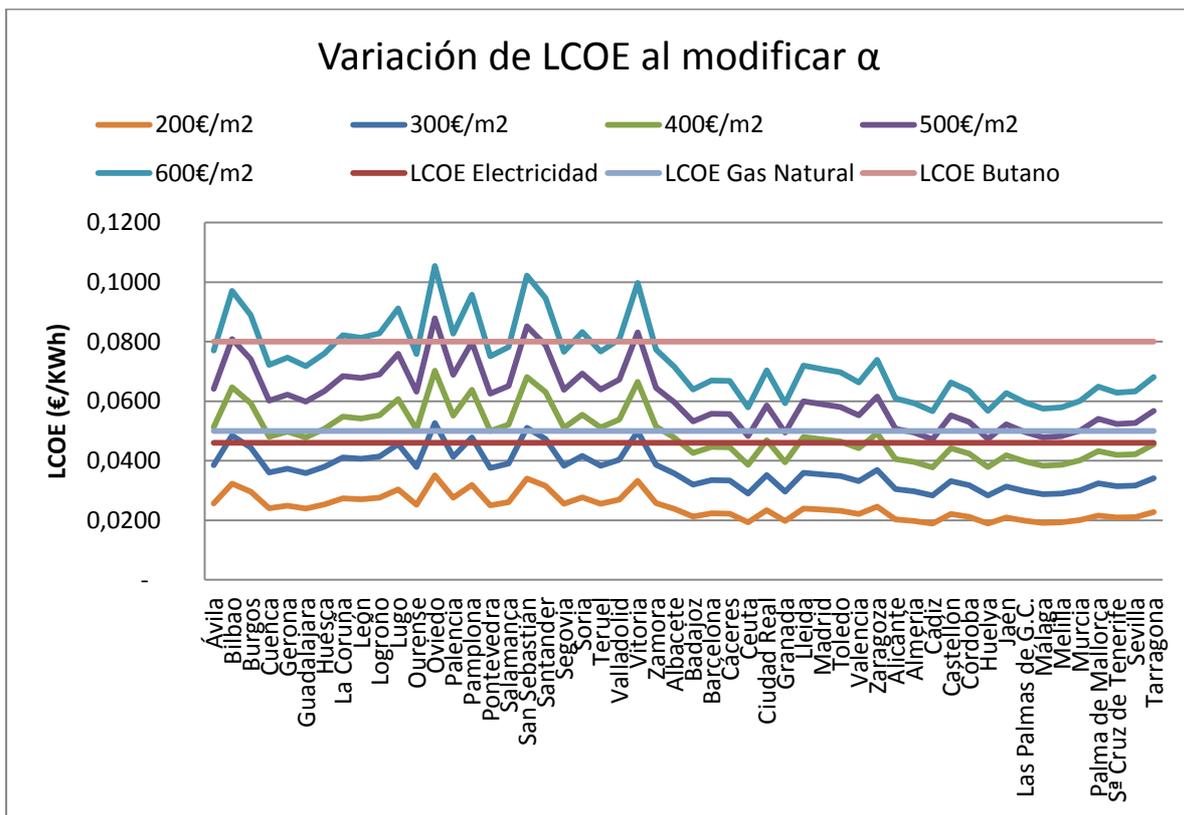


Figura 5.8. Variación de LCOE al modificar α

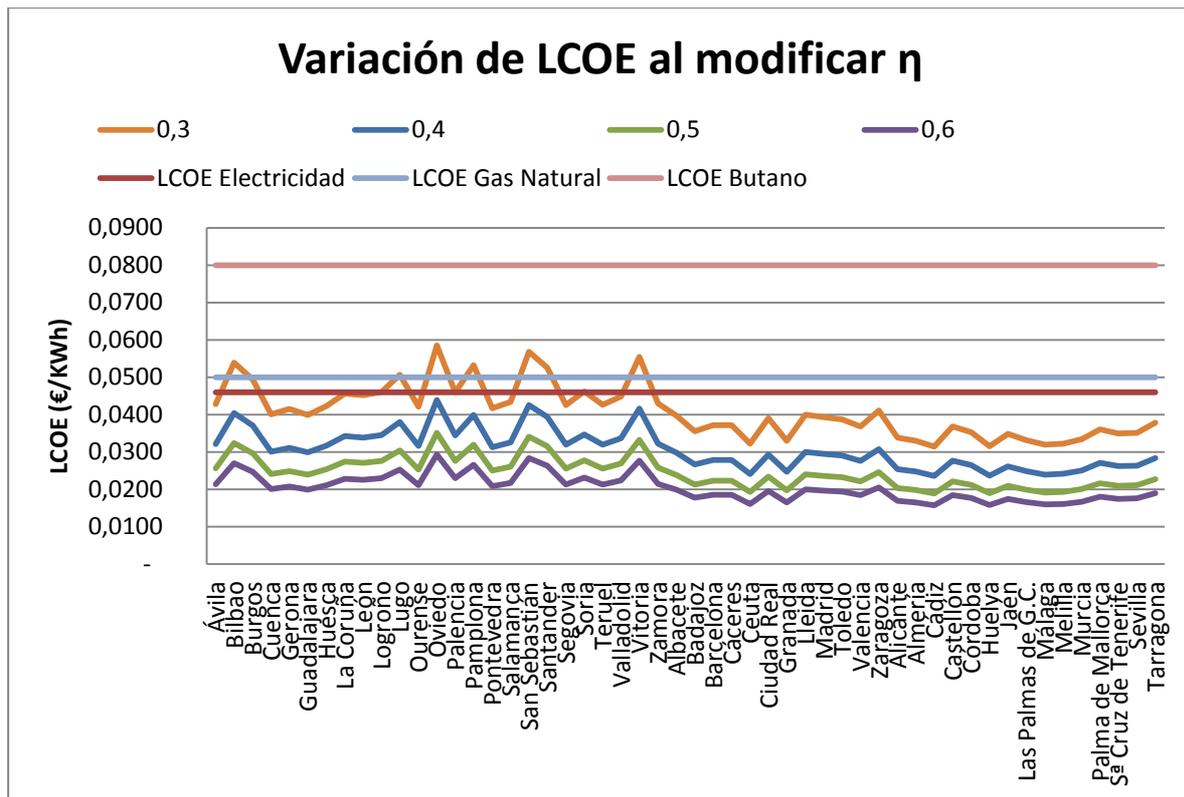


Figura 5.9. Variación de LCOE al modificar η

5. 3. Emisiones de CO₂ evitadas.

En la sección 5.1. se ha realizado una estimación económica del uso de instalaciones solares térmicas de baja temperatura. Sin embargo, ese enfoque no tiene en cuenta el impacto ambiental que produce la utilización de las diferentes alternativas. Más allá de consideraciones puramente económicas, la principal ventaja de la instalación frente al uso de combustibles fósiles es el hecho de que el recurso solar no realiza emisiones de CO₂ al ambiente. En una sociedad cada vez más preocupada por esta materia, la sostenibilidad es un motivo de peso para elegir el uso de instalaciones solares. Para finalizar este estudio, se va a realizar un análisis de las emisiones que se evitarían al utilizar una instalación solar térmica de baja temperatura.

De acuerdo al informe titulado "El Sistema Eléctrico Español" que publica anualmente Red Eléctrica Española, el factor de emisión de CO₂ asociado a la generación de energía eléctrica fue, para el año 2016, de 0,242 Kg CO₂ /KW·h. Suponiendo que el sistema de climatización trabaja con una eficiencia tal que COP=3, las emisiones producidas son de 0,081 Kg CO₂/KW·h para la producción de energía térmica útil.

