

Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial
Curso 2011/2012

Procedimientos de dimensionado y análisis económico de diferentes sistemas de generación de energía térmica en el sector residencial.

Autor: Miguel Ángel Asensio Álvarez

Director: Javier Ballester Castañer

Laboratorio de Combustión Industrial (LCI)

Área de Mecánica de Fluidos

Departamento de Ciencia y Tecnología de Materiales y Fluidos

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza

Zaragoza, Marzo de 2012



Agradecimientos

A mis padres -a quienes debo todo- y a mi hermana, por apoyarme siempre, por ayudarme en todo lo que necesito, y por ser como son. Porque sin ellos nada hubiera sido posible. Gracias a toda mi familia en general, que siempre muestran interés en mí.

Gracias también de manera especial a mi director de proyecto, Javier Ballester, por su dedicación, por su paciencia y humildad, y porque siempre, por más cosas que tenga que hacer, encuentra tiempo para ayudarme.

No quiero olvidarme tampoco de mis compañeros del LIFTEC, con quienes he compartido esta experiencia. Gracias por su trabajo y por su ayuda siempre que hace falta. Pero también por su amabilidad y buen humor, y por el buen ambiente del centro que hace que los lunes, como hoy, sean menos lunes.

Gracias a quienes han sido mis compañeros en la carrera, con quienes he compartido situaciones de apuro y de nervios, pero también grandes momentos. También a mis compañeros de piso, por estar siempre ahí y ayudarme a levantar el ánimo en días en que las cosas no salen como espero. Y a mis amigos en general, por multiplicar las alegrías y dividir las penas.

Y, por supuesto, gracias a Dios.

Miguel Ángel Asensio. Zaragoza, Marzo de 2012

RESUMEN

Procedimientos de dimensionado y análisis económico de diferentes sistemas de generación de energía térmica en el sector residencial.

Este proyecto se centra en el análisis comparativo de diferentes sistemas de abastecimiento de energía térmica en el sector residencial. En concreto, para producir de agua caliente sanitaria, se compara por un lado la energía solar con la microgeneración, y por otro el apoyo individual frente al colectivo. Para climatización, se comparan las bombas de calor eléctricas con las bombas a gas, sabiendo que en el primer caso deben instalarse además placas solares para obtener una energía para agua caliente que en el segundo caso es aportada por el calor residual del motor de la bomba.

El objetivo del presente proyecto es, en primer lugar, establecer criterios de dimensionado de los diferentes equipos analizados tras revisar la bibliografía existente. Y, en segundo lugar, comparar bajo puntos de vista técnicos, económicos y ambientales las tecnologías citadas en cada caso, así como comprobar la manera en que factores como el tamaño del edificio o la climatología pueden influir en los resultados.

Como introducción al problema, se presentan los aspectos legales a tener en cuenta, y se explican las características fundamentales de las diferentes tecnologías tratadas en el análisis.

A continuación, y como respuesta al primer objetivo planteado, se establecen los procedimientos seguidos para el dimensionado y análisis energético de las diferentes tecnologías empleadas.

En tercer lugar, se presentan los edificios a analizar, y se resumen las características e hipótesis más importantes del procedimiento empleado para el cálculo de demandas en cada caso. También se incluyen las predicciones de demandas térmicas de los edificios analizados en cada ubicación, las cuales han sido calculadas mediante el software Energy Plus.

Finalmente se estudia el comportamiento técnico, económico y medioambiental de las diferentes tecnologías en bloques de viviendas. Para que los resultados sean generalizables, el análisis se realiza para bloques de viviendas con diferentes tamaños y ubicados en diferentes zonas climáticas españolas. También se valora la sensibilidad de los resultados respecto a algunos factores externos que podrían variar durante la vida de las instalaciones.

Como resultado del trabajo realizado, la comparación entre los diferentes equipos bajo diversos puntos de vista establece una idea sobre lo adecuado que puede ser el uso de un determinado sistema de climatización. Si bien cada bloque de viviendas presenta unas peculiaridades que darán un mayor peso a un criterio o a otro, el análisis llevado a cabo ayuda a realizar la valoración, al presentar las ventajas e inconvenientes de cada tecnología.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos y alcance del proyecto	1
1.2. Contenido de la memoria.....	2
2. NORMATIVA	5
2.1. Introducción	5
2.2. El Código Técnico de la Edificación	5
2.3. El Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios	7
2.4. El Real Decreto 661/2007.....	8
2.5. La escala de calificación energética para edificios de nueva construcción.....	10
3. TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS	11
3.1. Introducción	11
3.2. Energía solar	11
3.3. Microgeneración	14
3.4. Las calderas	16
3.5. Las bombas de calor	17
3.5.1. <i>Las bombas de calor eléctricas</i>	17
3.5.2. <i>Las bombas de calor a gas</i>	20
4. METODOLOGÍA DE CÁLCULO	23
4.1. Introducción	23
4.2. Análisis económico.....	23
4.3. Equipo solar.....	26
4.4. Microgeneración	26
4.5. Calentadores individuales a gas	28
4.6. Caldera centralizada.....	28
4.7. Bomba de calor eléctrica.....	30
4.8. Bomba de calor a gas	31
5. CASOS DE ESTUDIO	35
5.1. Introducción	35
5.2. Definición de casos.....	35
5.3. Demandas de agua caliente sanitaria	36
5.4. Demandas de climatización.....	37
5.4.1. <i>Método de cálculo</i>	37
5.4.2. <i>Parámetros utilizados en las simulaciones</i>	38
5.4.3. <i>Resultados obtenidos</i>	40
6. ANÁLISIS COMPARATIVO DE INSTALACIONES DE ABASTECIMIENTO DE ACS	47
6.1. Introducción	47
6.2. Comparación técnica.....	47
6.3. Comparación económica.....	48
6.3.1. <i>Dimensionado para un caso concreto</i>	48
6.3.2. <i>Análisis de sensibilidad</i>	53
6.4. Comparación ambiental	58

7. ANÁLISIS COMPARATIVO DE INSTALACIONES DE ABASTECIMIENTO DE ACS MÁS CLIMATIZACIÓN	61
7.1. Introducción	61
7.2. Comparación técnica.....	61
7.3. Comparación económica.....	62
7.3.1. <i>Dimensionado para un caso concreto</i>	62
7.3.2. <i>Análisis de sensibilidad</i>	66
7.4. Comparación ambiental	69
8. CONCLUSIONES	71
BIBLIOGRAFÍA.....	73
DESCRIPCIÓN DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS	79
A.1. La energía solar	79
A.2. La cogeneración	89
A.3. Las calderas	94
A.4. Las bombas de calor	100
DATOS DE EQUIPOS.....	109
B.1. Los colectores solares	109
B.2. El equipo de microgeneración.....	110
B.3. Los calentadores individuales a gas	111
B.4. Las calderas colectivas de ACS	111
B.5. Las bombas de calor eléctricas.....	112
B.6. Las bombas de calor a gas.....	112
B.7. Los depósitos acumuladores.....	112
B.8. Los intercambiadores de calor	114
SIMULACIÓN ENERGÉTICA DE EDIFICIOS	117
C.1. El programa de simulación.....	117
C.2. Las hipótesis de la simulación	120
C.3. Resultados obtenidos.....	123
BALANCE ECONÓMICO	127
D.1. Inversión inicial.....	127
D.2. Coste anual.....	132
OTROS RESULTADOS DEL ANÁLISIS	135
E.1. Análisis comparativo de sistemas de producción de ACS	135
E.2. Análisis comparativo de sistemas de producción de climatización	143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zonas climáticas de acuerdo con el CTE	6
Figura 2. Partes de un colector solar	12
Figura 3. Ahorro de energía primaria de los procesos de microgeneración	15
Figura 4. Funcionamiento de una bomba de calor en modo calefacción	18
Figura 5. Funcionamiento de una bomba de calor en modo refrigeración	19
Figura 6. Factores que influyen sobre el importe a percibir por la venta de electricidad en régimen especial	27
Figura 7. Análisis horario del flujo de agua caliente	33
Figura 8. Perfil diario de la demanda de ACS	37
Figura 9. Flujo de calor en cada hora	38
Figura 10. Distribución interior de cada vivienda	39
Figura 11. Perfil de climatización anual para La Coruña (caso de 5 plantas)	41
Figura 12. Perfil de climatización anual para Madrid (caso de 5 plantas)	42
Figura 13. Perfil de climatización anual para Valencia (caso de 5 plantas)	43
Figura 14. Perfil de climatización anual para Málaga (caso de 5 plantas)	44
Figura 15. Comparación de demandas anuales para los bloques de 5 plantas	44
Figura 16. Comparación de potencias para los bloques de 5 plantas	45
Figura 17. Coste total anual de ACS por persona en bloques de 1 dormitorio por vivienda en Salamanca	54
Figura 18. Coste total anual de ACS por persona en bloques de 2 dormitorios por vivienda en Salamanca	54
Figura 19. Coste total anual de ACS por persona en bloques de 4 dormitorios por vivienda en Salamanca	55
Figura 20. Coste total anual de ACS por persona en bloques de 4 dormitorios por vivienda en La Coruña	56
Figura 21. Coste total anual de ACS por persona en bloques de 4 dormitorios por vivienda en Sevilla	56
Figura 22. Consecuencias de no disponer de la tarifa del régimen especial en bloques de 6 ocupantes por vivienda de Salamanca	57
Figura 23. Coste total anual de ACS + climatización por persona en Valencia	66
Figura 24. Coste total anual de ACS + climatización por persona en La Coruña	67
Figura 25. Coste total anual de ACS + climatización por persona en Madrid	67
Figura 26. Coste total anual de ACS + climatización por persona en Málaga	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Número de ocupantes en función del número de dormitorios	6
Tabla 2. Porcentaje de cobertura exigida en el caso general	7
Tabla 3. Porcentaje de cobertura exigida en caso de apoyo por efecto Joule	7
Tabla 4. Partidas a considerar para la inversión inicial	25
Tabla 5. Partidas a considerar para el coste anual	25
Tabla 6. Potencia del calentador a instalar en una vivienda	28
Tabla 7. Características del edificio.....	39
Tabla 8. Características de la climatización	40
Tabla 9. Resultados de la simulación para La Coruña.....	40
Tabla 10. Resultados de la simulación para Madrid	41
Tabla 11. Resultados de la simulación para Valencia	42
Tabla 12. Resultados de la simulación para Málaga	43
Tabla 13. Cobertura solar mensual en el bloque de Salamanca.....	49
Tabla 14. Consumo de gas en cada una de las configuraciones	50
Tabla 15. Precio del gas natural	51
Tabla 16. Coste de la instalación para los casos de energía solar	51
Tabla 17. Coste de la instalación para los casos de microgeneración	52
Tabla 18. Emisiones anuales asociadas a las instalaciones de producción de ACS, suponiendo apoyo centralizado	59
Tabla 19. Cobertura solar mensual en el bloque de Valencia	62
Tabla 20. Comportamiento mensual de la bomba de calor eléctrica en Valencia	63
Tabla 21. Comportamiento mensual de la bomba de calor a gas en Valencia	64
Tabla 22. Coste de la instalación de climatización.....	65
Tabla 23. Emisiones anuales asociadas a las instalaciones de producción de climatización	69

