

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

CENTRO POLITÉCNICO SUPERIOR

INGENIERÍA INDUSTRIAL



“Simulación de la demanda de calor y energía de un edificio y abastecimiento por medio de diferentes tipos de generadores y acumuladores”

PROYECTO DE FIN DE CARRERA

- Diciembre 2010 -

Autor: Andrés Gil Cladera

Director: Herr Reinhart Leithner
Institut für Wärme- und Brennstofftechnik
Technische Universität Braunschweig

Ponente: Sergio Espatolero Callao
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad de Zaragoza

“Simulación de la demanda de calor y energía de un edificio y abastecimiento por medio de diferentes tipos de generadores y acumuladores”.

***** RESUMEN *****

El trabajo realizado en el presente estudio consta fundamentalmente de 4 partes.

La primera de ellas consiste en la descripción y modelización de un edificio particular, situado en la localidad de Soller (Mallorca). Se pretende tener un conocimiento de los materiales, distribución y propiedades de los cerramientos a fin de poder establecer correctamente los balances térmicos entre el interior y el exterior del edificio.

La segunda parte del trabajo consiste en el cálculo de las necesidades de energía del edificio para abastecerlo completamente de calefacción, aire acondicionado, suministro eléctrico y agua caliente sanitaria (en adelante, ACS), y de acuerdo con los parámetros establecidos en la normativa española respecto a las condiciones de diseño interior de los edificios. Para ello se han tenido en cuenta los datos climáticos de la localidad durante cada hora del año, obtenidos a partir del programa informático *METEONORM versión 6*.

Se ha aplicado el método de las diferencias finitas según el esquema de Crank–Nicholson a toda la envolvente térmica del edificio, con la ayuda del programa de cálculo y simulación *MATLAB 2007*. Se incluyen, anexos a este trabajo, el código implementado y un manual explicativo.

Como resultado de esta parte se ha obtenido la evolución de la temperatura interior del edificio, el consumo eléctrico y el consumo energético para el ACS, la calefacción y el aire acondicionado, a lo largo de todo el año.

En la tercera parte del proyecto se plantean y simulan dos posibles instalaciones, basadas en tecnologías solares, capaces de abastecer el edificio. La primera de ellas, recogida en lo que en adelante llamaremos “caso 1”, consiste en la instalación en el tejado del edificio de un colector solar plano para suministrar ACS. El resto de superficie disponible del tejado se utiliza para instalar un campo de paneles fotovoltaicos que proporcionan el suministro eléctrico para alimentar una bomba de calor reversible y para el consumo normal del edificio. La bomba de calor climatiza el edificio todo el año.

La segunda instalación propuesta, recogida en el “caso 2”, consiste en la instalación en el tejado de un campo de colectores solares planos que proporcionan ACS todo el año y agua caliente para calefacción en invierno. En verano se realiza la climatización del edificio mediante una máquina de refrigeración solar por adsorción, alimentada mediante el agua caliente procedente de los colectores.

Tanto en el caso 1 como en el caso 2, se contempla el uso de electricidad de la red general como fuente auxiliar para abastecer al edificio de energía en los casos en que los recursos solares sean escasos.

La última parte del proyecto consiste en la comparación de las instalaciones de los casos 1 y 2, en base a criterios energéticos, de eficiencia y económicos, y apuntando posibles mejoras que permitan una mejor consecución de los objetivos propuestos.

Índice de contenido

INTRODUCCIÓN.....	5
1.1. Motivación.....	5
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivos generales.....	5
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. Panorama de la memoria.....	6
2. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO.....	8
2.1. Localización y descripción.....	8
2.2. Datos climáticos.....	8
2.3. Envolvente térmica.....	8
2.3.1. Definición.....	8
2.3.2. Muros exteriores.....	9
2.3.3. Tejado.....	9
2.3.4. Suelo.....	9
2.3.5. Huecos en la envolvente térmica.....	9
3. CALCULO DE CARGAS.....	11
3.1. Condiciones de diseño.....	11
3.1.1. Calefacción y aire acondicionado.....	11
3.1.2. Electrodomésticos.....	11
3.1.3. Agua caliente sanitaria.....	11
3.2. Cargas solares.....	11
3.2.1. Radiación solar en superficies opacas.....	11
3.2.2. Radiación a través de superficies transparentes.....	12
3.3. Cargas de convección.....	12
3.4. Cargas por ventilación y filtraciones.....	12
3.5. Balance térmico – Método de diferencias finitas.....	12
3.6. Control de la temperatura.....	13
3.7. Resultados de la simulación.....	14
4. CASO 1: INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA Y ACS CON BOMBA DE CALOR....	15
4.1. Descripción de la instalación del caso 1.....	15
4.2. Condiciones de diseño del caso 1.....	15
4.2.1. Condiciones de diseño de la instalación de ACS.....	15
4.2.2. Condiciones de diseño de la instalación fotovoltaica.....	16
4.3. Cálculos y simulación del caso 1.....	17
4.3.1. Dimensionamiento de la instalación de ACS.....	17
4.3.2. Simulación de la instalación de ACS del caso 1.....	17
4.3.3. Simulación de la instalación fotovoltaica del caso 1.....	18

5. CASO 2: INSTALACIÓN COLLECTORES SOLARES PLANOS CON MÁQUINA DE ADSORCIÓN.....	19
5.1. Descripción de la instalación del caso 2.....	19
5.2. Condiciones de diseño del caso 2.....	20
5.3. Cálculos y simulación del caso 2.....	20
6. ESTUDIO COMPARATIVO.....	22
6.1. Criterios energéticos.....	22
6.2. Criterios de eficiencia.....	23
6.3. Criterios económicos.....	23
6.3.1. Costes de operación.....	23
6.3.2. Costes de inversión.....	23
6.3.3. Costes totales.....	24
7. CONCLUSIONES.....	25
7.1. Eficiencia de las instalaciones.....	25
7.2. Sistema auxiliar.....	26
7.3. Consideraciones económicas.....	26
7.4. Conclusión general.....	27
Anexo 1	29

INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La Universidad de Zaragoza establece como requisito imprescindible la realización de un proyecto de fin de carrera para poder acceder al título de Ingeniero Industrial.

Por este motivo, el alumno Andrés Gil Cladera realiza el presente proyecto en el marco del programa europeo de intercambio de estudios *Erasmus*, bajo la supervisión del Profesor Herr Reinhard Leithner, director del “*Institut für Wärme- und Brennstofftechnik*”¹, en la Universidad Técnica de Braunschweig, en Alemania.

La presente memoria puede considerarse un extracto del trabajo realizado en dicha universidad alemana, el cual se incluye en su formato original como anexo en el “**Anexo 1**”, y al que se harán constantes referencias. Es preciso indicar aquí que todas las referencias bibliográficas se encuentran en el apartado **REFERENCES**, del **Anexo 1**, por lo que se hará referencia a las mismas simplemente a través del número que figura en dicho apartado.