Puesto que se ha estimado previamente la demanda a satisfacer en cada ciudad, la energía que aportará la instalación solar es, en cada caso, la fracción cubierta de esa demanda. Por tanto, puede estimarse la cantidad de CO₂ evitado al ambiente usando la siguiente expresión:

$$Emisiones\ evitadas\ \left(\frac{Kg\ CO_2}{año}\right) = 0,081\ \frac{Kg\ CO_2}{KW \cdot h} \cdot FSC \cdot D_{anual}\left(\frac{KW \cdot h}{año}\right)$$

Haciendo uso de esta expresión, se obtienen los datos mostrados en la Tabla 5.4. En ella se representa, para cada FSC, la media de emisiones evitadas tomando como muestra todas las capitales de provincia españolas. También se exponen los datos de las ciudades en las que se tendría la menor y la mayor cantidad de emisiones evitadas, que serían respectivamente Las Palmas de Gran Canaria y Burgos.

Todo esto se representa gráficamente en la Figura 5.10, en las que se muestran los datos obtenidos en cada una de las ciudades y para los diferentes FSC.

FSC	CO2 mínimo (T/año)	CO2 máximo (T/año)	CO2 medio (T/año)
10	0,68	1,98	1,35
20	1,36	3,96	2,71
30	2,04	5,94	4,06
40	2,71	7,92	5,41
50	3,39	9,90	6,76
60	4,07	11,88	8,12
70	4,75	13,86	9,47
80	5,43	15,84	10,82
90	6,11	17,82	12,18
100	6,79	19,80	13,53

Tabla 5.4. Emisiones de CO₂ evitadas.