RELACIÓN DE ABREVIATURAS

ACS	Agua caliente sanitaria
CO₂	Dióxido de carbono
COP	Coeficiente de operación de una bomba de calor (rendimiento en modo calor)
CTE	Código técnico de la edificación
EER	Ratio de eficiencia (<i>Energy Efficiency Ratio</i>) de una bomba de calor (rendimiento en modo frío)
F_{Rn}	Factor de eficiencia óptica de un colector solar
$F_R U_L$	Coeficiente global de pérdidas de un colector solar, en W/(m ² K)
HE	Documento básico de ahorro y energía del código técnico de la edificación
i	Tasa de actualización anual
IDAE	Instituto para la diversificación y ahorro de la energía
IPC	Índice de precios de consumo
LIFTEC	Laboratorio de investigación en fluidodinámica y tecnologías de la combustión
PCI	Poder calorífico inferior de un combustible
PCS	Poder calorífico superior de un combustible
PES	Ahorro de energía primaria (<i>Primary Energy Savings</i>) obtenido gracias a la cogeneración
PLEYADE	Predicción y análisis de demandas energéticas (programa de cálculo de demandas por simulación horaria)
REE	Rendimiento eléctrico equivalente de un equipo de cogeneración
RITE	Reglamento de instalaciones térmicas de los edificios
TUR	Tarifa de último recurso

1. Introducción

1.1. Objetivos y alcance del proyecto

En la actualidad, existe un creciente interés en disminuir el empleo de combustibles fósiles y aumentar la eficiencia de los procesos de abastecimiento de necesidades energéticas. El temor al inminente cambio climático –cuyos primeros efectos ya se están haciendo notar- está jugando su papel en los objetivos de una sociedad que busca la manera de emitir menos CO₂. Como también busca una mayor independencia de las fuentes energéticas procedentes del exterior. Si a esto le añadimos que la reserva de combustibles fósiles es limitada, y que a medida que se vaya agotando se producirá un aumento de precios, parece evidente que la búsqueda de soluciones alternativas y más eficientes no es sólo deseable sino una necesidad.

De acuerdo con [1], el consumo energético en los hogares constituye en España alrededor del 17% del consumo de energía total. De este porcentaje, más de las dos terceras partes están destinadas a abastecer las necesidades de climatización y de Agua Caliente Sanitaria (ACS) de las viviendas. Por tanto, existe aquí una importante posibilidad de actuación en dos frentes distintos: por un lado, actuar sobre la demanda, promoviendo edificios más eficientes y mejor aislados, así como un uso adecuado por parte de los usuarios; por otro, promover sistemas de climatización alternativos y eficientes, que son los que se estudian en este proyecto.

El objetivo planteado para este proyecto es el análisis de distintas soluciones de suministro energético en el sector residencial. Para ello, se ha realizado un estudio comparativo, para distintos tipos de edificio y en diferentes climatologías españolas, sobre varias maneras de abastecer las demandas de los usuarios. Por una parte, se compara la producción de ACS mediante placas solares frente a instalaciones de microgeneración, analizando también el tipo de apoyo (individual o colectivo) más conveniente. Por otra parte, se estudia la climatización mediante bomba de calor a gas y mediante bomba eléctrica, teniendo en cuenta las ventajas e inconvenientes de cada una. La comparación se realiza desde los puntos de vista técnico, ambiental y económico, aunque sólo este último se trata de manera cuantitativa detallada.

Para llevar a cabo el análisis adecuadamente, el primer paso consiste en revisar la normativa al respecto, que constituye el marco al cual deben adaptarse las instalaciones. También se ha realizado una revisión exhaustiva en cuanto a los métodos utilizados habitualmente para dimensionar y analizar cada uno de estos equipos, con el fin de utilizarlos siempre que sea posible.

Entre las herramientas empleadas para el estudio, cabe destacar el programa informático PLEYADE de cálculo de demandas energéticas, al que se hará mención más adelante. Por su parte, el análisis económico se ha llevado a cabo programando las ecuaciones correspondientes en Excel, incluyendo subrutinas en Visual Basic para aplicaciones.

Este proyecto se ha realizado en el Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión (LIFTEC), en el marco del programa *Estudios y Proyectos de Promoción del Gas*, en colaboración con Gas Natural Fenosa. Dicho programa está orientado al análisis de soluciones energéticas a gas en bloques de nueva edificación, así como a la búsqueda de la eficiencia en los sistemas de abastecimiento energético.

1.2. Contenido de la memoria

El objetivo final del proyecto consiste en establecer un estudio comparativo entre diferentes instalaciones de abastecimiento energético en el sector residencial. Con lo que la memoria del mismo, que tiene la función de presentar y analizar dicha comparación bajo diferentes puntos de vista, se estructura en los siguientes apartados:

- **Capítulo 1: Introducción.** En él se presenta brevemente el proyecto, junto con su contexto, su contenido y su alcance.
- **Capítulo 2: Normativa.** En este capítulo se analiza el marco legal en el que se mueve el proyecto, comentando los principales requisitos que ha de tener toda instalación energética en el sector residencial y mostrando el modo en que dicha normativa afecta al proyecto.
- **Capítulo 3: Tecnologías energéticas.** En él se explican las diferentes tecnologías que se estudian en el proyecto, mostrando sus características más importantes y resumiendo su patrón de funcionamiento.
- **Capítulo 4: Metodología de cálculo.** Este apartado hace referencia a los procedimientos empleados para el análisis de las diferentes instalaciones que componen la comparación. Estos procedimientos se refieren tanto al dimensionado de los equipos como al análisis energético. También se da una breve explicación de las diferentes partidas que componen el balance económico.
- **Capítulo 5: Casos de estudio.** En primer lugar, se enuncian los diferentes casos que se estudian en el proyecto. A continuación se comentan los métodos empleados para el cálculo de demandas, tanto de climatización como de ACS,

comentando las principales hipótesis tomadas. También se realiza una introducción al programa de simulación PLEYADE. Por último, se muestran los resultados tipo para un conjunto representativo de casos.

- **Capítulo 6: Análisis comparativo de instalaciones de abastecimiento de ACS.** En este apartado se realiza la evaluación técnica, económica y ambiental entre la energía solar y la microgeneración para el abastecimiento de la demanda de agua caliente en diferentes bloques de viviendas en ciudades de distintas zonas climáticas del territorio español. También se compara el sistema de apoyo individual con el centralizado.
- **Capítulo 7: Análisis comparativo de instalaciones de abastecimiento de ACS más climatización.** Ahora se establece una comparación entre las bombas de calor eléctricas y las bombas de calor a gas para cubrir la demanda energética de climatización en bloques de diferentes tamaños para ciudades representativas de las climatologías existentes en España. En el caso de la bomba de calor a gas, el calor residual puede ser aprovechado para abastecer las necesidades de ACS; con la bomba eléctrica estas necesidades se deben cubrir mediante placas solares.
- **Capítulo 8: Conclusiones.** En este apartado se muestra un resumen de los aspectos más importantes aprendidos durante el desarrollo del proyecto. También se evalúa y valora críticamente el trabajo.
- **Bibliografía.** Aquí se enumeran las fuentes de información empleadas.

Los siguientes anexos contienen una descripción más extensa y detallada de algunos de los apartados de la memoria:

- **Anexo A: Descripción de las diferentes tecnologías.** Este anexo es una ampliación del capítulo 3, en el que se muestran de manera más extensa los diferentes tipos de equipos empleados en el proyecto. Es un resumen del material bibliográfico consultado para el conocimiento de las tecnologías analizadas.
- **Anexo B: Datos de equipos.** Tras realizar una búsqueda y selección entre distintos suministradores, aquí se muestran los equipos concretos que se han utilizado para llevar a cabo el dimensionado.

- **Anexo C: Simulación energética de edificios.** Es una ampliación del capítulo 5, tanto en lo referente a PLEYADE como en los resultados obtenidos a partir de las simulaciones.
- **Anexo D: Balance económico.** Como explicación más amplia de la forma de estimar las diferentes partidas que componen el análisis económico, este anexo describe el procedimiento empleado para el cálculo del coste de los componentes de cada instalación.
- **Anexo E: Otros resultados del análisis.** Es una ampliación de los capítulos 6 y 7, ya que contiene algunos resultados del análisis económico que no aparecen en los mismos.

2. Normativa

2.1. Introducción

El diseño de instalaciones de abastecimiento de energía en viviendas está muy condicionado por la normativa vigente.

En este capítulo se resumen los principales requisitos que deben cumplir estas instalaciones y que, por tanto, se han tenido en cuenta en la elaboración del proyecto. El documento más importante en lo que se refiere al abastecimiento energético de viviendas de nueva construcción es el Código Técnico de la Edificación (CTE) [2], concretamente en su sección HE de ahorro energético. El Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE) [3] complementa la actuación del CTE en algunos sentidos. Por otro lado, el Real Decreto 661/2007 [4] se ha tenido muy en cuenta para la microgeneración, ya que regula el precio de venta de la electricidad. Por último, es conveniente hacer referencia a la escala de calificación energética para edificios de nueva construcción [5].

2.2. El Código Técnico de la Edificación

El Código Técnico de la Edificación, CTE, establece los requisitos que deben cumplir los edificios de nueva construcción. La actual versión es del año 2006, aunque con alguna pequeña modificación posterior. A este proyecto le afecta la parte de ahorro energético HE, especialmente el HE4, referente al agua caliente sanitaria.

Desde la entrada en vigor del presente CTE, todos los edificios de nueva construcción, así como las obras de rehabilitación de los edificios ya existentes, deben abastecer un determinado porcentaje de sus necesidades energéticas para ACS a partir de energía solar.

Este grado de cobertura exigido para cada caso en concreto depende de 3 factores:

- La zona climática considerada. En función de la radiación recibida por metro cuadrado a lo largo del año, se distinguen cinco zonas climáticas. Las exigencias son mayores para lugares con una gran radiación que en zonas donde es frecuente el cielo nublado, como ocurre en el norte del país. En la figura 1 se muestra el mapa que recoge la división de España en zonas climáticas.