Así mismo, la tarea de supervisión ha sido llevada a cabo por Sergio Espatolero Callado, profesor de la Universidad de Zaragoza en el Área de Máquinas y Motores Térmicos, quien ha asumido la ponencia del presente proyecto de fin de carrera.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

La tendencia principal del presente proyecto se orienta hacia las energías renovables, en concreto la energía solar. Se aborda el estudio de dos tecnologías solares ampliamente difundidas, la fotovoltaica y la solar térmica, como vehículos para suministrar la energía que se consume en una vivienda a lo largo de un año.

1.2.2. Objetivos específicos

Se establece como objetivo del presente proyecto, en primer lugar, el cálculo de las necesidades de energía de un edificio determinado para abastecerlo completamente de calefacción, aire acondicionado, suministro eléctrico y agua caliente sanitaria (en adelante, ACS), y de acuerdo con los parámetros establecidos en la normativa española respecto a las condiciones de diseño interior de los edificios. Ver referencias [4] y [5].

En segundo lugar, se plantean y dimensionan dos posibles instalaciones, basadas en tecnologías solares, capaces de abastecer el edificio, con el fin de determinar su adecuación a esta aplicación en concreto.

Por último se realiza un estudio comparativo entre las dos instalaciones propuestas, en base a criterios energéticos, de eficiencia y económicos, y apuntando posibles mejoras que permitan una mejor consecución de los objetivos marcados.

¹ *Instituto de tecnologías de calor y combustibles (N.T.)*

1.3. Panorama de la memoria

La presente introducción enmarca, en el **apartado 1.1**, el ámbito en el cual ha sido realizado el proyecto. Y así mismo se establecen los objetivos propuestos en el mismo en el **apartado 1.2**.

En el **capítulo 2** se realiza una descripción detallada del edificio, ubicación y orientación, materiales constructivos y colocación y características de los huecos en la envolvente térmica. Se realiza una mención especial a los datos climáticos del lugar, los cuales han sido obtenidos hora a hora a través del programa informático *METEONORM versión 6* (ver referencia [2]).

En el **capítulo 3** se realiza el cálculo de las cargas térmicas a las que está sometido el edificio. Se contemplan las siguientes: cargas solares, cargas por ventilación y filtraciones, cargas de convección y cargas de conducción. A partir de estos parámetros, y de la descripción realizada en el **capítulo 2**, se aplica el método de las diferencias finitas, según el esquema de Crank–Nicholson, a toda la envolvente térmica del edificio. Se ha utilizado la referencia [12] como fuente bibliográfica de referencia para esta parte. Así mismo, también ha sido diseñado un regulador proporcional integral con objeto de conocer el calor necesario a introducir (o extraer) en el edificio, en cada hora del año, y a efectos de mantener la temperatura interior del edificio en las condiciones de diseño establecidas.

La simulación se ha realizado con el programa de cálculo *Matlab 2007*.

El **capítulo 4** consiste en la simulación de la primera de las dos instalaciones propuestas, a la cual nos referiremos en adelante como **caso 1**, la cual abastece al edificio de energía eléctrica por medio de un campo de paneles fotovoltaicos instalados sobre el tejado de la casa. La climatización del edificio se realiza, tanto en verano como en invierno, a través de una bomba de calor reversible. Se contempla también el uso de un colector solar plano para obtener ACS. La fuente de energía auxiliar, tanto para el suministro eléctrico como para la instalación de ACS, es la energía eléctrica procedente de la red general. Las fuentes bibliográficas de referencia para este capítulo son [4] y [10].

En el **capítulo 5** se simula la segunda de las dos instalaciones propuestas, referida como **caso 2**, en la cual el suministro principal de energía proviene de un campo de colectores solares térmicos instalados sobre el tejado del edificio, los cuales procuran el agua caliente para la calefacción en invierno y el consumo doméstico. En verano se realiza la climatización del edificio mediante la máquina de refrigeración solar por adsorción, *SC 08*, proporcionada por el fabricante alemán *Solvis* (ver referencia [29]), alimentada mediante el agua caliente procedente de los colectores. En este caso también se analiza el uso de la energía eléctrica procedente de la red general como fuente auxiliar y como único suministro para los electrodomésticos y demás consumos de la vivienda. La fuente bibliográfica de referencia para este capítulo es [10].

El **capítulo 6** de esta memoria consiste en la comparación de las instalaciones de los **casos 1** y **2**, en base a criterios energéticos, de eficiencia y económicos.

En el **capítulo 7** se detallan las conclusiones extraídas del trabajo realizado y se apuntan posibles mejoras que permitan una mejor consecución de los objetivos propuestos.

Como anexos a esta memoria sólo se incluye el **Anexo 1**, como ya se indicaba en el **apartado 1.1**, cuya estructura es muy similar a la de la presente memoria. En el **Anexo 1** están completamente desarrollados todos los temas planteados, se detallan los cálculos efectuados y se representan gráficamente aquellas variables que se consideran más interesantes. También se detalla la simbología utilizada para las variables y para los subíndices así como las fuentes bibliográficas utilizadas.

El **Anexo 1** consta a su vez de 5 anexos, a los cuales se harán referencias en esta memoria según se considere oportuno:

Appendix A: Summary of climatic data – METEONORM version 6.0

Appendix B: House figures

Appendix C: Arrangement and connexion of collectors on the roof

Appendix D: Technical sheets of products

Appendix E: Handbook of the simulation with MATLAB

Por último, como material informático anexo se incluye el código implementado en Matlab para realizar las simulaciones que se indican en los capítulos 3, 4, 5 y 6 de esta memoria. También se adjunta un manual explicativo de dicho código.

2. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

2.1. Localización y descripción

El edificio en cuestión se ubica en la localidad de Soller (Mallorca). En el **Anexo 1 (figure 2.1)**, se muestra un plano de situación del mismo.

Las características del edificio vienen dadas como datos de partida para realizar el presente estudio. La **figura 2.1** muestra un esquema en planta de la distribución del edificio, el cual se describe con más detalle en el **Anexo 1 (Appendix B)**.

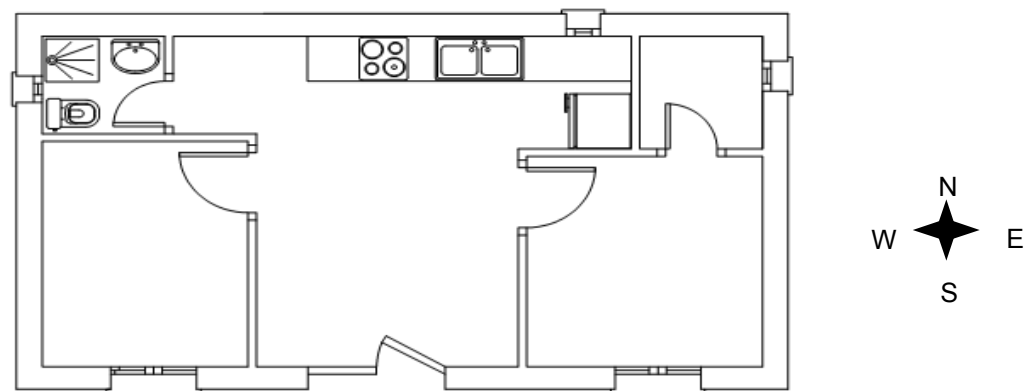


Figura 2.1 - Representación en planta del edificio

2.2. Datos climáticos

Los datos climáticos de la localidad concreta han sido obtenidos mediante el programa informático *METEONORM versión 6*, mediante interpolación de los datos registrados en el año 2005 por las estaciones meteorológicas más cercanas, y que figuran en la base de datos del programa. Ver referencia [2] para obtener más información sobre el procedimiento de interpolación.