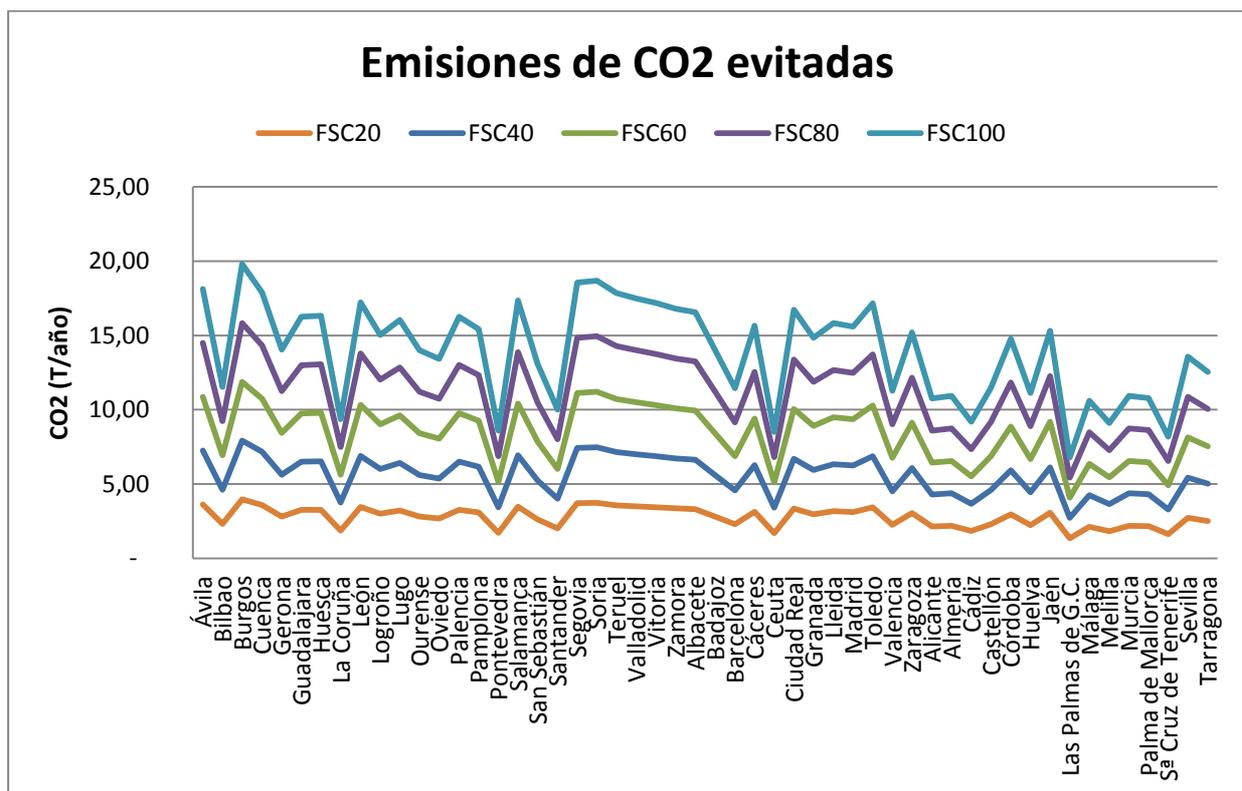


Figura 5.10. Emisiones de CO₂ evitadas.

6. Conclusiones.

- Se ha obtenido una correlación entre los principales parámetros que caracterizan una instalación solar térmica de baja temperatura. Esta expresión permite simplificar futuras estimaciones al evaluar el coste económico de las instalaciones solares térmicas de baja temperatura.
- De la estimación económica que se ha llevado a cabo en este estudio puede concluirse que, atendiendo a criterios puramente económicos, los captadores solares son una opción viable para cubrir una parte de la demanda del edificio. Sin embargo, su uso se hace menos atractivo a medida que aumenta la cantidad de demanda que se quiere satisfacer. Para altos FSC, el coste de la instalación es demasiado elevado. Por tanto, esta se debe dimensionar para cubrir un determinado porcentaje de la demanda, con lo que se hace necesario utilizar un sistema de apoyo que aporte la parte que los captadores no pueden cubrir.
- Se ha comprobado que las instalaciones térmicas de baja temperatura son más interesantes en zonas climáticas cálidas, en las que predomina la demanda de refrigeración. En ellas es posible alcanzar FSC muy elevados con costes competitivos. En zonas más frías sigue siendo rentable su utilización para cubrir una pequeña parte de la demanda, pero sus costes se elevan rápidamente a medida que aumenta el FSC que se pretende satisfacer.
- Se destaca la fuerte influencia que tiene el coste inicial de inversión en los costes totales durante la vida útil de la instalación, siendo este el principal parámetro a considerar si se quiere comprobar la viabilidad económica de una instalación determinada.

7. Bibliografía.

- [1] D. Mehdi Zeigami, «A review of solar thermo-mechanical refrigeration and cooling methods,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 51, pp. 1428-1445, 2015.
- [2] I. Sarbu, «General review of solar-powered closed sorption refrigeration systems,» *Energy Conversion and Management*, n° 105, pp. 403-422, 2015.
- [3] X. Zhai, «A review for research and new design options of solar absorption cooling systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n° 9, pp. 4416-4423, 2011.
- [4] T. Mateus, «Energy and economic analysis of an integrated solar absorption cooling and heating system in different building types and climates,» *Applied Energy*, vol. 86, n° 6, pp. 949-957, 2009.
- [5] R. Red Eléctrica Española, «El Sistema Eléctrico Español. Informe.,» 2016.
- [6] J. González Camacho, «Instalaciones solares para cubrir la demanda térmica en edificios en España. Proyecto Fin de Carrera.,» 2013.
- [7] F. Fernández Pino, «Análisis de los sistemas de refrigeración solar por adsorción. Proyecto Fin de Carrera.,» 2011.
- [8] C. T. d. I. Edificación, «Documento básico de ahorro de energía (DB-HE),» 2009.
- [9] N. e. U. 94002:2005, «Instalaciones solares térmicas para producción de agua caliente sanitaria. Cálculo de la».
- [10] IEA, «Projected Costs of Generating Electricity,» 2015.
- [11] IDAE, «Evaluación del potencial de climatización con energía solar térmica en edificios,» 2011.
- [12] S. Said, «Alternative designs for a 24h operating solar-powered absorption refrigeration technology,» *Int J Refrig*, vol. 7, n° 35, pp. 1967-1977, 2012.