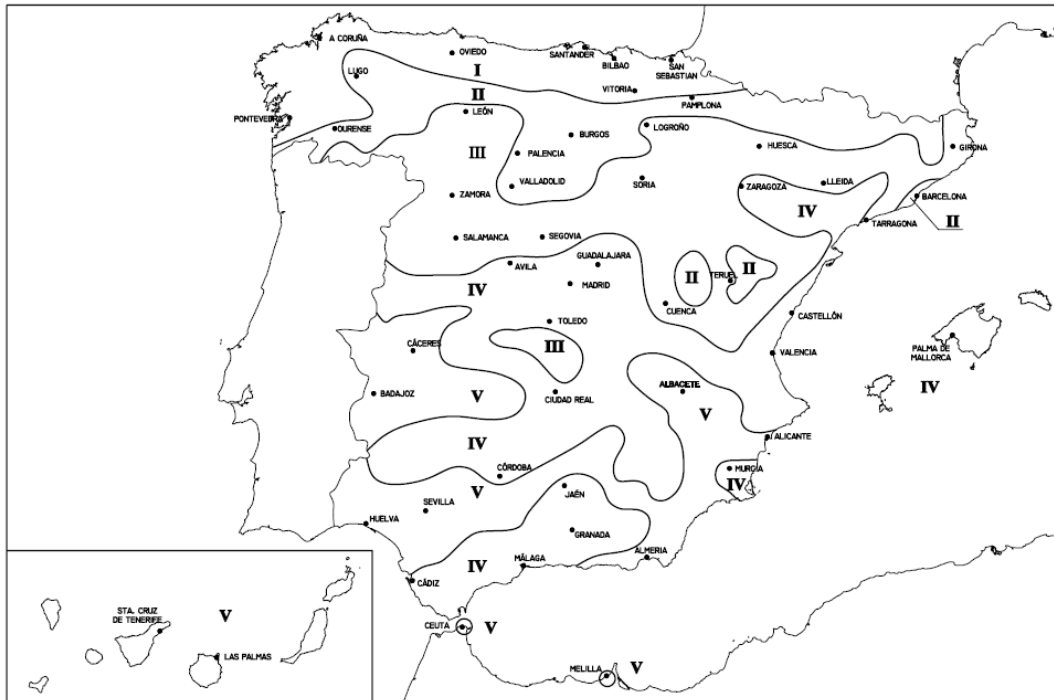


Figura 1. Zonas climáticas de acuerdo con el CTE

- El consumo del edificio. Para edificios grandes, la normativa obliga a cubrir un mayor porcentaje de demanda que en el caso de edificios pequeños.
- La fuente de energía auxiliar. Por norma general, el calentamiento a partir de electricidad por efecto Joule es menos eficiente (y por tanto más contaminante) que las calderas de gasóleo o gas natural. Para compensar este desequilibrio, se exige una mayor cobertura cuando el apoyo es por efecto Joule que en el caso de utilizar calderas tradicionales.

Aparte de esto, en algunos lugares, existen también normativas regionales u ordenanzas municipales, que pueden ser más exigentes que los requisitos del CTE.

Para estimar la demanda existente en cada edificio, el CTE establece un valor mínimo de ocupación por vivienda en función del número de habitaciones de cada una de ellas, tal y como se detalla en la tabla 1. Cada persona consume 22 litros a 60°C al día en caso de viviendas multifamiliares.

Dormitorios	1	2	3	4	5	6	7	Más de 7
Personas	1,5	3	4	6	7	8	9	Nº de dormitorios

Tabla 1. Número de ocupantes en función del número de dormitorios

Por su parte, en las tablas 2 y 3 se muestra el porcentaje de cobertura exigido en el caso general, y de apoyo por efecto Joule, respectivamente.

Demanda del edificio (l/día)	Cobertura (%) en la zona climática				
	I	II	III	IV	V
50-5000	30	30	50	60	70
5000-6000	30	30	55	65	70
6000-7000	30	35	61	70	70
7000-8000	30	45	63	70	70
8000-9000	30	52	65	70	70
9000-10000	30	55	70	70	70
10000-12500	30	65	70	70	70
12500-15000	30	70	70	70	70
15000-17500	35	70	70	70	70
17500-20000	45	70	70	70	70
>20000	52	70	70	70	70

Tabla 2. Porcentaje de cobertura exigida en el caso general

Demanda del edificio (l/día)	Cobertura (%) en la zona climática				
	I	II	III	IV	V
50-1000	50	60	70	70	70
1000-2000	50	63	70	70	70
2000-3000	50	66	70	70	70
3000-4000	51	69	70	70	70
4000-5000	58	70	70	70	70
5000-6000	62	70	70	70	70
>6000	70	70	70	70	70

Tabla 3. Porcentaje de cobertura exigida en caso de apoyo por efecto Joule

Debe añadirse que la normativa permite sustituir las placas solares por otras fuentes renovables o procesos residuales o cogeneración, siempre y cuando se alcance esta cobertura de ACS. Precisamente la viabilidad de dicha sustitución bajo diferentes puntos de vista constituye uno de los objetivos de este proyecto.

En el diseño de la instalación ha de primar el aprovechamiento de este tipo de energía eficiente frente a otros convencionales. Por este motivo, en el caso de que el apoyo sea con caldera centralizada, el acumulador de la energía renovable o residual ha de ser diferente al de la caldera.

2.3. El Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios

El RITE define las condiciones que deben reunir los equipos e instalaciones encargadas del abastecimiento energético, tanto en lo referente a la seguridad y la garantía de unas condiciones de confort como en ahorro y optimización de la energía.

La mayor parte del contenido del RITE hace referencia a las condiciones que deben cumplir los equipos, con lo que no afecta directamente al proyecto. Sin embargo, sí que existen algunos aspectos a tener en cuenta. Los principales se enumeran a continuación:

- El sistema de climatización debe garantizar el confort de los ocupantes de la vivienda. Pese a que el grado de confort y la satisfacción térmica son percepciones subjetivas, se pueden fijar como las condiciones de máximo confort unos 22°C en invierno y 24,5°C en verano, si bien no se debería ser tan exigente en la práctica por cuestiones de consumo.
- El dimensionado de los equipos de climatización se ha de realizar de manera que se puedan cubrir las necesidades de la hora de mayor demanda.
- Para evitar problemas de legionela, la temperatura de recirculación de agua caliente no puede ser inferior a 50°C, con lo que la temperatura del agua en el depósito ha de ser mayor.

2.4. El Real Decreto 661/2007

Esta norma regula la producción de electricidad, premiando a las empresas que utilizan fuentes renovables o procesos de alta eficiencia (cogeneración). La forma de premiarlas consiste en comprar la energía a un precio fijado o añadir una prima al precio del kilovatio hora en el mercado.

Entre los procesos que el real decreto etiqueta como tecnologías limpias o de alta eficiencia, el que tiene importancia para este proyecto es la cogeneración, que viene clasificado en el grupo (a) de la norma; concretamente el subgrupo a.1.1., ya que el combustible empleado es gas natural.

Las instalaciones acogidas al régimen especial tienen el derecho de vender a la red la energía producida, sin poseer ninguna obligación de autoconsumo. El único requisito es que el rendimiento eléctrico equivalente, REE, sea mayor que un 55%, de acuerdo con la siguiente definición de REE:

$$REE = \frac{E}{Q - \frac{V}{RefH}}$$

Siendo:

E: Energía eléctrica producida, en kWh.

Q: Energía térmica producida, en kWh.

V: Consumo de energía primaria, en kWh de poder calorífico inferior.

RefH: Valor de referencia del rendimiento para la producción separada de calor. De acuerdo con [6], su valor es 90%.

Para casos de cogeneración de menos de 50 kW de potencia eléctrica, llamada microcogeneración, la exigencia es menor, ya que sólo se requiere un REE de 49,5%.

A los efectos de justificar el cumplimiento del rendimiento eléctrico equivalente en la declaración anual, se utilizarán los parámetros Q, V y E acumulados durante dicho período.

En caso de no cumplir con el REE mínimo durante un año, la diferencia entre la electricidad generada durante ese año y la que se hubiese producido en caso de cumplir con el rendimiento eléctrico equivalente no percibirá prima. En caso de que ocurra más de un año, se podrá sancionar al usuario y retirarle los derechos de régimen especial.

Si se cumple con el REE exigido, se tiene derecho a percibir una cuota fija, que se actualiza con el tiempo, en función del crecimiento en el precio de los combustibles. Para el caso de cogeneración con gas natural y de potencias menores que 500 kW, de acuerdo con [7], el valor de la tarifa de venta es actualmente de 16,6694 c€/kWh.

Esta tarifa se percibe durante 10 años. A partir del undécimo, se reduce en un 17%, por considerarse que el motor comienza a estar anticuado.

También existe la posibilidad de diferenciar entre horarios, multiplicando este precio por 1,0462 durante el período punta (de 11 a 21 en verano y de 12 a 22 en invierno), y por 0,976 para el período valle (el resto del tiempo).

No obstante, una parte de esta tarifa debe pagarse al comercializador de último recurso por representación en el mercado. De acuerdo con [8], su valor es de 0,5 c€/kWh.

A la tarifa de venta es necesario añadirle un complemento por eficiencia, cuyo valor en c€/kWh producido viene dado por la siguiente relación:

$$Comp.Ef. = 1,1 * \left(\frac{1}{REE\ exigido} - \frac{1}{REE} \right) * Cmp$$

Donde Cmp es el precio del gas natural como materia prima, en c€/kWh de poder calorífico superior. Según [9], su valor actual es de 2,681635 c€/kWh.

También hay que tener en cuenta la energía reactiva producida, que puede penalizar o beneficiar. El factor de potencia se define como la energía activa producida entre la energía aparente. Si su valor es inferior a 0,9, se sufrirá una penalización de 0,248862 c€/kWh de energía eléctrica. Si por el contrario el factor de potencia es superior a 0,995, la bonificación obtenida será de 0,331816 c€/kWh.

Por otro lado, algunas subvenciones a la inversión en instalaciones de cogeneración requieren que sea clasificada como cogeneración de alta eficiencia. Para poder ser incluida en este apartado, tiene que existir un PES>10%, donde el parámetro PES (*Primary Energy Savings*) viene dado por:

$$PES = 1 - \frac{1}{\frac{Q}{V * RefH} + \frac{E}{V * RefE}}$$

Siendo RefE el rendimiento eléctrico de referencia para la producción separada de electricidad, que según [6], para el caso de gas natural con tensiones inferiores a 0,4 kV, tiene un valor de un 48,5625%.

Para microgeneración, basta con que el PES tenga un valor superior a 0 para ser reconocida como de alta eficiencia.

Recientemente, y debido a la situación de crisis económica, se ha decidido frenar temporalmente la concesión de primas y tarifas reguladas a las nuevas instalaciones de régimen especial. En el caso de la microgeneración, esto obliga a autoconsumir la energía producida. Debe ser una medida transitoria, pero afecta a la rentabilidad de los nuevos proyectos.

2.5. La escala de calificación energética para edificios de nueva construcción

Este documento, elaborado por IDAE, establece los criterios para calificar energéticamente un edificio, tanto en lo referente al consumo de energía primaria como a las emisiones. De este modo, si bien no impone unos requisitos de obligado cumplimiento, sí que se premia a los edificios más eficientes, pues un edificio con buena calificación energética es un edificio en el que se espera un consumo energético bajo, lo cual constituye un factor de venta importante.

Existen dos aspectos a calificar: la demanda energética del edificio y el consumo y emisiones del sistema de climatización. Ambos se califican con una letra, de la A a la F, siendo la A la más eficiente. La calificación se realiza para calefacción, para refrigeración y para agua caliente. Para ello, debe realizarse la simulación del edificio con programas informáticos como LIDER o CALENER.