Las variables utilizadas para realizar este proyecto se recogen en la **tabla 2.1**

2.3. Envolvente térmica

2.3.1. Definición

Se entiende por envolvente térmica, según [4] la

(...) compuesta por todos los cerramientos que limitan espacios habitables con el ambiente exterior (aire o terreno u otro edificio) y por todas las particiones interiores que limitan los espacios habitables con los espacios no habitables que a su vez estén en contacto con el ambiente exterior.

Símbolo	Descripción	Unidades
G_{Gh}	Radiación solar global, medida sobre superficie horizontal	[W.m ⁻²]
G_{Bh}	Radiación solar directa, medida sobre superficie horizontal	[W.m ⁻²]
G_{Dh}	Radiación solar difusa, medida sobre superficie horizontal	[W.m ⁻²]
ϕ	Azimut	[°]
φ	Altura solar	[°]
V_{wind}	Velocidad del viento	[m.s ⁻¹]
DD	Dirección del viento respecto a la dirección norte	[°]
T_{amb}	Temperatura del ambiente	[°C]
RH_{amb}	Humedad relativa del ambiente.	[%]

Tabla 2.1 – Variables climáticas

Los materiales que componen la envolvente térmica del edificio están caracterizados por la conductividad térmica, λ [W.m⁻¹.K⁻¹], la densidad, ρ [kg.m⁻³], el calor específico a presión constante, c_p [J.kg⁻¹.K⁻¹], el espesor, x [m] y la difusividad a la transferencia de vapor, α [m².s⁻¹]. Estas propiedades han sido obtenidas de la referencia [6]

A partir de ahí se definen la resistencia térmica, R_{th} [m² .K.W⁻¹], y el coeficiente global de transferencia de calor, U [W.m⁻².K⁻¹], de acuerdo a las **ecuaciones 2.1 y 2.2 del Anexo 1**.

2.3.2. Muros exteriores

La composición y orientación de los muros exteriores de la envolvente térmica, así como el valor de la resistencia térmica, se recogen en el **Anexo 1 (tables 2.2 y 2.3)**.

2.3.3. Tejado

La composición de los diferentes elementos que componen el tejado, así como su orientación e inclinación, se recogen en el **Anexo 1 (tables 2.4 y 2.5)**.

2.3.4. Suelo

El suelo de la vivienda se encuentra en contacto con el terreno. La composición del mismo se recoge en el **Anexo 1 (table 2.6)**. La resistencia térmica del mismo no se realiza en base a la ecuación (2.7), sino según lo establecido en [4], cuyo procedimiento se detalla en el **Anexo 1 (apartado 2.4.3. Floor)**.

2.3.5. Huecos en la envolvente térmica

Se entienden por huecos en la envolvente térmica básicamente a las ventanas y a la puerta de entrada, los cuales tienen un coeficiente de transmisión térmica diferente al de las paredes y el tejado.

Las ventanas cuentan con superficies acristaladas, mientras que la puerta es opaca a la radiación solar. En el primer caso, el coeficiente de transmisión térmica se calcula en el **Anexo 1** (ecuación 2.4), extraída de [4]. En el caso de la puerta, se aplica la ecuación 2.7 del **Anexo 1**.

Los valores del coeficiente de transferencia de calor de los huecos de la envolvente térmica se detallan en el **Anexo 1** (table 2.8)

A diferencia de las paredes y el tejado, se ha considerado que la puerta y ventanas no tienen inercia térmica y no son capaces de almacenar energía. Así pues, quedan excluidos del cálculo por diferencias finitas realizado al resto de la envolvente térmica.

3. CALCULO DE CARGAS

3.1. Condiciones de diseño

3.1.1. Calefacción y aire acondicionado

Las condiciones de diseño interior para la calefacción y el aire acondicionado han sido extraídas de [5].

Se aceptan los valores de diseño dados para la velocidad del aire en el interior de la vivienda, la actividad metabólica y la resistencia térmica de la vestimenta (que son parámetros que escapan al control de este estudio), para simular más adelante la variación de la temperatura en el interior de la vivienda.

Los valores concretos escogidos para cada una de las variables de diseño se detallan en el **Anexo 1 (apartado 3.1.1)**.

3.1.2. Electrodomésticos

Viene dada como requisito del diseño la lista de electrodomésticos del **Anexo 1 (table 3.3)**, con las potencias unitarias y los tiempos de uso. Así mismo se establece un factor de simultaneidad de 0,3.

A partir de estos datos se define la variable $E_{appliances}$, como la energía (J) consumida por los electrodomésticos.

3.1.3. Agua caliente sanitaria

Los parámetros de diseño para el consumo del ACS son el caudal consumido, \dot{V}_{HSW} (litros/persona.día) y la temperatura de acumulación, T_{acc} . Ambos se han extraído de [4] y vienen detallados en el **Anexo 1 (apartado 3.1.3)**.

3.2. Cargas solares

La radiación solar, G (W/m^2), sobre cada una de las superficies exteriores del edificio se ha calculado de acuerdo a la relación propuesta por Fariña, extraída de la referencia [22], y presentada en el **Anexo 1 (ecuación 3.4)**, en función de las radiaciones directa, G_{Bh} (W/m^2), y difusa, G_{Dh} (W/m^2), medidas sobre una superficie horizontal; y los ángulos azimut, ϕ ($^\circ$), la altura solar, φ ($^\circ$), la inclinación de la superficie respecto a la horizontal, δ ($^\circ$) y la orientación de la misma, θ ($^\circ$), respecto al sur.

Se ha asumido que la radiación difusa es constante en todas direcciones.

3.2.1. Radiación solar en superficies opacas.

Se define en este apartado la temperatura equivalente, T_{eq} [24] de la superficie exterior del edificio, en función de la radiación solar incidente (calculada en el apartado anterior), el coeficiente de absortividad de la superficie, α_0 , y el coeficiente de convección en el exterior, h_{amb} [$W/m^2.K$], de acuerdo a la **ecuación 3.5 del Anexo 1**.

El coeficiente de convección en el exterior y el coeficiente de absortividad vienen dados en el **Anexo 1** (ecuación 3.6 y table 3.3 respectivamente). Ver más detalles en el **Anexo 1** (apartado 3.2.2).