8. Anexo. Cálculo de AFSC.

En este anexo se presentan las tablas-resumen en las que se muestran las áreas que se necesitan en cada una de las 52 ciudades para satisfacer cada una de las fracciones solares cubiertas desde FSC=10 hasta FSC=100 además de la inclinación óptima para cada caso y el PAS que se obtiene. Estas áreas son las que se han utilizado en la Subsección 4.2.5. para obtener la correlación entre los parámetros característicos de la instalación.

Capital de provincia	Demanda térmica (kWh/año)	Tipo de perfil	FSC 10%			FSC 20%		
			Inclinación	AFSC 10% (m ²)	PAS(FSC10)	Inclinación	AFSC 20% (m ²)	PAS(FSC20)
Ávila	224640	1	-15	23,72	100,00	-15	49,15	96,51
Bilbao	143100	1	-15	20,35	100,00	-15	40,68	100,00
Burgos	245430	1	-15	28,48	100,00	-15	58,44	97,47
Cuenca	221940	1	-15	22,90	100,00	-15	45,80	100,00
Gerona	174266	1	-15	19,70	100,00	-15	39,40	100,00
Guadalajara	201536	1	-15	21,34	100,00	-15	42,68	100,00
Huesca	202461	1	-15	22,30	100,00	-15	44,62	100,00
La Coruña	116100	1	-15	15,00	100,00	-15	29,99	100,00
León	213570	1	-15	23,40	100,00	-15	50,80	92,08
Logroño	186377	1	-15	22,40	100,00	-15	44,77	100,00
Lugo	198990	1	-15	24,95	100,00	-15	49,90	100,00
Ourense	173726	1	-15	20,10	100,00	-15	40,20	100,00
Oviedo	166320	1	-15	23,00	100,00	-15	46,00	100,00
Palencia	201690	1	-15	22,58	100,00	-15	48,79	92,49
Pamplona	191160	1	-15	24,60	100,00	-15	50,24	97,97
Pontevedra	106380	1	-15	12,90	100,00	-15	25,79	100,00
Salamanca	215074	1	-15	23,34	100,00	-15	46,67	100,00
San Sebastián	162270	1	-15	23,10	100,00	-15	46,20	100,00
Santander	124200	1	-15	17,48	100,00	-15	34,97	100,00
Segovia	230040	1	-15	24,64	100,00	-15	49,30	100,00
Soria	231660	1	-15	25,85	100,00	-15	54,05	95,68
Teruel	221400	1	-15	24,17	100,00	-15	48,35	100,00
Valladolid	216887	1	-15	24,17	100,00	-15	48,35	100,00

Tabla 8.1. Áreas necesarias para FSC=10, FSC=20.

Capital de provincia	Demanda térmica (kWh/año)	Tipo de perfil	FSC 10%			FSC 20%		
			Inclinación	AFSC 10% (m ²)	PAS(FSC10)	Inclinación	AFSC 20% (m ²)	PAS(FSC20)
Vitoria	213030	1	-15	27,37	100,00	-15	59,20	92,45
Zamora	208363	1	-15	22,87	100,00	-15	45,74	100,00
Albacete	205354	2	-15	21,72	100,00	-15	43,44	100,00
Badajoz	173957	2	-15	17,59	100,00	-15	35,17	100,00
Barcelona	141827	2	-15	15,40	100,00	-15	30,79	100,00
Cáceres	194246	2	-15	19,98	100,00	-15	39,98	100,00
Ceuta	105416	2	-15	10,47	100,00	-15	20,94	100,00
Ciudad Real	207514	2	-15	21,78	100,00	-15	43,56	100,00
Granada	184024	2	-15	17,37	100,00	-15	34,75	100,00
Lleida	196329	2	-15	21,07	100,00	-15	42,13	100,00
Madrid	193397	2	-15	20,63	100,00	-15	41,25	100,00
Toledo	212760	2	-15	22,22	100,00	-15	44,45	100,00
Valencia	139860	2	-15	15,13	100,00	-15	30,25	100,00
Zaragoza	188421	2	-15	20,90	100,00	-15	41,82	100,00
Alicante	133264	3	-15	13,55	100,00	-15	27,09	100,00
Almería	135501	3	-15	13,47	100,00	-15	26,93	100,00
Cádiz	113824	3	-15	11,05	100,00	-15	22,10	100,00
Castellón	142059	3	-15	15,34	100,00	-15	30,67	100,00
Córdoba	183330	3	-15	18,26	100,00	-15	36,50	100,00
Huelva	137816	3	-15	13,27	100,00	-15	26,55	100,00
Jaén	189964	3	-15	18,60	100,00	-15	37,20	100,00
Las Palmas de G.C.	84124	3	-15	8,60	100,00	-15	17,21	100,00
Málaga	131490	3	-15	12,83	100,00	-15	25,66	100,00
Melilla	112821	3	-15	11,20	100,00	-15	22,41	100,00
Murcia	135424	3	-15	13,68	100,00	-15	27,35	100,00
Palma de Mallorca	133689	3	-15	14,34	100,00	-15	28,67	100,00
Sª Cruz de Tenerife	101481	3	-15	10,94	100,00	-15	21,87	100,00
Sevilla	168287	3	-15	16,95	100,00	-15	33,91	100,00
Tarragona	155597	3	-15	16,87	100,00	-15	33,73	100,00