3. Tecnologías energéticas

3.1. Introducción

Antes de plantear el análisis de las ventajas e inconvenientes que cada tipo de instalación presenta en una ubicación en concreto, resulta necesario hacer una breve explicación de las tecnologías de abastecimiento de energía consideradas en este trabajo. No se trata de realizar un análisis detallado de las particularidades de cada instalación, pero sí de revisar sus principales características.

A lo largo de este capítulo se presentan los equipos e instalaciones de energía solar, microgeneración, calderas de gas y bombas de calor. A su vez, estas últimas se subdividen en dos apartados: las eléctricas y las de gas. Pese a que su principio de funcionamiento es similar, presentan algunas diferencias importantes entre ellas.

En caso de que se quiera ampliar la información sobre alguna de estas tecnologías, en el anexo A vienen descritas de manera más detallada.

3.2. Energía solar

La energía solar constituye una posibilidad muy atractiva en la actualidad. Se trata de una tecnología madura y competitiva, que además se ve favorecida por las condiciones climáticas en un país como España, en que tanto las horas de sol como la energía radiante recibida son elevadas. Aparte de estas ventajas, su consideración preferente en la normativa actual ha motivado un uso generalizado en los últimos años.

El componente principal son los colectores solares térmicos, que se encargan de aprovechar la radiación del sol para calentar un fluido (generalmente agua). Su funcionamiento se basa en el efecto invernadero. Por tanto, el diseño de un captador solar ha de ser el adecuado para captar la máxima radiación posible, almacenarla y no perderla. En la figura 2 se muestra la composición de una placa solar de acuerdo con [10], con cada uno de sus elementos, que son los siguientes:

- Una caja exterior, aislada en las paredes y en el fondo, para evitar pérdidas de calor.
- Una cubierta transparente, situada en la cara frontal, que debe dejar pasar la mayor parte de radiación posible.

- Un absorbedor metálico, que transforma la radiación en energía térmica. Es frecuente aplicarle un tratamiento selectivo, de forma que tenga una elevada absorción de radiaciones de baja longitud de onda (como es la solar), y baja emisividad para ondas de alta longitud de onda, que es la radiación que emite el captador.

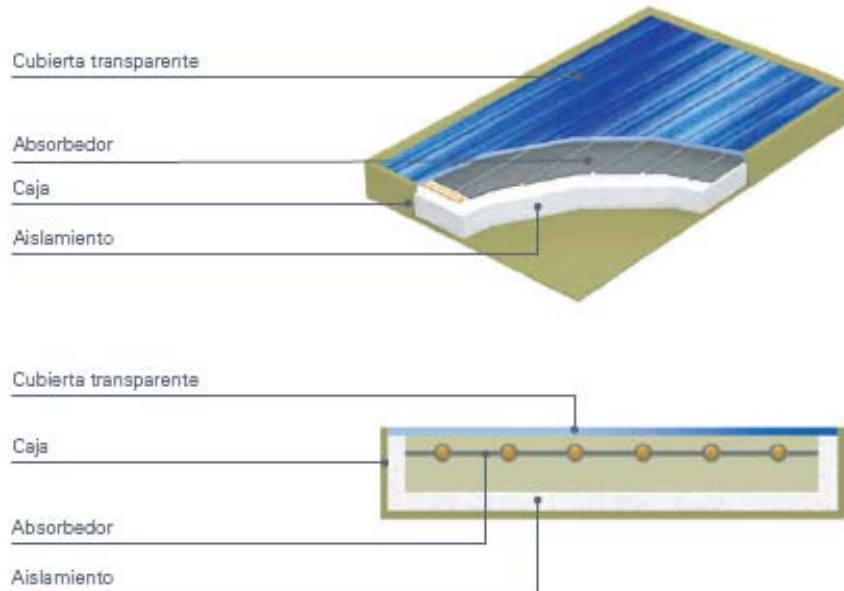


Figura 2. Partes de un colector solar

Por tanto, el rendimiento de un colector se ve favorecido para elevadas transmisibilidades de la superficie, mientras que se ve perjudicado por temperaturas exteriores bajas, que aumentan las pérdidas por convección. También temperaturas del agua de entrada al colector elevadas tienen un efecto negativo, ya que aumentan las pérdidas y disminuyen las ganancias.

La fórmula que relaciona el rendimiento de un colector solar es la siguiente:

$$\eta = F_{Rn} - F_R U_L \cdot \frac{(T_e - T_{amb})}{I}$$

Donde F_{Rn} es el factor de eficiencia óptica, que depende de la transmisibilidad de la cubierta y de la absortancia de la superficie metálica.

$F_R U_L$ es el coeficiente global de pérdidas, en $W/(m^2K)$.

I es la intensidad de la radiación incidente en el lugar, medida en W/m^2 .

T_e y T_{amb} son la temperatura de entrada del agua al captador y la temperatura ambiente, respectivamente, en grados centígrados.

Un problema importante en los climas con verano cálido es el sobrecalentamiento, que puede llegar a dañar el equipo de manera irreversible. Por este motivo, es importante disponer de sistemas automáticos de evacuación de calor.

Por otro lado, en zonas de invierno severo, el agua que circula por los colectores podría llegar a congelarse, expandiéndose y destrozando las tuberías. Así pues, en algunos emplazamientos se hace necesario añadir al agua una cierta cantidad de anticongelante. Esto hace que el agua que circula por los colectores no pueda ser consumida directamente, siendo necesario disponer de un intercambiador de calor que transmita la energía del agua que circula por los captadores a otro flujo. El circuito que va de los captadores al intercambiador se denomina circuito primario, mientras que el que aparece a partir del intercambiador es el circuito secundario.

El momento en que se demanda el agua caliente no tiene por qué coincidir (y de hecho no suele hacerlo) con el momento de consumo. Se hace necesario disponer de un sistema de almacenamiento de la energía. Este sistema es un depósito de agua caliente, que permite conservar la energía hasta el momento de su uso. Así, además, se puede almacenar el exceso de producción de un día muy soleado y aprovecharlo al día siguiente, si el cielo está nublado.

Puesto que la temperatura de entrada al colector solar influye en el rendimiento del mismo, es conveniente que ésta sea lo más baja posible. En este sentido, los depósitos estratificados, gracias a su diseño cuidadoso, contribuyen a separar el agua en dos capas: una de agua caliente y otra de agua fría. La primera es la que va hacia el consumo, mientras que la segunda intercambia calor con el flujo de entrada al colector. En el anexo A se explica más detalladamente el funcionamiento de estos tanques.

Pese a la existencia del acumulador de calor, hay momentos en los que, por acumulación de días nublados, la energía disponible es insuficiente para satisfacer la demanda. Y es que, por motivos económicos, resulta inviable dimensionar un equipo para cubrir toda la demanda. Por eso resulta imprescindible el apoyo de un sistema auxiliar de energía convencional, dando siempre prioridad para actuar al equipo solar.

Por su carácter más o menos constante a lo largo de todo el año, la demanda de agua caliente sanitaria resulta muy adecuada para ser abastecida por un equipo de energía solar. Más complicado es el tema de la calefacción, pues la demanda se concentra en los meses en los que menos sol hay. También existen sistemas que, combinados con máquinas de absorción, permiten utilizar la energía solar para la producción de frío, aunque todavía no están muy implantados.

3.3. Microcogeneración

La tecnología de la cogeneración constituye una manera eficiente de producción energética, aprovechada ya desde hace tiempo. Un porcentaje importante (y además creciente) de la energía empleada en España procede de procesos de cogeneración. En países como Alemania, el porcentaje es todavía mayor.

En un proceso de obtención de electricidad, una parte de la energía liberada en la combustión se transforma en energía mecánica, bien a través de un ciclo de vapor o bien por expansión directa de los gases, que en el alternador se convierte en energía eléctrica. Pero no es posible aprovechar toda la energía y una parte se pierde por el calor sensible de los humos, por radiación, por pérdidas mecánicas, etc. La magnitud de estas pérdidas depende del tipo de tecnología y del combustible, pero su valor no es nada despreciable. Así, las centrales térmicas tradicionales tienen un rendimiento de alrededor del 35%, y sólo las centrales de ciclo combinado de gas natural presentan rendimientos cercanos (e incluso algo superiores) al 50%.

Sin embargo, si se produce la electricidad en puntos donde existe una demanda térmica importante, resulta posible aprovechar el calor residual -que en otro caso se derrocharía- para abastecer las necesidades caloríficas. Obviamente, esto implica un mayor coste en la instalación, pero se ve compensado por un aprovechamiento energético más eficiente, y por el establecimiento de primas y tarifas reguladas para la electricidad producida mediante procesos de cogeneración, tal y como se recoge en la normativa vigente [3].

Cuando la potencia eléctrica instalada es menor que 50 kW, hablaríamos de microcogeneración. Éste es el caso de algunos motores que son instalados en bloques de viviendas. La electricidad producida puede ser utilizada en el propio bloque; sin embargo, con la normativa actual, es más rentable venderla a la tarifa regulada para estos casos. El calor de los gases de escape y del refrigerante del motor pueden ser empleados para abastecer las demandas de ACS y calefacción de los usuarios.

Otra de las ventajas que ofrece la microcogeneración es que la energía eléctrica se genera cerca del lugar de consumo. Esto contribuye a reducir las pérdidas por distribución eléctrica, ya que la distancia recorrida por la energía es mucho menor.

En la figura 3 se expresa esquemáticamente el ahorro de energía primaria que puede alcanzarse utilizando un proceso de cogeneración frente un sistema de producción de energía convencional a partir de un ciclo combinado de gas natural. El equipo de cogeneración utilizado es de la marca Dachs, un motor muy vendido en Europa y cuyos parámetros de rendimiento se han obtenido a partir de [11].

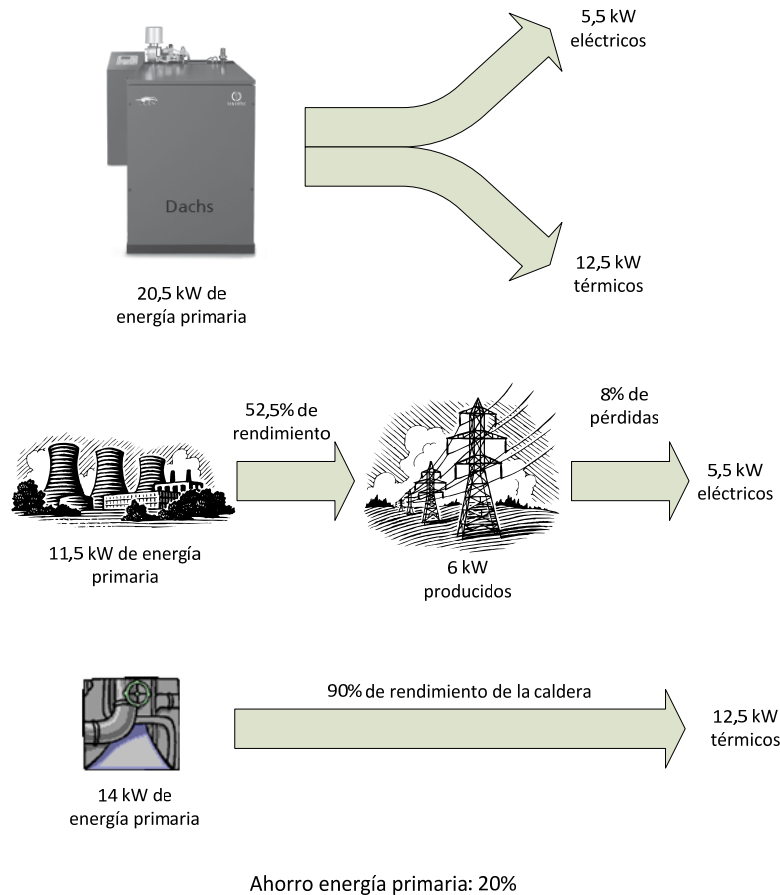


Figura 3. Ahorro de energía primaria de los procesos de microgeneración

En bloques de viviendas, el dimensionado del equipo de microgeneración se realiza a partir de la demanda térmica. No obstante, por cuestiones económicas, normalmente no se dimensiona el equipo para cubrir la potencia punta. Por este motivo es necesario el uso de un depósito acumulador que almacene la energía desde los momentos en que la demanda es baja hasta las horas de mayor consumo. Otra función del depósito es mantener una inercia mínima al motor, para evitar sus arranques y paradas continuos. Es importante garantizar una adecuada estratificación del depósito, para que el refrigerante entre al motor suficientemente frío y pueda cumplir su función. Aunque, por motivos económicos, resulta también precisa la instalación de un sistema auxiliar, mucho más barato, para ayudar a cubrir los picos de demanda.