3.2.2. Radiación a través de superficies transparentes

Una parte de la radiación solar incidente sobre las ventanas es reflejada. Otra parte se transmite por conducción a través del marco y del vidrio y una última parte se transmite a través del vidrio hacia el interior de la vivienda. Este apartado se centra en esta última parte, según lo expuesto en [4]. En el **Anexo 1** (apartado 3.2.3) se detalla el cálculo realizado.

3.3. Cargas de convección

El cálculo de las cargas térmicas por convección se fundamenta en la determinación de los coeficientes de transferencia de calor por convección en el interior y en el exterior de la envolvente térmica. El coeficiente de transferencia en el exterior, h_{amb} [W/m².K], se calcula en el **Anexo 1** (ecuación 3.6). El coeficiente de transferencia en el interior, h_o [W/m².K], se determina según lo expuesto en [4], y que se recoge en el **Anexo 1** (apartado 3.3).

3.4. Cargas por ventilación y filtraciones

En este apartado se determinan las cargas térmicas debidas a las filtraciones de aire a través de las carpinterías y las debidas a la ventilación del recinto, necesaria para alcanzar la condiciones de confort.

En el primer caso, y ante la ausencia de datos, se establecen los valores máximos de permeabilidad dados en [4] como valores de diseño. En el segundo, se aceptan como valores de diseño los mínimos dados en [4] para la ventilación de locales.

Se consideran las cargas de calor sensible, debido a la diferencia de temperaturas entre el aire del interior y el del exterior del edificio, así como las cargas de calor latente, debidas a las diferencias de humedad relativa.

Se pueden ver más detalles de este cálculo en el **Anexo 1** (apartado 3.4).

3.5. Balance térmico – Método de diferencias finitas

El método de las diferencias finitas es un método de cálculo numérico en el cual las ecuaciones diferenciales que describen los problemas físicos son aproximadas por expresiones algebraicas y las cantidades infinitesimales son sustituidas por cantidades finitas. La simulación de fenómenos físicos así realizada no es propiamente dinámica, pero puede considerarse como tal debido a que la variación de los parámetros se realiza en espacios de tiempo suficientemente pequeños.

Para aplicaciones en instalaciones de calefacción y aire acondicionado, el método está ampliamente descrito en la referencia [12]. En el **Anexo 1 (apartado 3.6)** se incluye un extracto de la misma, así como las ecuaciones empleadas para implementarlo en el programa de cálculo *MATLAB*.

Se han realizado las siguientes hipótesis simplificadoras:

- Los flujos de calor y vapor son unidimensionales
- Las propiedades térmicas de los materiales del edificio son homogéneas y no varían en el tiempo.
- Las propiedades de los flujos de aire sobre la superficie de las estructuras del edificio son homogéneas.
- El intercambio de energía radiante entre las superficies interiores del edificio puede ser ignorado debido a que las diferencias de temperaturas son pequeñas.

Sólo se indicará aquí que este método de cálculo impone un criterio de convergencia que, para este caso particular, viene dado por la variable Fo , que se expresa así:

$$Fo = \frac{\lambda_b}{\rho_b \cdot c_{pb}} \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} < 0.5$$

donde

λ_b = coeficiente de transferencia de calor

ρ_b = densidad

$c_{p,b}$ = calor específico

Δx = espesor de la capa considerado

Δt = intervalo de tiempo considerado

El subíndice b indica el material de construcción.

Para cumplir con este criterio, se ha optado por reducir Δt , que con los datos climáticos obtenidos es 1 hora (3600 segundos), por medio de una interpolación lineal hasta hacer

$$\Delta t = 360 \text{ segundos}$$

que es el valor considerado en el resto del estudio a menos que se exprese lo contrario.

Se pueden ver más detalles del cálculo realizado en el **Anexo 1, apartado 3.6**.

3.6. Control de la temperatura

El método de las diferencias finitas, presentado en el apartado anterior, permite conocer el valor de los intercambios energéticos del edificio con el exterior. No obstante, para mantener las condiciones de diseño interior, será necesario introducir o extraer cantidades de calor a priori desconocidas.

Con este fin se ha diseñado un regulador proporcional-integral (PI) que en cada instante de tiempo permitirá conocer la cantidad de calor a introducir o extraer, \dot{Q}_H (W).

El método empleado para su diseño es el método empírico de Ziegler–Nichols debido a que se cuenta con un modelo del edificio que puede ser implementado en MATLAB.

En el **Anexo 1 (apartado 3.7.1)**, se detalla el procedimiento de cálculo utilizado (ver más información en [18])

3.7. Resultados de la simulación

Los principales resultados obtenidos de la simulación del modelo construido a partir de lo expuesto en los capítulos anteriores, han sido la variación de la potencia necesaria para mantener las condiciones interiores, \dot{Q}_H y la variación de la temperatura media interna del edificio, T_o , a lo largo de un año. Ambas variables pueden verse representadas en el **Anexo 1 (Figure 3.3 y Figure 3.4)**.

4. CASO 1: INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA Y ACS CON BOMBA DE CALOR

La instalación que se presenta en este capítulo es la primera de las dos propuestas para satisfacer la demanda de energía del edificio a partir de energía solar. El panorama del capítulo sería el siguiente: en el apartado 4.1 se realiza una descripción de la instalación, de los elementos que la componen y del modo de funcionamiento propuesto. En el apartado 4.2 se detallan las condiciones de diseño tenidas en cuenta para simular la instalación. Por último, el apartado 4.3 presenta la simulación realizada y los resultados obtenidos.

4.1. Descripción de la instalación del caso 1

La instalación propuesta consta de un campo de paneles fotovoltaicos ubicados en el tejado del edificio, el cual tiene una superficie útil de 45 m^2 . Hay que prever espacio también sobre el tejado para colectores solares térmicos, encargados de producir ACS.

Los paneles fotovoltaicos producirán energía eléctrica para alimentar los electrodomésticos de la casa y para alimentar una bomba de calor, encargada de la climatización durante todo el año. Se dispondrá también una instalación de baterías para absorber los picos de potencia que puedan producirse en el consumo eléctrico a lo largo de un día, así como un depósito acumulador para el ACS.

La fuente de energía auxiliar, tanto para la instalación fotovoltaica como para la instalación de ACS, será energía eléctrica procedente de la red.

En la **figura 4.1** se muestra un esquema del funcionamiento de la instalación. Esta figura es la misma que la mostrada en el **Anexo 1 (Figure 5.1)**.

4.2. Condiciones de diseño del caso 1

Se pretende utilizar toda la superficie útil del tejado para instalar los paneles fotovoltaicos y los colectores solares planos. Así pues, se realizará el diseño de la instalación de ACS, la cual debe cumplir con unos requisitos mínimos para cumplir con la normativa [4]. El resto de la superficie del tejado se utilizará para los paneles fotovoltaicos.