Tabla 8.1. (Continuación). Áreas necesarias para FSC=10, FSC=20.

Capital de provincia	Demanda térmica (kWh/año)	Tipo de perfil	FSC 30%			FSC 40%		
			Inclinación	AFSC 30% (m ²)	PAS(FSC30)	Inclinación	AFSC 40% (m ²)	PAS(FSC40)
Ávila	224640	1	15	81,18	92,28	15	118,69	84,16
Bilbao	143100	1	-15	61,03	100,00	-15	87,08	93,44
Burgos	245430	1	-15	96,05	88,96	15	144,35	83,96
Cuenca	221940	1	-15	68,68	100,00	-15	94,90	96,50
Gerona	174266	1	-15	59,12	100,00	-15	78,92	99,86
Guadalajara	201536	1	-15	64,04	100,00	-15	86,05	99,20
Huesca	202461	1	-15	66,93	100,00	-15	90,17	98,96
La Coruña	116100	1	-15	44,98	100,00	-15	63,68	94,18
León	213570	1	15	85,70	86,20	15	126,75	77,70
Logroño	186377	1	-15	67,18	100,00	-15	90,07	99,42
Lugo	198990	1	-15	77,22	96,90	-15	113,00	88,30
Ourense	173726	1	-15	60,30	100,00	-15	80,40	100,00
Oviedo	166320	1	-15	71,57	96,40	-15	103,55	88,84
Palencia	201690	1	15	84,65	85,26	15	125,55	76,65
Pamplona	191160	1	-15	82,17	89,85	15	124,75	84,19
Pontevedra	106380	1	-15	39,20	98,70	-15	56,62	91,10
Salamanca	215074	1	-15	71,05	98,55	15	107,30	91,75
San Sebastián	162270	1	-15	73,07	94,84	-15	106,12	87,08
Santander	124200	1	-15	54,42	96,36	-15	79,80	87,62
Segovia	230040	1	-15	73,92	100,00	-15	102,70	95,99
Soria	231660	1	-15	88,40	87,76	15	130,95	83,83
Teruel	221400	1	-15	72,55	100,00	15	104,40	97,99
Valladolid	216887	1	-15	72,55	100,00	15	104,40	97,99
Vitoria	213030	1	15	101,10	86,69	15	149,60	78,10
Zamora	208363	1	-15	68,62	100,00	-15	93,38	97,99
Albacete	205354	2	-15	65,16	100,00	-15	87,83	98,92

Tabla 8.2. Áreas necesarias para FSC=30, FSC=40.

Capital de provincia	Demanda térmica (kWh/año)	Tipo de perfil	FSC 30%			FSC 40%		
			Inclinación	AFSC 30% (m ²)	PAS(FSC30)	Inclinación	AFSC 40% (m ²)	PAS(FSC40)
Badajoz	173957	2	-15	52,76	100,00	-15	70,35	96,52
Barcelona	141827	2	-15	46,19	100,00	-15	61,59	100,00
Cáceres	194246	2	-15	59,95	100,00	-15	79,95	100,00
Ceuta	105416	2	-15	31,40	100,00	-15	42,45	98,64
Ciudad Real	207514	2	-15	65,35	100,00	-15	87,15	100,00
Granada	184024	2	-15	52,12	100,00	-15	69,50	100,00
Lleida	196329	2	-15	63,20	100,00	-15	84,40	99,86
Madrid	193397	2	-15	61,88	100,00	-15	82,52	100,00
Toledo	212760	2	-15	66,67	100,00	-15	88,90	100,00
Valencia	139860	2	-15	45,37	100,00	-15	60,66	99,73
Zaragoza	188421	2	-15	62,73	100,00	-15	83,63	100,00
Alicante	133264	3	-15	40,63	100,00	-15	54,94	98,61
Almería	135501	3	-15	40,40	100,00	-15	53,86	100,00
Cádiz	113824	3	-15	33,16	100,00	-15	44,21	100,00
Castellón	142059	3	-15	46,00	100,00	-15	61,34	100,00
Córdoba	183330	3	-15	54,75	100,00	-15	73,01	100,00
Huelva	137816	3	-15	39,82	100,00	-15	53,10	100,00
Jaén	189964	3	-15	55,80	100,00	-15	74,40	100,00
Las Palmas de G.C.	84124	3	-15	25,81	100,00	-15	34,41	100,00
Málaga	131490	3	-15	38,48	100,00	-15	51,32	100,00
Melilla	112821	3	-15	33,62	100,00	-15	45,46	98,60
Murcia	135424	3	-15	41,03	100,00	-15	54,70	100,00
Palma de Mallorca	133689	3	-15	43,02	100,00	-15	57,41	99,90
Sª Cruz de Tenerife	101481	3	-15	32,81	100,00	-15	43,75	100,00
Sevilla	168287	3	-15	50,86	100,00	-15	67,82	100,00
Tarragona	155597	3	-15	50,60	100,00	-15	68,20	98,91