La demanda de ACS resulta muy adecuada para ser abastecida con un motor de microgeneración, ya que permite al motor trabajar más o menos el mismo número de horas durante todas las épocas del año. En cambio, en el caso de la calefacción se puede diseñar para cubrir la base, aunque el equipo estará parado gran parte del año. No obstante, es posible añadir máquinas de absorción para transformar el calor en frío en los meses de verano, dando lugar a lo que se conoce como trigeneración, que permite ampliar significativamente el periodo de operación del motor.

3.4. Las calderas

Se trata de sistemas convencionales de producción de calor. Debido a su bajo coste y a su seguridad de uso, son equipos ampliamente utilizados, tanto en hogares como para abastecer demanda térmica en general.

En esencia, una caldera es un equipo en que se quema un combustible, dotado de un intercambiador donde el calor desprendido se transfiere a un fluido (aire o agua) para ser aprovechado posteriormente. Así pues, se trata de un equipo sencillo, con un principio de funcionamiento básico (pese a que cada vez son más sofisticadas en cuanto a diseño y a sus posibilidades de regulación). Esto se traduce en menores costes de adquisición, pero en un mayor consumo auxiliar frente a otros nuevos sistemas alternativos más eficientes.

En el caso de viviendas, pueden servir para abastecer demandas de calefacción, de agua caliente o ambas. Y pueden ser una por vivienda o tener una instalación común centralizada. Para agua caliente centralizada, es común el uso de un depósito de acumulación, que al mantener almacenada la energía permite conservar la producción de un momento a otro, y de este modo disminuir la potencia necesaria para la caldera. Esto no es así para calefacción, donde la inercia térmica de las tuberías suele ser suficiente para hacer innecesaria la presencia de un depósito de inercia. Tampoco son comunes los depósitos en instalaciones individuales.

Las calderas tradicionales presentan problemas si condensa agua en su interior. Por este motivo, la temperatura de los gases de escape tiene que ser elevada, aumentando las pérdidas. Este problema no existe en las calderas de baja temperatura, preparadas para soportar los condensados sin producirse problemas técnicos. Un paso más suponen las calderas de condensación, donde se aprovecha el calor de la condensación del agua para mejorar la producción térmica; es decir, no sólo no importa la condensación, sino que además se favorece, con el consiguiente aumento de la eficiencia.

En el anexo A se encuentra más información relativa a calderas, obtenida de las fuentes [12] y [13] .

3.5. Las bombas de calor

3.5.1. Las bombas de calor eléctricas

Las bombas de calor son sistemas de climatización que “bombean” el calor desde un foco frío hacia un foco caliente (es decir, en sentido contrario al de circulación en condiciones normales). Para ello, necesitan un aporte auxiliar de energía que permita modificar el sentido normal de la transferencia. Son los elementos empleados en aparatos de aire acondicionado y en frigoríficos.

Realmente, el intercambio de calor no se realiza directamente entre los dos focos, sino que se hace circular un fluido (generalmente en circuito cerrado), encargado de tomar el calor del foco frío y transmitirlo al caliente. Para que exista transferencia de calor entre un foco y el fluido debe darse una diferencia de temperatura entre ellos. Es decir, el fluido debe encontrarse a menor temperatura que el foco frío a su paso por él, y a mayor que el caliente en el momento en que intercambie energía con el mismo. Como el foco caliente tiene una temperatura más elevada que el frío, es necesario variar de alguna manera las propiedades del fluido con ayuda de algún elemento exterior. Generalmente, el elemento considerado es un compresor, que modifica las propiedades del fluido.

Pese a que el funcionamiento de la bomba es, a grandes rasgos, el mismo en todos los casos, se suele diferenciar si la utilidad se obtiene al absorber calor del foco frío o al cederlo al foco caliente. Así pues, si la bomba trabaja en modo calefacción, el foco caliente será el interior, mientras que el foco frío del cual obtiene el calor es el exterior. Si, por el contrario, la bomba trabaja en modo refrigeración, el local a enfriar será el foco frío, mientras que el ambiente exterior es el foco caliente.

La bomba se suele diseñar de manera que, al pasar por los focos, el refrigerante sufra un cambio de fase. De este modo, se mantiene su temperatura –y por tanto la transferencia de calor- constante; y lo que es más importante, se aprovecha el calor latente, asociado al cambio de fase, de valor elevado.

En la figura 4 se muestra el funcionamiento de una bomba de calor en modo calefacción. A grandes rasgos, el funcionamiento del ciclo es el siguiente:

- Para empezar, el refrigerante se encuentra en estado líquido y a una temperatura muy baja, más fría que la de fuera (punto 1). Por tanto, en su paso por el ambiente exterior lo que hace es absorber calor, evaporándose. La temperatura del fluido se mantiene prácticamente constante durante el cambio de fase.
- Una vez en estado vapor (punto 2), el refrigerante pasa por una válvula de 4 vías. Su única función consiste en cerrar el circuito adecuadamente según el

modo de funcionamiento de la bomba de calor, haciendo circular el fluido en el orden adecuado (hacia el punto 3).

- Posteriormente, el fluido se dirige hacia el compresor, que le aporta energía mecánica en forma de presión y de movimiento, (para llegar al punto 4). De este modo, aumenta la temperatura hasta valores mayores al que existe en el local, para poder calefactarlo. Además, el cambio de presión permite al refrigerante cambiar de fase a temperaturas cercanas a la que tiene en este momento.
- Tras pasar nuevamente por la válvula de 4 vías (punto 5), el fluido refrigerante cruza el condensador, que es el local a calefactar. Gracias a la energía ganada previamente, el fluido cede calor al local, condensándose y volviendo a alcanzar el estado líquido, sin variar prácticamente su temperatura (punto 6). Una parte de la energía cedida es la que ha sido aportada por el compresor; sin embargo, la mayor parte procede del intercambio que el refrigerante ha llevado a cabo previamente con el ambiente exterior.
- Por último, un expansor disminuye nuevamente la temperatura del fluido, sin suministrarle ni quitarle energía, hasta volver a alcanzar el estado termodinámico del que había partido, para empezar nuevamente el ciclo.

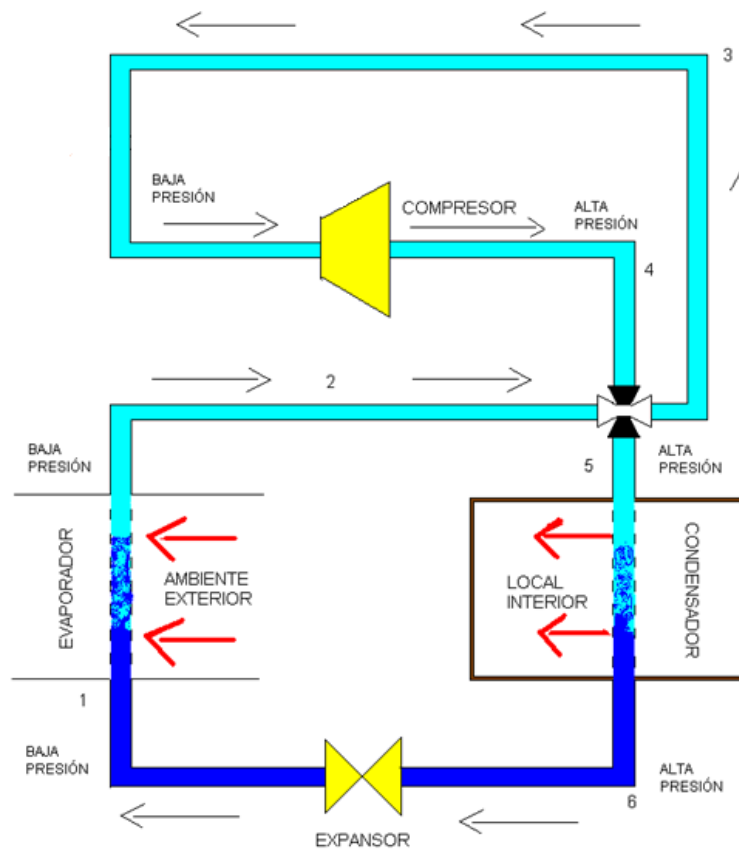


Figura 4. Funcionamiento de una bomba de calor en modo calefacción

En la figura 5 se muestra el mismo diagrama, pero aplicado a un funcionamiento en modo refrigeración (es decir, modificando la válvula de 4 vías).