4.2.1. Condiciones de diseño de la instalación de ACS

El consumo de ACS viene regulado en la normativa [4]. Se establece un caudal \dot{V}_{HSW} de 30 litros/persona.día a 60°C . La vivienda está prevista para un uso de 4 personas. Por otra parte, a falta de datos más precisos, se considera la temperatura del agua fría de la red dada en [22] para cada mes del año.

1, apartado 5.1.2.5).

Se considera un rendimiento global de la instalación fotovoltaica, llamado η_{photo} . Con lo que el consumo estimado será

$$E_{photo} = \frac{E_{T,photo}}{\eta_{photo}} \quad (4.2)$$

En el **Anexo 1 (apartado 4.1.4.3)** se realiza el cálculo de η_{photo} .

Se prevé una instalación de baterías para absorber los picos de potencia que se produzcan durante el día. Así pues, la capacidad de almacenamiento de la misma, E_{batt} se realizará en base a la mayor diferencia entre la energía producida por el campo de paneles fotovoltaicos y la energía consumida por el edificio. Se considera una profundidad de descarga del 80 %.

Los paneles fotovoltaicos se dispondrán sobre el tejado, con la misma orientación e inclinación de éste.

orientación, $\theta_{panel} = 0^\circ$ (orientación sur)

inclinación, $\delta_{panel} = 12.41^\circ$

4.3. Cálculos y simulación del caso 1

4.3.1. Dimensionamiento de la instalación de ACS

Se establece a priori el uso del colector térmico plano SolvisCala C-253-I, cuyas características vienen dadas en el **Anexo 1 (Appendix D)**. Las ecuaciones que modelan el comportamiento del colector son la del rendimiento, la temperatura media y el balance de energía entre la energía solar recibida por el colector y la energía ganada por el caudal de agua que lo atraviesa (ecuaciones 4.15, 4.16 y 4.17 del **Anexo 1**). La resolución del sistema formado por estas tres ecuaciones permite conocer la energía ganada por la instalación para cada instante del año, de acuerdo a los valores de las variables climáticas, y de acuerdo a los consumos estimados en el apartado anterior.

El volumen del acumulador se ha calculado de acuerdo a lo expuesto en [4] y [10] (ver más detalles en **Anexo 1, apartado 4.2.4**), optando por el acumulador SolvisTherm de 150 litros (ver más detalles en **Anexo 1, Appendix D**).

Por último, se ha calculado el volumen mínimo del vaso de expansión (**Anexo 1, apartado 5.1.5.3**)

4.3.2. Simulación de la instalación de ACS del caso 1

Los principales resultados simulados a lo largo de un año han sido la energía solar recibida por el colector plano, $Q_{S,collector}$ (MJ), la energía producida por la instalación, $Q_{acc,HSW}$ (MJ), la demanda del edificio, Q_{HSW} (MJ) y el suministro de energía auxiliar para alcanzar las condiciones de diseño, $Q_{aux,HSW}$ (MJ). Por otra parte se calcula el porcentaje de cobertura de energía, F_{HSW} (%), de la producción respecto de la demanda así como el rendimiento del colector térmico. Los resultados obtenidos se consideran satisfactorios para esta instalación. Las gráficas con los resultados de la simulación para la instalación de ACS pueden verse en

el **Anexo 1** (apartado 5.1.6).

4.3.3. Simulación de la instalación fotovoltaica del caso 1

Tras considerarse válida la instalación de ACS, se propone cubrir el resto de superficie útil del tejado con paneles fotovoltaicos SolvisPico PI-AE/210 Wp (ver **Anexo 1, Appendix D**). Se ubican un total de 24 paneles, colocados en 6 series de 4 para cumplir con el requisito de tensión máxima del sistema (ver **Anexo 1**, apartado 4.1.3).

En el **Anexo 1** (apartado 5.1.2) se detalla la selección realizada del resto de componentes de la instalación así como las características de los mismos.

Los principales resultados simulados, a lo largo de un año, han sido la energía solar recibida, $Q_{S,panel}$ (MJ), la energía producida por la instalación, $E_{p,panel}$ (MJ), la demanda del edificio, E_{photo} (MJ) y el suministro de energía auxiliar para alcanzar las condiciones de diseño, $E_{aux,panel}$ (MJ). Por otra parte se calcula el porcentaje de cobertura de energía, F_{photo} (%) de la producción respecto de la demanda. Los resultados obtenidos se consideran satisfactorios para esta instalación. Los resultados de la simulación para la instalación fotovoltaica pueden verse en el **Anexo 1** (apartado 5.1.3).

5. CASO 2: INSTALACIÓN COLLECTORES SOLARES PLANOS CON MÁQUINA DE ADSORCIÓN

La instalación que se presenta en este capítulo es la segunda de las dos propuestas para satisfacer la demanda de energía del edificio a partir de energía solar. El panorama del capítulo sería el siguiente: en el apartado 5.1 se realiza una descripción de la instalación, de los elementos que la componen y del modo de funcionamiento propuesto. En el apartado 5.2 se detallan las condiciones de diseño tenidas en cuenta para simular la instalación. Por último, el apartado 5.3 presenta la simulación realizada y los resultados obtenidos. Los nombres de las variables y parámetros propios de este capítulo van seguidos del subíndice 'ads'.

5.1. Descripción de la instalación del caso 2

La instalación propuesta consta de un campo de colectores solares térmicos para producir agua caliente. Los colectores están dispuestos sobre la superficie del tejado de la casa, cuya superficie útil es de 45 m^2 . La energía térmica producida se acumulará en un depósito de agua a fin de disponer de ella para producir ACS, y para la calefacción en invierno de la casa. La climatización de la casa en verano se realiza igualmente a partir de la energía térmica del depósito, con la mediación de una máquina de refrigeración por adsorción.

La fuente de energía auxiliar será energía eléctrica procedente de la red.

En la **figura 5.1** se muestra un esquema del funcionamiento de la instalación. Esta figura es la misma que la mostrada en el **Anexo 1 (Figure 4.5)**.