Tabla 8.2 (Continuación). Áreas necesarias para FSC=30, FSC=40.

Capital de provincia	Demanda térmica (kWh/año)	Tipo de perfil	FSC 50%			FSC 60%		
			Inclinación	AFSC 50% (m ²)	PAS (FSC50)	Inclinación	AFSC 60% (m ²)	PAS (FSC60)
Ávila	224640	1	15	159,65	78,20	15	204,50	73,26
Bilbao	143100	1	-15	118,83	85,59	15	154,30	84,28
Burgos	245430	1	15	195,44	77,51	15	252,06	72,12
Cuenca	221940	1	15	128,70	93,28	15	171,26	84,12
Gerona	174266	1	15	105,14	97,26	15	134,08	91,52
Guadalajara	201536	1	-15	115,37	92,49	15	149,60	90,35
Huesca	202461	1	-15	122,36	91,16	15	161,60	87,53
La Coruña	116100	1	-15	87,24	85,94	15	114,13	84,30
León	213570	1	15	171,85	71,64	15	220,43	67,02
Logroño	186377	1	-15	121,16	92,39	15	160,70	88,59
Lugo	198990	1	15	156,80	84,81	15	201,75	79,09
Ourense	173726	1	-15	101,36	99,14	-15	129,78	92,92
Oviedo	166320	1	15	144,17	85,34	15	184,80	79,90
Palencia	201690	1	15	167,43	71,85	15	215,90	66,87
Pamplona	191160	1	15	168,60	77,88	15	222,55	70,79
Pontevedra	106380	1	15	78,85	86,78	15	101,80	80,66
Salamanca	215074	1	15	148,02	83,15	15	194,00	76,12
San Sebastián	162270	1	15	146,40	84,25	15	191,05	77,46
Santander	124200	1	15	109,84	84,87	15	144,35	77,50
Segovia	230040	1	15	142,40	91,20	15	188,00	82,91
Soria	231660	1	15	176,25	77,86	15	224,35	73,40
Teruel	221400	1	15	147,20	86,88	15	198,20	77,43
Valladolid	216887	1	15	147,20	86,88	15	198,20	77,43
Vitoria	213030	1	15	203,10	71,92	15	267,30	65,57
Zamora	208363	1	15	130,90	92,88	15	175,97	82,91
Albacete	205354	2	-15	116,33	93,36	-15	148,22	87,92

Tabla 8.3. Áreas necesarias para FSC=50, FSC=60.

Capital de provincia	Demanda térmica (kWh/año)	Tipo de perfil	FSC 50%			FSC 60%		
			Inclinación	AFSC 50% (m ²)	PAS (FSC50)	Inclinación	AFSC 60% (m ²)	PAS (FSC60)
Badajoz	173957	2	-15	88,58	99,29	-15	111,00	95,07
Barcelona	141827	2	-15	78,47	98,11	15	99,64	96,16
Cáceres	194246	2	-15	101,37	98,59	-15	124,70	96,17
Ceuta	105416	2	-15	54,36	96,28	-15	67,90	92,50
Ciudad Real	207514	2	-15	112,10	97,16	-15	142,23	91,90
Granada	184024	2	-15	86,90	99,95	-15	108,20	96,33
Lleida	196329	2	-15	112,15	93,93	-15	142,78	88,54
Madrid	193397	2	-15	107,15	96,26	-15	136,87	90,42
Toledo	212760	2	-15	111,85	99,37	-15	139,80	95,39
Valencia	139860	2	-15	77,58	97,47	-15	97,70	92,89
Zaragoza	188421	2	-15	108,07	96,73	-15	138,74	90,42
Alicante	133264	3	-15	70,30	96,33	-15	88,58	91,74
Almería	135501	3	15	69,05	99,56	-15	87,34	92,50
Cádiz	113824	3	-15	56,00	98,68	-15	69,90	94,87
Castellón	142059	3	-15	78,30	97,92	-15	98,48	93,42
Córdoba	183330	3	-15	91,58	99,65	-15	115,73	94,63
Huelva	137816	3	-15	66,37	100,00	-15	82,53	96,50
Jaén	189964	3	-15	93,10	99,88	-15	117,55	94,93
Las Palmas de G.C.	84124	3	-15	43,47	98,94	15	52,95	99,19
Málaga	131490	3	-15	65,17	98,42	-15	82,22	93,61
Melilla	112821	3	-15	58,08	96,47	15	74,45	93,29
Murcia	135424	3	-15	69,68	98,13	-15	86,05	95,36
Palma de Mallorca	133689	3	-15	73,50	97,55	-15	92,22	93,29
Sª Cruz de Tenerife	101481	3	-15	56,75	96,35	-15	71,33	91,99
Sevilla	168287	3	-15	85,65	98,97	-15	107,88	94,30
Tarragona	155597	3	-15	87,05	96,86	-15	108,70	93,09

Tabla 8.3 (Continuación). Áreas necesarias para FSC=50, FSC=60.