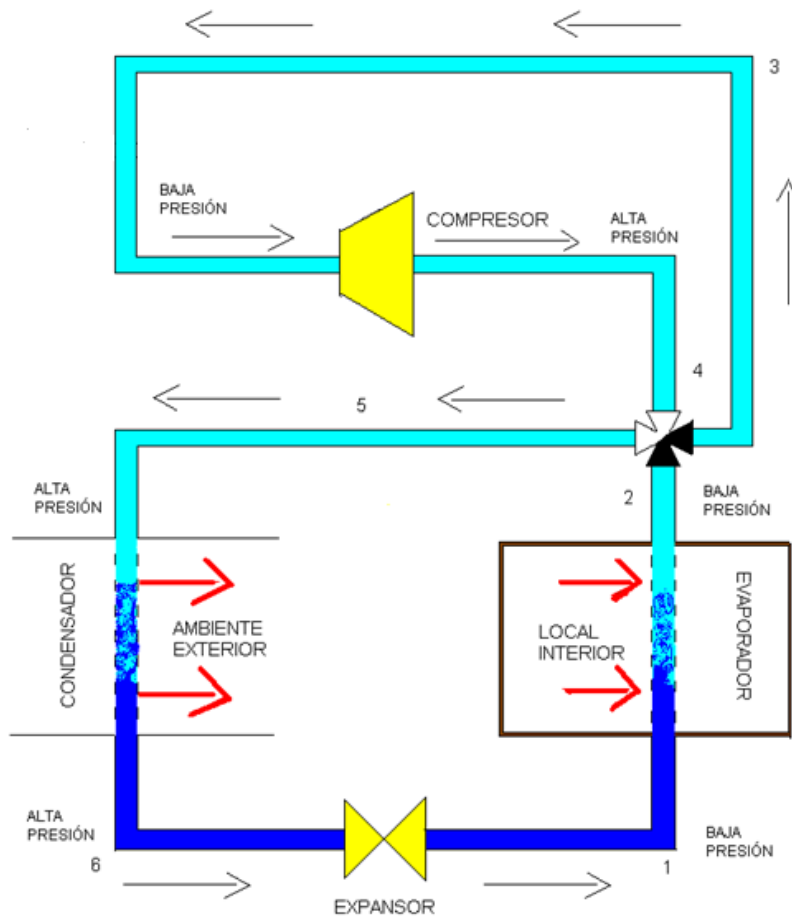


Figura 5. Funcionamiento de una bomba de calor en modo refrigeración

Para caracterizar el rendimiento de las bombas de calor en modo calefacción, se define el COP como la energía aprovechada para calefacción entre la energía eléctrica consumida; es decir:

$$COP = \frac{\text{Producción de calefacción}}{\text{Consumo eléctrico}}$$

En modo de refrigeración, el EER se define como la energía aprovechada para refrigeración entre el consumo eléctrico necesario para ello:

$$EER = \frac{\text{Producción de refrigeración}}{\text{Consumo eléctrico}}$$

En las bombas de calor tradicionales, el foco exterior es el aire. No obstante, últimamente están ganando mucho mercado las bombas de calor geotérmicas, con mejor rendimiento al absorber el calor del suelo, cuya temperatura es mucho más estable. También puede tomarse el calor de corrientes de agua.

Respecto al intercambio con el interior, una posibilidad consiste en realizarlo directamente con el aire; son lo que se conocer como bombas de expansión directa, presentes en la mayor parte de instalaciones individuales. No obstante, también resulta posible que el calor se transmita a una corriente de agua, que será la que después climatizará el local mediante un sistema de fan-coils. Esto es común en sistemas de bomba de calor centralizada por facilidad de medida, aunque, al tener que estar el agua en condiciones de temperatura más extremas que el ambiente interior, su rendimiento es algo menor que en los sistemas de expansión directa. En este modo de funcionamiento, es conveniente tener un acumulador de agua para evitar los continuos arranques y paradas.

El funcionamiento de una bomba de calor depende de la temperatura exterior. Para temperaturas más extremas –frías en invierno o cálidas en verano- disminuye la potencia que es capaz de suministrar la bomba, además de empeorar el rendimiento. En ciclo de invierno, además, si la temperatura exterior es menor de 7°C, se forma escarche en el evaporador de la bomba, siendo necesario invertir periódicamente el sentido de funcionamiento para eliminarlo. La consecuencia es una sensación de discomfort y una reducción de la potencia efectiva disponible. Por este motivo, las bombas de calor reversibles no se encuentran muy introducidas en las ciudades con invierno riguroso.

3.5.2. Las bombas de calor a gas

A grandes rasgos, su funcionamiento es el mismo que el de una bomba de calor eléctrica. La única diferencia radica en que la energía necesaria para accionar el compresor, en vez de ser energía eléctrica, se obtiene a partir de la combustión de gas natural. Para ello, es necesaria la presencia de un motor alternativo similar al de un coche que transforme la energía térmica de combustión en energía mecánica.

Las particularidades que presenta esta bomba de calor frente a la eléctrica son similares que las que tiene la cogeneración frente a la producción separada de calor y electricidad, ya que los gases que salen del motor lo hacen a una alta temperatura, siendo posible aprovechar su calor residual para la obtención de agua caliente, con ayuda de un acumulador de calor que la almacene.

El rendimiento de una bomba de calor a gas viene dado por las mismas relaciones que en las bombas eléctricas, pero considerando como energía consumida la del gas, y no la eléctrica. Es decir:

$$COP = \frac{\textit{Producción de calefacción}}{\textit{Consumo de gas}}$$

$$EER = \frac{\textit{Producción de refrigeración}}{\textit{Consumo de gas}}$$

Estos rendimientos son más bajos que los del caso eléctrico, pero parten de una fuente de energía mucho más barata y de calidad inferior.

Para temperaturas frías (por debajo de 7°C), la energía de los gases de escape es empleada para precalentamiento de los gases y para desescarche. De este modo, las prestaciones (tanto la potencia como la sensación de confort) se mantienen prácticamente constantes a esas temperaturas.

El principal inconveniente que presentan las bombas de calor a gas, por el que apenas se han introducido en el sector residencial, es su elevado coste, ya que prácticamente añaden a una bomba de calor eléctrica un motor de microgeneración.

4. Metodología de cálculo

4.1. Introducción

Una vez resumidas las diferentes tecnologías que se analizan en el proyecto, y tras mostrar los aspectos legales que es necesario tener en cuenta, en este apartado se resume la metodología de cálculo empleada para realizar el dimensionado y el análisis de la instalación. Se describe en más detalle la evaluación económica, que es un criterio cuantitativo utilizado para valorar las distintas soluciones. También se describe la forma de valorar el consumo energético en cada caso (y la producción de electricidad en el caso de la microgeneración), que da una idea de la eficiencia del sistema.

En primer lugar, se explica el procedimiento empleado para realizar el análisis económico. Posteriormente se muestra, para cada equipo, la manera de dimensionar y de estimar el consumo empleada en el proyecto. Los procedimientos responden a una elección final tras revisar los documentos existentes al respecto.

Los equipos comerciales concretos empleados para el dimensionado se pueden consultar en el anexo B.

4.2. Análisis económico

En los cálculos económicos, existen dos componentes a tener en cuenta: la inversión inicial, a realizar en el momento de construcción de las instalaciones; y el coste anual, que incluye los gastos debidos al mantenimiento del equipo y a los consumos de energía (gas, electricidad).

Dependiendo del caso en concreto, se podrá dar un mayor peso a uno o al otro. Sin embargo, es necesario establecer algún criterio objetivo para poder comparar la viabilidad de diferentes instalaciones. En otras palabras: es necesario combinar esos dos valores en un parámetro único. Y para ello, y puesto que la comparación se establecerá entre diferentes equipos pero con la misma demanda, el criterio escogido ha sido el coste total anual, que es la suma del coste anual asociado al uso del equipo más la parte proporcional de la inversión inicial asociada a cada año.

Para estimar la parte de la inversión asociada a cada año, se repartirá el coste inicial de cada instalación entre su vida útil, teniendo en cuenta la variación del valor del dinero a lo largo del tiempo.

La duración de cada equipo se estima de acuerdo con la referencia [14]. Así, por ejemplo, un equipo de energía solar tiene una duración mayor que un motor de microgeneración, por lo que, a igualdad de precios, le corresponderá una cuota anual menor.

Para el valor de la tasa de actualización, se utilizará un 7%, que es un índice empleado comúnmente. No obstante, hay que tener en cuenta también la inflación, que hace crecer los precios cada año. De acuerdo con [15], se prevé un crecimiento en el coste del gas natural de un 2,5% anual en los próximos años. Como, aproximadamente, este es el valor del IPC en los últimos 10 años, se considera una inflación general de un 2,5%.

De este modo, la tasa de actualización real valdrá:

$$(1 + i) * (1 + 0,025) = (1 + 0,07) \rightarrow i = 0,0439 = 4,39\%$$

Para interpretar los resultados que se obtengan, si por ejemplo se tiene un coste total anual de 10000 € en una instalación, significa que, al cabo de dos años, el dinero a pagar será:

$$10000 * (1 + 0,025)^2 = 10506,25 \text{ €}$$

No obstante, eso sería como pagar actualmente:

$$\frac{10506,25}{(1 + 0,07)^2} = 9176,57 \text{ €}$$

El mismo resultado que se hubiera obtenido haciendo directamente:

$$\frac{10000}{(1 + 0,0439)^2} = 9176,57 \text{ €}$$

En las tablas 4 y 5 se muestran, respectivamente, las partidas de la inversión inicial y el coste anual a considerar. Todas las partidas incluyen los costes por mano de obra. En cada caso habrá que escoger los apartados correspondientes, pues no todos existen en cada configuración.

Partida	Descripción
Equipo solar	Equipo diseñado para aprovechamiento de la energía solar
Sistema de microgeneración	Sistema de producción de energía mediante microgeneración
Sistema de caldera centralizada	Caldera más depósito para producción convencional de agua caliente centralizada
Sistema de calentadores individuales	Calentadores individuales para producción convencional de agua caliente
Sistema de distribución de ACS	Sistema de tuberías para llevar el agua caliente sanitaria a cada usuario
Bomba de calor eléctrica	Equipo eléctrico reversible para climatización por bomba de calor
Bomba de calor a gas	Equipo a gas reversible para climatización por bomba de calor
Sistema de distribución de climatización	Sistema de tuberías para llevar el agua de climatización a cada usuario
Sistema de fan-coils	Elementos encargados de climatizar en el interior de cada vivienda
Recepción de gas	Instalaciones destinadas a llevar el gas natural hasta los equipos
Evacuación de gases	Sistemas para evacuar al exterior los gases de combustión
Sala de calderas	Obras y documentación necesarios para disponer de una sala de calderas (protección anti-incendios, papeleo, ...)
Aumento de potencia eléctrica	Obras para aumentar la potencia disponible en un bloque de viviendas en caso de climatización eléctrica
Proyecto	Costes por la realización del proyecto
IVA	Impuesto sobre el valor añadido

Tabla 4. Partidas a considerar para la inversión inicial

Partida	Descripción
Consumo de gas	Costes (tanto fijos como variables) asociados al consumo de gas del edificio
Consumo eléctrico	Costes (tanto fijos como variables) asociados al consumo eléctrico del edificio, incluyendo el impuesto de la electricidad
Ingresos por venta de electricidad	Ingresos asociados a la venta de energía eléctrica por microgeneración
Mantenimiento	Dinero a pagar anualmente por el mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos e instalaciones
IVA	Impuesto sobre el valor añadido

Tabla 5. Partidas a considerar para el coste anual

4.3. Equipo solar

Para dimensionar el equipo solar y estimar su cobertura, se empleará el método f-chart, ampliamente conocido y utilizado para proyectar sistemas de colectores solares.

Se trata de un método estático, que a partir de unos pocos parámetros de entrada estima la cobertura obtenida. Para ello, se basa en unas curvas obtenidas mediante simulación horaria. A partir del número de colectores, de las características (rendimiento y superficie) de los mismos, del tamaño del depósito, de la demanda mensual y de los datos climáticos del lugar, se estima la cobertura alcanzada en cada mes a partir de unas expresiones. En el anexo A se explica el método más detenidamente, que, al igual que los parámetros climáticos necesarios para su aplicación, ha sido obtenido de [16].