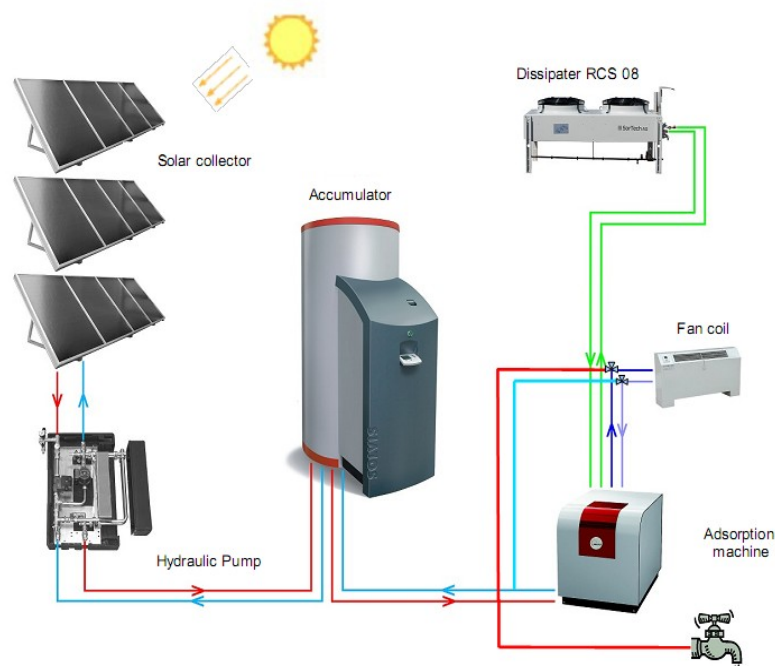


Figura 5.1 – Instalación de colectores solares y máquina de adsorción. Caso 2

5.2. Condiciones de diseño del caso 2

En el caso 2 se utiliza un único acumulador de agua, de mayores dimensiones que el del caso 1, para almacenar la energía necesaria para el ACS y la calefacción – climatización. Se establece una temperatura de acumulación del agua de 75 °C para hacer funcionar a la máquina de adsorción en sus condiciones nominales en verano. Por tanto, los caudales de consumo de ACS deben ser modificados de acuerdo a la **ecuación 3.3 del Anexo 1**.

Se plantea la instalación de 16 colectores solares térmicos SolvisCala C-253-I (ver características en **Anexo 1, Appendix D**), en series de 2, con objeto de alcanzar la temperatura de acumulación establecida. La inclinación y orientación de los colectores será la misma que la del tejado sobre el cual se ubican.

orientación, $\theta_{ads} = 0^\circ$ (orientación sur)

inclinación, $\delta_{ads} = 12.41^\circ$

En este caso también se toma el mismo valor de $\eta_{transfer}$ como el rendimiento en la transferencia de calor, del campo de colectores al agua del acumulador.

$$\eta_{transfer} = 0.8$$

La demanda total de energía térmica del edificio, Q_{ads} (J), será:

$$Q_{ads} = Q_{heating} + Q_{cooling} + Q_{HSW} \quad (5.1)$$

donde

$Q_{heating}$ = demanda de energía para calefacción (J)

$Q_{cooling}$ = demanda de energía para climatización (J)

Q_{HSW} = demanda de energía para ACS (J)

La demanda de energía eléctrica, $E_{appliances}$, será la misma que la descrita en el **apartado 4.2.2** (ver también **apartado 3.1.2 del Anexo 1**).

5.3. Cálculos y simulación del caso 2

El cálculo del resto de elementos de la instalación se realiza en el **Anexo 1 (apartado 5.2.2)**.

Los principales resultados simulados a lo largo de un año han sido la energía solar recibida por el campo de colectores planos, $Q_{S,ads}$ (MJ), la energía producida por la instalación, $Q_{acc,ads}$ (MJ), la demanda del edificio, Q_{ads} (MJ) y el suministro de energía auxiliar para alcanzar las condiciones de diseño, $Q_{aux,ads}$ (MJ). Por otra parte se calcula el porcentaje de cobertura de energía, F_{ads} (%), de la producción respecto de la demanda así como el rendimiento de los colectores térmicos. Las gráficas con los resultados de la simulación para la instalación del caso 2 pueden verse en el **Anexo 1 (apartado 5.2.3)**.

6. ESTUDIO COMPARATIVO

6.1. Criterios energéticos

Puesto que los paneles fotovoltaicos y los colectores térmicos están colocados con la misma orientación e inclinación en ambos casos, la energía solar recibida por metro cuadrado será la misma. En ambos casos se producirá una transformación de energía hacia energía térmica y/o eléctrica.

La energía obtenida o producida, para ser consumida por medio de las instalaciones, en los casos 1 y 2, $E_{p,case1/2}$, viene dada por las **ecuaciones 6.1 y 6.2** (ver **Anexo 1, apartado 6.1**).

Ambas expresiones están graficadas en el **Anexo 1 (figure 6.1)**, para cada día del año.

El máximo de energía producida llega a 9.6 (MJ/m²), en el caso 1 y a 12.75 (MJ/m²), en el caso 2, ambas el día 146. Esto supone una diferencia del 32.8 %, llegando esta diferencia a ser el 36.5 % como máximo el día 204. Se aprecia cómo las altas temperaturas del verano favorecen la producción de energía en el caso 2 mucho más que en el 1, donde el rendimiento se ve perjudicado, como se verá a continuación.

Por otra parte se compara la energía que consume el edificio, de acuerdo a los equipamientos en cada caso. En el caso 1 se contempla la energía eléctrica para alimentar la bomba de calor y los electrodomésticos, E_{photo} (MJ), y la calorífica para obtener el ACS, Q_{HSW} (MJ). En el caso 2, se contempla la energía calorífica, Q_{ads} (MJ), para calentar el agua con la que se abastece a la calefacción, el ACS y la climatización (mediante la máquina de adsorción). La representación de estas variables es mostrada para cada día del año en el **Anexo 1 (figure 6.2)**. Se observa claramente cómo en los meses fríos el uso de la bomba de calor (en el caso 1), supone un consumo de energía mucho menor que en el caso 2.

Por último se compara en este apartado el consumo de energía auxiliar en cada uno de los casos. Se ha considerado un rendimiento de conversión de energía eléctrica a térmica del 100%. En el caso 1, la energía auxiliar será la necesaria para apoyar a la instalación fotovoltaica, $E_{aux,photo}$ (MJ), y a la instalación de ACS, $E_{aux,HSW}$ (MJ). En el caso 2, la energía auxiliar, $E_{aux,ads}$ (MJ), será la necesaria para apoyar a la instalación de colectores térmicos y la necesaria para alimentar los electrodomésticos.

Así pues, en el caso 1 el consumo de energía auxiliar es nulo o casi nulo entre los días 140 y 196. Mientras que en el mismo período en el caso 2, el consumo es al menos el de los electrodomésticos. La tendencia es mucho más pronunciada en los meses fríos, en los cuales se acusa un alto consumo de energía en el caso 2 para abastecer la calefacción.

Los valores anuales de estos consumos serían los siguientes

$$\text{case 1} \rightarrow E_{aux,photo} + E_{aux,HSW} = 3.426 \cdot 10^{10} + 3.412 \cdot 10^9 \text{ J} = 3.767 \cdot 10^{10} \text{ J} = 1.047 \cdot 10^4 \text{ kWh}$$

$$\text{case 2} \rightarrow E_{aux,ads} = 9.346 \cdot 10^{10} \text{ J} = 2.596 \cdot 10^4 \text{ kWh}$$

6.2. Criterios de eficiencia

Se entiende por eficiencia de una instalación la relación entre la energía útil o aprovechable, y la energía primaria empleada. Tanto para el caso 1 como el 2, la energía primaria es el sol.

En estos términos se comparan las instalaciones de ambos casos (ver **Anexo 1, apartado 6.2**). La instalación del caso 1 alcanza en verano (día 231), su rendimiento más bajo, un 23.5 %. El mismo día alcanza la instalación del caso 2 su rendimiento más alto, un 53 %. Las tendencias se invierten en los meses fríos, alcanzando la instalación del caso 1 un 29.5 % como máximo el día 12; y la del caso 2 mínimos en torno al 30 % en diferentes ocasiones².