Capital de provincia	Demanda térmica (kWh/año)	Tipo de perfil	FSC 70%			FSC 80%		
			Inclinación	AFSC70% (m ²)	PAS (FSC70)	Inclinación	AFSC 80% (m ²)	PAS (FSC80)
Ávila	224640	1	15	256,52	68,13	15	334,30	59,75
Bilbao	143100	1	15	200,45	75,68	15	252,15	68,77
Burgos	245430	1	15	324,74	65,31	15	444,10	54,59
Cuenca	221940	1	15	225,05	74,68	15	299,50	64,13
Gerona	174266	1	15	179,02	79,97	15	240,50	68,03
Guadalajara	201536	1	15	197,75	79,74	15	273,82	65,82
Huesca	202461	1	15	225,00	73,35	15	323,10	58,37
La Coruña	116100	1	15	143,34	78,31	15	183,95	69,74
León	213570	1	15	294,10	58,61	15	398,05	49,49
Logroño	186377	1	15	213,50	77,79	15	306,30	61,97
Lugo	198990	1	15	257,35	72,34	15	350,20	60,76
Ourense	173726	1	15	165,54	89,78	15	219,00	77,56
Oviedo	166320	1	15	237,35	72,58	15	305,77	64,38
Palencia	201690	1	15	281,20	59,90	15	384,70	50,04
Pamplona	191160	1	15	290,55	63,26	15	397,80	52,81
Pontevedra	106380	1	15	132,93	72,06	15	172,70	63,39
Salamanca	215074	1	15	250,60	68,75	15	332,60	59,20
San Sebastián	162270	1	15	248,65	69,44	15	325,70	60,59
Santander	124200	1	15	188,35	69,29	15	262,60	56,80
Segovia	230040	1	15	241,40	75,33	15	317,00	65,56
Soria	231660	1	15	286,10	67,15	15	377,50	58,16
Teruel	221400	1	15	263,10	68,05	15	374,00	54,71
Valladolid	216887	1	15	263,10	68,05	15	374,00	54,71
Vitoria	213030	1	15	354,40	57,70	15	482,20	48,47
Zamora	208363	1	15	232,15	73,32	15	318,10	61,15
Albacete	205354	2	15	185,23	86,34	15	242,15	72,81

Tabla 8.4. Áreas necesarias para FSC=70, FSC=80.

Capital de provincia	Demanda térmica (kWh/año)	Tipo de perfil	FSC 70%			FSC 80%		
			Inclinación	AFSC70% (m ²)	PAS (FSC70)	Inclinación	AFSC 80% (m ²)	PAS (FSC80)
Badajoz	173957	2	-15	140,64	87,55	-15	178,16	78,98
Barcelona	141827	2	15	124,02	90,14	15	150,85	84,69
Cáceres	194246	2	-15	156,85	89,20	15	200,88	83,04
Ceuta	105416	2	15	82,42	91,90	15	99,10	87,35
Ciudad Real	207514	2	15	182,06	87,37	15	255,55	71,13
Granada	184024	2	15	135,60	92,25	15	165,63	86,32
Lleida	196329	2	15	182,48	84,92	15	228,10	77,65
Madrid	193397	2	15	175,20	86,54	15	256,90	67,45
Toledo	212760	2	-15	180,75	86,07	-15	230,70	77,08
Valencia	139860	2	15	122,22	89,48	15	152,13	82,16
Zaragoza	188421	2	15	181,90	85,14	15	254,40	69,57
Alicante	133264	3	15	111,10	88,11	-15	138,12	78,45
Almería	135501	3	-15	108,31	87,03	-15	137,20	78,52
Cádiz	113824	3	-15	87,06	88,86	-15	105,48	83,82
Castellón	142059	3	15	122,59	91,08	15	151,43	84,26
Córdoba	183330	3	-15	142,70	89,53	15	179,06	84,59
Huelva	137816	3	-15	103,25	90,00	-15	124,79	85,09
Jaén	189964	3	-15	145,34	89,58	15	183,36	84,43
Las Palmas de G.C.	84124	3	15	66,87	91,64	-15	85,50	80,49
Málaga	131490	3	-15	101,82	88,19	-15	127,10	80,74
Melilla	112821	3	15	96,13	84,30	-15	119,68	74,90
Murcia	135424	3	15	106,76	92,81	15	132,14	85,71
Palma de Mallorca	133689	3	-15	113,84	88,16	-15	145,30	78,94
Sª Cruz de Tenerife	101481	3	-15	91,06	84,06	-15	118,63	73,75
Sevilla	168287	3	-15	134,15	88,47	-15	162,45	83,50
Tarragona	155597	3	15	135,50	90,98	15	172,23	81,80

Tabla 8.4 (Continuación). Áreas necesarias para FSC=70, FSC=80.