Así pues, es necesario seguir un proceso iterativo. Se parte de un número de colectores. Y se van aumentando de 2 en 2 hasta cumplir con la cobertura. En el caso de equipos solares, por rentabilidad, el dimensionado se realiza alcanzando únicamente la cobertura mínima exigida. En cada paso, tal y como se recomienda en [10], el volumen del depósito, en litros, viene dado por la siguiente relación:

$$V \simeq 75 * S$$

Donde S es la superficie total de colectores instalados, en m².

Por su parte, y por requisitos de [2], la potencia del intercambiador de calor a instalar, en kW, viene relacionada también con la superficie total instalada a partir de:

$$Pt_{int} \geq 0,5 * S$$

Al aplicar el método, se obtiene el dimensionado del equipo y la cobertura, tanto de cada mes como anual. Obviamente, el equipo solar no consume gas. Lo que sí que conlleva es un coste anual es el mantenimiento, que se estima gracias a [14].

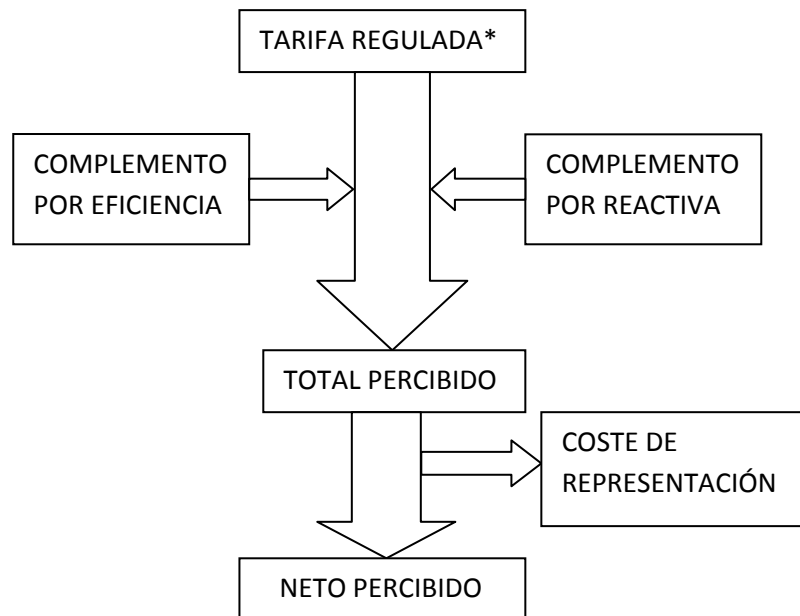
4.4. Microcogeneración

A diferencia del equipo solar, en el caso de la microcogeneración puede ser rentable dimensionar el equipo para alcanzar una cobertura mayor a la exigida por la legislación. De hecho, de acuerdo con [17], lo más rentable es dimensionar el equipo para cubrir prácticamente la totalidad de las necesidades.

Posiblemente, esto sería así si se pudiese ajustar infinitamente la potencia térmica. En la realidad, existen equipos concretos con potencias discretas, siendo el número de equipos a utilizar la única variable a resolver. Por tanto, simplemente se resolverá el número de motores más conveniente económicamente en cada caso.

El precio del depósito es muy inferior al del motor, con lo que debe dimensionarse de cara a aprovechar el máximo posible el equipo de cogeneración, aumentando sus horas de funcionamiento. Por ello, se dimensiona de manera que sea capaz de almacenar, aproximadamente, los litros demandados en un día. No obstante, en caso de que la producción del equipo de cogeneración en un día sea inferior a la demanda, bastaría con que el depósito tuviese la capacidad suficiente para mantener la producción diaria del motor o motores.

Para estimar el precio de cada unidad de potencia eléctrica producida, se tendrán en cuenta la tarifa en régimen especial, el complemento por eficiencia y el coste por representación en el mercado. Puesto que es lo que suele hacerse, se compensará la energía reactiva, obteniéndose también el complemento por este concepto. En la figura 6 se establece un diagrama con los aspectos a tener en cuenta. No se considera la discriminación horaria.



**Se reduce a partir de cierta antigüedad*

Figura 6. Factores que influyen sobre el importe a percibir por la venta de electricidad en régimen especial

Así pues, al diseñar la instalación se determina tanto la capacidad del motor como la cobertura de ACS. La energía producida para abastecer esa cobertura requiere un coste de gas natural que es necesario considerar en el apartado de coste anual. No obstante, también produce unos beneficios por venta de energía eléctrica –aunque de valor inferior al coste de gas- que hay que tener en cuenta; con lo que, en término neto, se obtiene una cantidad de calor útil a un coste reducido. Si a esto se le suma el coste de mantenimiento, estimado gracias a [14], se tiene el coste a pagar cada año.

4.5. Calentadores individuales a gas

A diferencia de los casos anteriores, en los que se dimensionaba en base a la demanda, los calentadores individuales a gas han de estar preparados para cubrir la potencia pico de agua caliente. Así pues, el proceso de cálculo de la potencia individual de ACS es a la vez el dimensionado del calentador.

Los caudales de los aparatos domésticos pueden consultarse en muchas guías. Más diversidad de opiniones existe en el tema de la simultaneidad a aplicar. Se ha decidido emplear los caudales y las recomendaciones recogidas en [18], junto con estimaciones razonables de los aparatos simultáneos que deben abastecerse en cada vivienda.

La tabla 6 indica, en función del número de dormitorios por vivienda –relacionados con la ocupación-, la potencia a instalar, así como los equipos a los que sería capaz de abastecer simultáneamente, para los casos analizados en el proyecto.

Dormitorios	Potencia (kW)	Caudal a 45°C (l/min)	Equipos simultáneos
1	18,5	7,5	Ducha
2	22	9	Ducha + lavabo/Bañera
3	27,5	11,25	Ducha + fregadero

Tabla 6. Potencia del calentador a instalar en una vivienda

El consumo de gas del equipo se puede calcular sabiendo que el calentador debe abastecer la parte de la demanda que no cubra el equipo de energía alternativa, y que el rendimiento que aparece en los catálogos es el instantáneo nominal. A lo largo de un periodo amplio de tiempo, motivos como las cargas parciales hacen que el rendimiento estacional sea diferente. De acuerdo con [19], el rendimiento estacional es un 98% del rendimiento nominal para estos equipos. Por su parte, al igual que en los casos anteriores, los costes de mantenimiento se estiman según la referencia [14].

4.6. Caldera centralizada

El dimensionado de las calderas centralizadas se suele realizar a partir del periodo de consumo punta. El agua caliente demandada durante ese momento de máximo consumo deben cubrirla entre la caldera y el depósito. Por tanto, a mayor tamaño del depósito, la caldera debe abastecer una parte menor de la demanda, con lo que debe ser más pequeña.

En este sentido, adquiere importancia el valor del tiempo de llenado, que es el número de horas que tardaría la caldera, trabajando a máxima potencia, en llenar el depósito.

En el pasado se tendía a dimensionar las instalaciones con depósitos grandes y calderas pequeñas. No obstante, para evitar problemas de legionela, hoy en día se tiende a operar con tiempos de llenado menores. En este proyecto se fijará un tiempo de llenado de una hora.

De acuerdo con [20], el proceso para el dimensionado de un sistema de agua caliente centralizada se lleva a cabo resolviendo las siguientes expresiones:

$$vest = n^{\circ}viv * \frac{ocpv}{3,5}$$

$$\Psi = \frac{1}{(vest - 1)^{0,5}} + 0,17$$

$$Qs = 0,03125 * vest * \Psi$$

$$PMC = Qs * 4,18 * (60 - Tc)$$

$$DurCP = \frac{5 * vest^{0,905}}{15 + vest^{0,92}}$$

$$PotCC = \frac{PMC}{1 + \frac{REs * TP}{DurCP}}$$

$$VolDCC = \frac{3600 * PMC}{4,18 * (Tac - Tc) * (\frac{REs}{DurCP} + \frac{1}{TP})}$$

Siendo vest es el número de viviendas estándar, calculado a partir del número de viviendas, n^oviv, y del número de ocupantes de cada una de ellas, ocpv.

Ψ es un término llamado equivalencia.

Qs es el caudal sostenido, en litros por segundo.

PMC es la potencia media colectiva, en kW.

Tc es la temperatura de cálculo. Se suelen tomar 10°C. Por su parte, Tac es la temperatura de acumulación del agua caliente; se consideran 60°C para este parámetro.

DurCP es la duración del consumo punta, en horas.

TP es el tiempo de preparación del depósito, en horas. Se considera 1 hora.

REs es el rendimiento de estratificación. De acuerdo con [20], un valor adecuado es 0,86; es decir, un 14% del agua no podría aprovecharse por no tener la estratificación perfecta.

PotCC es la potencia de la caldera centralizada, en kW.

Por último, VolDCC es el volumen del depósito del sistema de agua caliente centralizada, en litros.

Al igual que para el caso de los calentadores instantáneos, el consumo de gas se estima sabiendo que la caldera centralizada debe cubrir la parte de la demanda que no sea abastecida por el sistema de energía renovable o residual. Las calderas empleadas para ello serán de baja temperatura, pues no vale la pena utilizar calderas de condensación cuando la temperatura de acumulación del ACS es demasiado elevada como para producirse condensados –alrededor de 60°C-. En este tipo de calderas, el rendimiento estacional se puede tomar igual al nominal, de acuerdo con [19], pues el rendimiento no baja a carga parcial. Los costes de mantenimiento se estimarán a partir de [14].

4.7. Bomba de calor eléctrica

Su dimensionado se realiza en base a la demanda de la hora de mayor demanda, tal y como se exige en [3]. Además, puesto que la potencia que es capaz de aportar la bomba depende de la temperatura, el sistema debe ser capaz de abastecer la potencia en condiciones extremas. Puesto que se dispone de ficheros climáticos de temperaturas de años tipo para cada ciudad, se tomarán como temperaturas extremas la máxima y la mínima horaria.

Así pues, el sistema de climatización eléctrico debe tener la potencia suficiente como para cubrir, en la hora más fría, la mayor demanda horaria de calefacción que se dé durante el año. También debe, trabajando en las condiciones marcadas por la temperatura más cálida del año, poder cubrir la máxima demanda horaria de refrigeración. La capacidad de la bomba debe ser suficiente para cubrir ambas necesidades, por lo que se dimensionará en función de la más desfavorable (que será una u otra dependiendo de la climatología).

En las bombas de calor aire-agua, se tienen referencias en [21] sobre la variación de la potencia y el rendimiento con la temperatura exterior. Precisamente esas gráficas se utilizarán para el cálculo tanto de la potencia como del consumo. Se pueden consultar en el apartado de las bombas de calor del anexo A.

El depósito de inercia se dimensionará de manera que sea capaz de almacenar el agua producida por el equipo más grande durante 15 minutos, que, de acuerdo a las consultas realizadas, es la inercia que se debe garantizar, suponiendo un salto térmico de 5°C en el proceso de climatización.