En cualquier caso, se aprecia claramente cómo el rendimiento de la instalación térmica (del caso 2), es superior al de la fotovoltaica (caso 1), durante todo el año.

6.3. Criterios económicos

6.3.1. Costes de operación

Los costes de operación son los debidos al consumo eléctrico de la red general, en los momentos en que las instalaciones solares no son capaces de cubrir la demanda. Se establece una duración de 20 años para cada una de las instalaciones.

Se asumen los precios por potencia y energía siguientes

Precio por potencia, tarifa < 10 kW en el año 2010 = 1.642355 €/kW [32]

Precio de la energía, tarifa < 10 kW en el año 2010 = 0.11248 €/kWh [32]

Al cabo de un año, y de acuerdo al consumo en cada caso, el importe total de los costes de operación serían (ver **Anexo 1, apartado 6.3.1**).

$$B_{op,case1} = \sum_{year} b_{j,case1} = 1220.9 \text{ € / año} \quad (6.1)$$

$$B_{op,case2} = \sum_{year} b_{j,case2} = 3374.5 \text{ € / año} \quad (6.2)$$

Por otra parte se estudia el incremento del IPC de los últimos años para extrapolarlo durante la vida útil de la instalación.

6.3.2. Costes de inversión

Los costes de inversión se detallan en el **Anexo 1 (Table 6.2 y Table 6.3)**. Se considera un interés bancario del 5 % para cubrir un préstamo a 20 años para financiar la instalación (ver cálculo detallado en **Anexo 1, apartado 6.3.2**).

² Se observan en la **figure 6.5** del **Anexo 1**, valles pronunciados en el rendimiento, llegando al 0 %, en 2 ocasiones, pero que no son representativos de la instalación, sino achacables a singularidades de la simulación.

6.3.3. Costes totales

El cálculo de los costes totales al cabo de los 20 años de vida útil de las instalaciones se ha realizado como una progresión geométrica de los costes anuales, con la subida de precios del IPC y los intereses bancarios considerados constantes en todo el período. Se considera que el rendimiento de las instalaciones será el mismo durante la vida útil de la instalación. Se puede ver el cálculo detallado en **Anexo 1 (apartado 6.3.3)**. En el caso 1, se ha considerado un coste por mantenimiento equivalente al precio de las baterías en el año 10, con objeto de sustituirlas en ese año tal y como recomienda el fabricante. En el caso 2 no se consideran costes de mantenimiento. El resumen de los cálculos se ve representado en la figura 6.1 (ver también en **Anexo 1, Figure 6.10**).

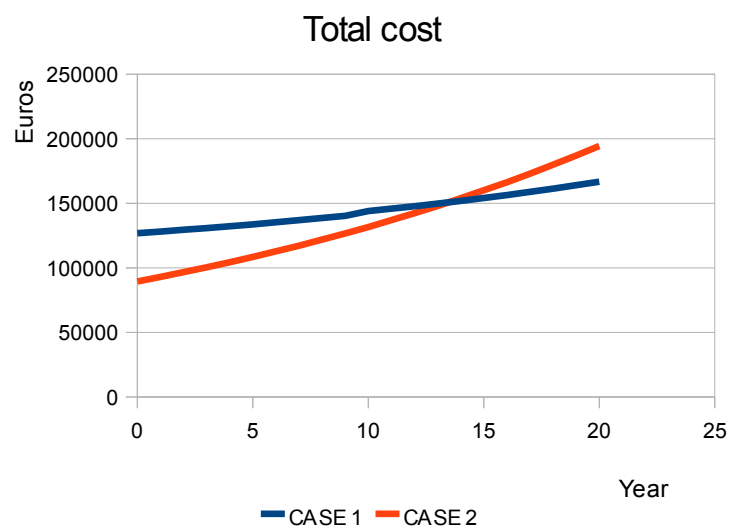


Figura 6.1 – Comparativos de costes de inversión y operación

7. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este estudio es calcular las necesidades de electricidad, calor y ACS del edificio propuesto. El método usado para abordar el problema – método de las diferencias finitas – demuestra ser válido para este propósito. Es relativamente fácil de implementar en MATLAB (ver **Anexo 1, Appendix E**), y permite gran precisión en los cálculos.

Sería necesario un mejor conocimiento de los consumos de energía y ciclos de carga para mejorar la precisión. Por ejemplo, se ha supuesto que los caudales de ventilación e infiltraciones son constantes a lo largo del año. Sin embargo, dependen fuertemente de decisiones humanas y son claramente inconstantes. Lo mismo ocurre con el consumo de ACS y con el consumo para los electrodomésticos, de los cuales no se puede más que estimar el consumo diario. Todos estos factores introducen gran incertidumbre en la simulación.

El segundo objetivo de este estudio es el diseño y simulación de los sistemas solares necesarios para suministrar electricidad, calefacción, climatización y ACS al edificio. Este objetivo también ha sido alcanzado en este proyecto con las dos instalaciones propuestas.

Hay, sin embargo, algunas consideraciones importantes que se comentan a continuación.

7.1. Eficiencia de las instalaciones

Las instalaciones solares propuestas para este estudio presentan una gran limitación a la hora de suministrar energía en invierno, para un uso normal del edificio. Hay dos factores que contribuyen principalmente a este hecho:

El primero es que la radiación solar en invierno es cerca de cuatro veces menor que en verano, para esta latitud. El segundo es que la demanda de energía en invierno es más del doble que en verano. Ambos efectos se suman.

Por estos motivos es muy difícil con la tecnología actual cubrir el 100 % de la demanda a, partir de fuentes solares, sin usar una gran superficie colectora. Los criterios de diseño son más restrictivos en invierno y por eso ambas instalaciones están sobre dimensionadas en verano.

Un mejor diseño de la vivienda permitiría mejorar el aprovechamiento del espacio disponible por medio de técnicas de arquitectura solar pasiva, como muros *Trombe* o invernaderos adosados (ver referencias [20] y [21]).

En verano no hay problema en satisfacer la demanda con las instalaciones propuestas. Aunque el consumo podría reducirse usando parasoles en las ventanas y controlando la ventilación en las horas más cálidas del día.

Por otra parte, las instalaciones propuestas tienen otro inconveniente puesto que el ángulo de inclinación de los paneles y colectores favorece la captación de energía en verano y la perjudica en invierno, cuando la demanda es mayor. Por poner un ejemplo, la producción de energía sería hasta un 28 % mayor en los meses fríos si la inclinación de los paneles fuera

50°, de acuerdo al modelo y la simulación realizados. Bien es cierto que la inclinación propuesta para los paneles (12,41°), responde a criterios estéticos y arquitectónicos.