Capital de provincia	Demanda térmica (kWh/año)	Tipo de perfil	FSC 90%			FSC 100%		
			Inclinación	AFSC 90% (m ²)	PAS (FSC90)	Inclinación	AFSC100% (m ²)	PAS (FSC100)
Ávila	224640	1	15	432,60	51,95	15	700,40	35,65
Bilbao	143100	1	15	345,00	56,60	15	531,00	40,82
Burgos	245430	1	15	579,33	47,07	15	880,20	34,42
Cuenca	221940	1	15	392,90	55,00	15	617,45	38,88
Gerona	174266	1	15	317,70	57,93	15	468,85	43,62
Guadalajara	201536	1	15	364,70	55,59	15	615,30	36,61
Huesca	202461	1	15	439,20	48,31	15	666,80	35,36
La Coruña	116100	1	15	254,94	56,61	15	439,35	36,50
León	213570	1	15	511,20	43,35	15	756,95	32,53
Logroño	186377	1	15	414,20	51,55	15	670,60	35,38
Lugo	198990	1	15	478,20	50,06	15	820,88	32,40
Ourense	173726	1	15	301,05	63,47	15	519,60	40,86
Oviedo	166320	1	15	411,40	53,84	15	637,10	38,63
Palencia	201690	1	15	525,00	41,25	15	782,40	30,75
Pamplona	191160	1	15	511,50	46,20	15	829,60	31,65
Pontevedra	106380	1	15	231,24	53,26	15	370,50	36,94
Salamanca	215074	1	15	442,60	50,05	15	657,80	37,42
San Sebastián	162270	1	15	432,10	51,38	15	697,60	35,36
Santander	124200	1	15	342,10	49,05	15	504,70	36,94
Segovia	230040	1	15	419,40	55,74	15	704,00	36,90
Soria	231660	1	15	488,80	50,53	15	720,24	38,11
Teruel	221400	1	15	523,10	44,01	15	797,90	32,05
Valladolid	216887	1	15	523,10	44,01	15	797,90	32,05
Vitoria	213030	1	15	625,60	42,03	15	944,00	30,95
Zamora	208363	1	15	436,20	50,17	15	676,30	35,95
Albacete	205354	2	15	326,72	62,94	15	530,00	43,11

Tabla 8.5. Áreas necesarias para FSC=90, FSC=100.

Capital de provincia	Demanda térmica (kWh/año)	Tipo de perfil	FSC 90%			FSC 100%		
			Inclinación	AFSC 90% (m ²)	PAS (FSC90)	Inclinación	AFSC100% (m2)	PAS (FSC100)
Badajoz	173957	2	15	217,20	75,51	15	358,42	50,85
Barcelona	141827	2	15	187,20	76,78	15	305,50	52,27
Cáceres	194246	2	15	249,50	75,21	15	418,74	49,80
Ceuta	105416	2	15	119,10	81,76	15	173,24	62,46
Ciudad Real	207514	2	15	357,18	57,25	15	562,34	40,41
Granada	184024	2	15	211,62	76,00	15	323,09	55,31
Lleida	196329	2	15	301,30	66,13	15	485,50	45,60
Madrid	193397	2	15	345,60	56,40	15	614,50	35,24
Toledo	212760	2	15	283,80	74,19	15	471,00	49,67
Valencia	139860	2	15	187,05	75,17	15	261,20	59,81
Zaragoza	188421	2	15	347,70	57,27	15	584,50	37,85
Alicante	133264	3	-15	177,19	68,80	-15	254,20	53,28
Almería	135501	3	-15	185,20	65,44	-15	282,72	47,63
Cádiz	113824	3	-15	138,95	71,59	-15	211,16	52,34
Castellón	142059	3	-15	191,38	72,11	15	252,45	63,18
Córdoba	183330	3	-15	223,50	73,50	15	321,67	58,86
Huelva	137816	3	-15	160,70	74,34	-15	212,35	62,51
Jaén	189964	3	-15	228,75	73,18	15	328,55	58,90
Las Palmas de G.C.	84124	3	-15	114,30	67,73	-15	153,05	56,20
Málaga	131490	3	-15	163,50	70,62	-15	228,35	56,18
Melilla	112821	3	-15	155,50	64,85	-15	237,30	47,22
Murcia	135424	3	15	165,20	77,12	15	222,00	63,77
Palma de Mallorca	133689	3	-15	182,90	70,56	-15	238,85	60,03
Sª Cruz de Tenerife	101481	3	-15	150,28	65,50	-15	213,40	51,25
Sevilla	168287	3	-15	196,55	77,63	-15	270,50	62,68
Tarragona	155597	3	-15	212,05	71,58	15	296,00	59,50

Tabla 8.5 (Continuación). Áreas necesarias para FSC=90, FSC=100.