Respecto a la máquina de adsorción, los resultados muestran una buena correlación entre la energía solar disponible y la demanda, durante el período estival. Se comprueba que la tecnología es adecuada como sistema de refrigeración, con muy bajos costes de operación y mantenimiento. Por otra parte, la máquina de adsorción de 8 kW propuesta para este proyecto resulta demasiado grande y está ampliamente sobre dimensionada.

7.2. Sistema auxiliar

La necesidad de un sistema auxiliar de energía se hace patente mediante esta simulación. Para este proyecto sólo se ha propuesto la electricidad de la red como fuente auxiliar. Se debería comparar el coste de operación usando otras fuentes auxiliares, por ejemplo combustibles. Para ilustrar este hecho, compárese el precio del gas natural en 2010 (0,041307 €/kWh [33]), que es menos de la mitad que el precio de la electricidad.

En el caso 2, el uso de una instalación eminentemente térmica, permite una gran combinación de soluciones para suministrar energía auxiliar (electricidad, calderas, chimeneas...), lo cual favorece la flexibilidad y seguridad en el suministro. Contrariamente, el uso de la bomba de calor limita el uso de una fuente auxiliar a la electricidad de la red.

7.3. Consideraciones económicas

El uso de tecnologías solares reporta amplios beneficios cuando son instaladas en regiones soleadas y son diseñadas para aplicaciones específicas. Sin embargo, es evidente que los costes de inversión pueden disuadir a la gente de su uso.

Para minimizar este inconveniente, sería posible aprovechar las subvenciones que el Gobierno de Baleares promueve para este tipo de instalaciones [27].

Por otra parte, las dos instalaciones propuestas cuentan con sistemas de acumulación de energía – baterías (1000 Ah) y un depósito acumulador de agua (150 litros), en el caso 1; y un depósito acumulador de agua (950 litros), en el caso 2 -. Por tanto sería posible beneficiarse de una tarifa nocturna [23], a fin de acumular energía durante las horas valle para consumirla durante las horas pico. Evidentemente, la capacidad de acumulación de energía debería ser mayor puesto que habría un mayor desfase entre la acumulación de energía y su consumo.

Por último, y en relación a la instalación fotovoltaica del caso 1, la siguiente posibilidad sería interesante en el marco de la ley española actual [19]. Sería posible inyectar la energía producida por la instalación fotovoltaica para venderla a la compañía que operase la red en particular. El precio de venta sería 0,321967 €/kWh (precio de venta para instalaciones de menos de 20 kW ubicadas sobre cubierta [29]). Una instalación paralela se encargaría de cubrir la demanda de energía de la vivienda.

La energía sería vertida a la red, independientemente del consumo, y la instalación de baterías ya no sería necesaria, reduciendo los gastos de inversión y mantenimiento. Esta opción conlleva cubrir todo el consumo energético a partir de la red y exige cumplir con los requisitos para inyectar energía, los cuales vienen fijados por la compañías eléctricas que la gestionan [32] y por la Administración [29].

7.4. Conclusión general

La conclusión que puede extraerse de este trabajo es que la instalación óptima desde el punto de vista energético para este caso concreto quizá provenga de una combinación de las dos instalaciones propuestas.

La instalación térmica del caso 2 produce más energía por metro cuadrado y tiene una eficiencia mayor (ver **Anexo 1, table 6.1** y **table 6.5**). En el caso 1, el rendimiento de los paneles fotovoltaicos corrientes es muy pobre y perjudica el rendimiento del resto de la instalación. Por otra parte, el uso de la bomba de calor en el caso 1 conlleva consumos de energía auxiliar muy inferiores al del caso 2.

La solución ecléctica que surge consistiría en una instalación de colectores térmicos planos con un depósito acumulador, similares a la del caso 2. Se prescindiría de este modo de la instalación de baterías. La diferencia estribaría en la fuente de energía auxiliar. En vez de utilizar la energía eléctrica directamente, se podría realizar el calentamiento del agua del acumulador mediante una bomba de calor. En los meses cálidos el apoyo de la bomba de calor ya no sería necesario. Para la refrigeración en verano, el uso de la máquina de adsorción seguiría siendo válido a pesar de que se debería estudiar la posibilidad de instalar un máquina de menores dimensiones.

El análisis económico de la instalación, que puede denominarse 'caso 3' sería el siguiente:

El coste de inversión sería el mismo que el del caso 2, añadiendo la bomba de calor:

$$B_{0,3} = 33695 + 2200 = 35895 \text{ €}$$

Sumando los intereses bancarios, $j = 5 \%$, los costes de inversión serían

$$B_{0,3} \cdot \left(1 + \frac{j}{100}\right)^{20} = 92240 \text{ €}$$

Se ha hecho un cálculo del coste de operación anual. En este caso, la energía auxiliar sería la misma que en el caso 2, dividida por el COP de la bomba, que sería el mismo que el del caso 1, y por el rendimiento de transferencia de calor dentro del acumulador. A todo ello habría que sumar el consumo de los electrodomésticos

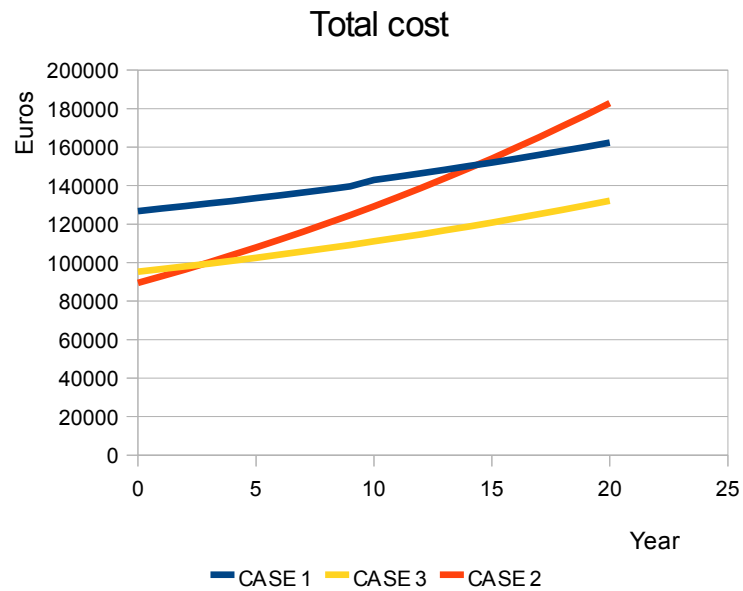
$$E_{aux,3} = \frac{Q_{aux,ads}}{COP \cdot \eta_{inter}} + E_{appliances} \quad (7.1)$$

Asumiendo los mismos costes de energía de antes, los costes de operación serían

$$B_{op, case3} = \sum_{year} b_{j, case3} = 1134.9 \text{ € / year} \quad (7.2)$$

que serían muy similares a los del caso 1.

La gráfica 7.1 muestra los costes de las 3 instalaciones propuestas.



Esta opción es compatible con el uso de otras fuentes alternativas de energía auxiliar como se indicaba en el apartado 7.2, así como con el uso de una tarifa nocturna, como se indica en el apartado 3.