Una vez realizado el dimensionado, queda conocer la manera de estimar el consumo. Como se ha dicho, el rendimiento depende de la temperatura exterior. Para cada hora se puede consultar la temperatura en el fichero climático. A partir de las gráficas de [21] se estima el factor $f(T)$ para una bomba genérica, definido como sigue:

$$f(T) = \frac{Rend(T)}{REur}$$

Donde $Rend(T)$ es el rendimiento a la temperatura exterior T (COP en calefacción y EER en refrigeración), y $REur$ es el rendimiento en condiciones Eurovent (7°C de temperatura exterior en invierno y 35°C en verano).

Posteriormente, multiplicando el factor $f(T)$ por el rendimiento Eurovent de la bomba empleada en el proyecto, se obtiene el rendimiento horario. Y dividiendo la demanda horaria entre este rendimiento, se obtiene el consumo eléctrico de cada hora.

Por último, para estimar el coste de mantenimiento, se emplearán las indicaciones de [14].

4.8. Bomba de calor a gas

El procedimiento de dimensionado es similar al empleado para las bombas eléctricas. No obstante, en este caso las gráficas que muestran el comportamiento de la bomba a diferentes temperaturas se han obtenido a partir de [22]. También pueden consultarse en el anexo A. La principal diferencia consiste en que, para las bombas a gas, la potencia de calefacción no desciende a temperaturas menores que 7°C.

El depósito de inercia se dimensiona también de la misma manera que en el caso de la bomba de calor eléctrica. No obstante, ahora se aprovecha el calor residual de los gases que salen del motor de la bomba para la producción de agua caliente, siendo necesario instalar un segundo depósito. El volumen de este depósito será igual, aproximadamente, a los litros de agua caliente consumidos por los ocupantes cada día, suficientemente grande para almacenar el agua desde el momento de producción al de consumo, pero con un tiempo de permanencia suficientemente corto para evitar problemas de legionela.

Debe tenerse en cuenta que, al producirse mediante energías residuales, es válido para sustituir a las placas solares, siempre y cuando se alcance, como mínimo, la cobertura exigida por [2].

El procedimiento para estimar el consumo de gas será similar al empleado para el consumo de las bombas eléctricas, pero empleando las gráficas de las bombas de calor a gas, obtenidas de [22].

Para estimar la demanda de ACS que se abastece mediante la energía residual de la bomba de calor a gas, se dispone en [22] de datos referentes a la producción en condiciones nominales. La producción de agua caliente por unidad de gas consumido se puede considerar constante, salvo cuando la temperatura exterior sea inferior a 7°C, ya que el calor residual, en vez de ser empleado para la producción de agua caliente, se emplea para precalentamiento y desescarche.

En definitiva, al calcular el consumo de gas de cada hora, también se puede estimar la producción de agua caliente.

La cantidad de agua caliente aprovechada finalmente se estimará mediante análisis horario. En cada hora, el depósito se llena con el agua caliente producida por la bomba, y se vacía por acción de la demanda. Cuando el depósito se llene, el agua caliente producida tendrá que desaprovecharse. Si por el contrario, el depósito se encuentra a un nivel inferior al 14%, de acuerdo con [20] la energía no se puede aprovechar para agua caliente por problemas de estratificación, con lo que tendrá que actuar la caldera. En la figura 7 se expresa gráficamente este proceso.

Los costes de mantenimiento se estiman gracias a [14], suponiendo que una bomba de calor a gas es una combinación de una bomba eléctrica y un equipo de cogeneración.

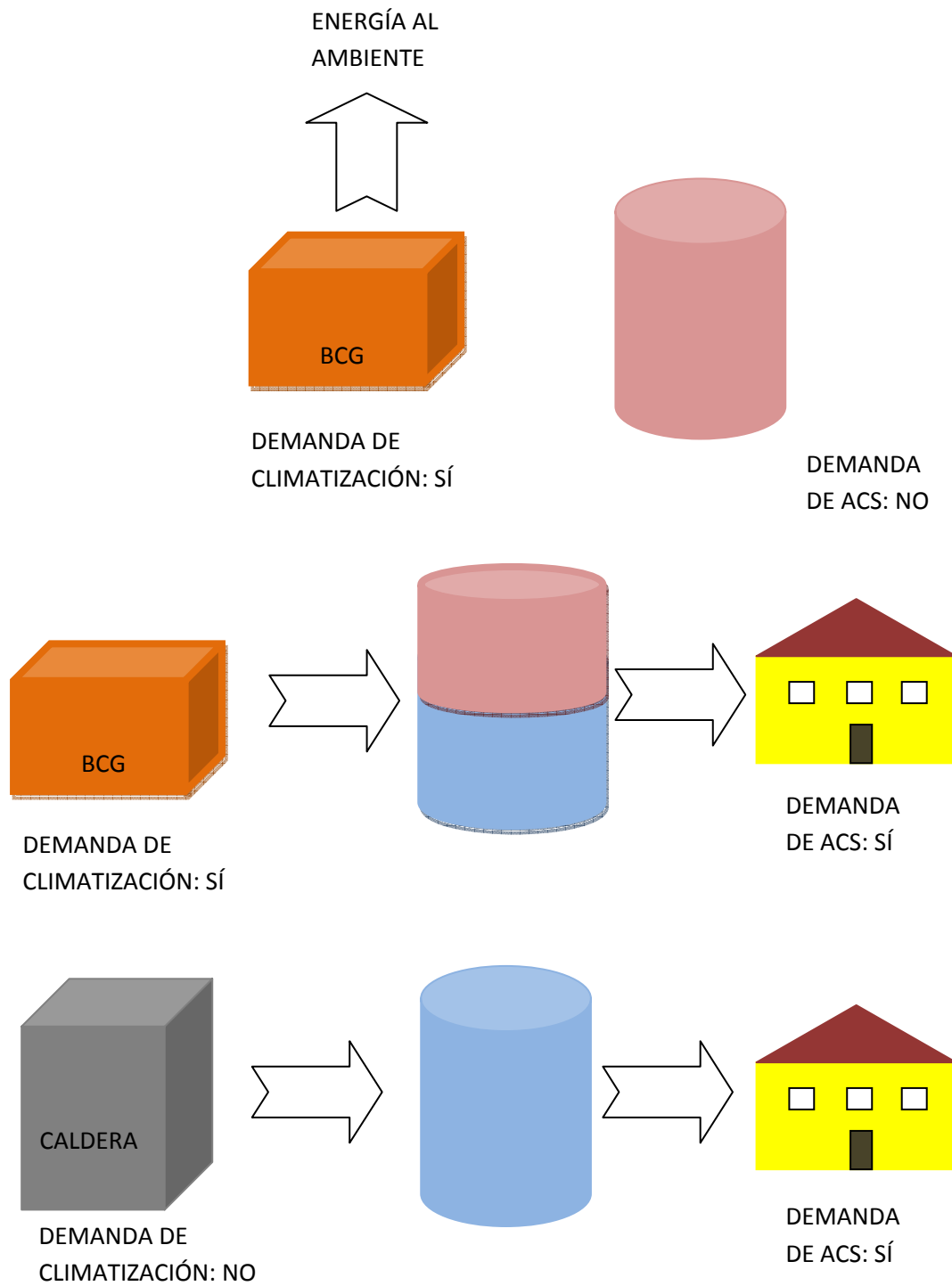


Figura 7. Análisis horario del flujo de agua caliente

5. Casos de estudio

5.1. Introducción

Para poder llevar a cabo la comparación, se ha realizado un análisis de las distintas soluciones en edificios de diferentes características. Fundamentalmente, se ha variado el tamaño del bloque y su ubicación dentro del territorio español, puesto que son los dos factores más influyentes en el resultado final.

A la hora de decidirse por una u otra tecnología, el aspecto fundamental es la demanda que habrá que abastecer. La solución óptima dependerá tanto de la magnitud de la demanda como de su variación a lo largo del año, que a su vez dependen del tipo y tamaño de edificio y de la climatología.

En el caso del agua caliente, la legislación establece claramente la manera de calcular la demanda. Esto no es así en el caso de la climatización, donde la demanda final depende fuertemente de muchos parámetros; algunos de ellos están relacionados con el edificio, y otros con aspectos tan subjetivos como el comportamiento final de cada usuario. Así pues, se ha tratado de establecer hipótesis realistas de comportamiento para el cálculo de las demandas.

No obstante, en cada caso se han analizado bloques de diferentes tamaños, de manera que al cambiar el número de viviendas se modifique también las demandas. Así se logra analizar los resultados para diferentes demandas y, por tanto, dar a las conclusiones un carácter independiente de las hipótesis de cálculo de las mismas.

5.2. Definición de casos

Se han definido dos casos base, que se utilizarán para realizar un primer estudio comparativo entre las alternativas consideradas:

- El análisis de las tecnologías de producción de agua caliente, se realiza sobre un edificio de 30 viviendas situado en Salamanca. Cada vivienda tiene 4 dormitorios (es decir, 6 ocupantes, según el CTE).
- Por su parte, para el estudio de las tecnologías de climatización, se parte de un bloque de 20 viviendas situado en Valencia. Las viviendas se encuentran repartidas en 5 plantas de 4 viviendas cada una. Cada vivienda tiene una superficie de 90 m², y una ocupación de 3 personas.

Partiendo de estos edificios de referencia se realizarán diversos estudios de sensibilidad acerca de la influencia de distintas condiciones. Concretamente, se cambian el emplazamiento climático del lugar y el número de viviendas del bloque, que son los dos parámetros más importantes: el primero, porque afecta a las condiciones y las demandas del edificio y, en el caso del agua caliente, también a la normativa; y el segundo, porque afecta a los valores globales de potencia y demanda, siendo sobre todo un factor clave en el dimensionado de equipos.

Además, para la comparación entre los auxiliares, también se estudian las consecuencias de variar la ocupación de cada edificio, ya que esto afecta al dimensionado de los equipos individuales.

5.3. Demandas de agua caliente sanitaria

Su cálculo se realiza de acuerdo con lo establecido en [2]. Para dimensionar los equipos es necesario disponer de datos de demandas mensuales, cuyo cálculo se realiza como sigue:

1. En primer lugar, a partir del número de dormitorios de cada vivienda, se estima el número de ocupantes por vivienda y totales, de acuerdo con la tabla 1.
2. A continuación, multiplicando el número de ocupantes totales por los 22 litros por persona y día de consumo asignados en [2], se obtiene el consumo total del edificio (CACS) en litros.
3. Con la temperatura del agua de red, consultada para cada ciudad en [16], se puede estimar la demanda térmica (en kWh) de un día tipo de cada mes, mediante la siguiente relación:

$$ED_{ACS} = \frac{CACS * 4,18 * (60 - T_{red})}{3600}$$

4. Por último, multiplicando este valor por el número de días de cada mes, se obtiene la demanda total mensual.

Los cálculos de la potencia para el caso individual y el colectivo vienen explicados en el capítulo 4.

Para el análisis de la energía aprovechada para ACS del calor residual de la bomba de calor a gas se ha realizado simulación horaria, con lo que es necesario disponer de un perfil horario de demanda de agua caliente. Este perfil ha sido obtenido a partir de [23], y es el que se muestra en la figura 8.

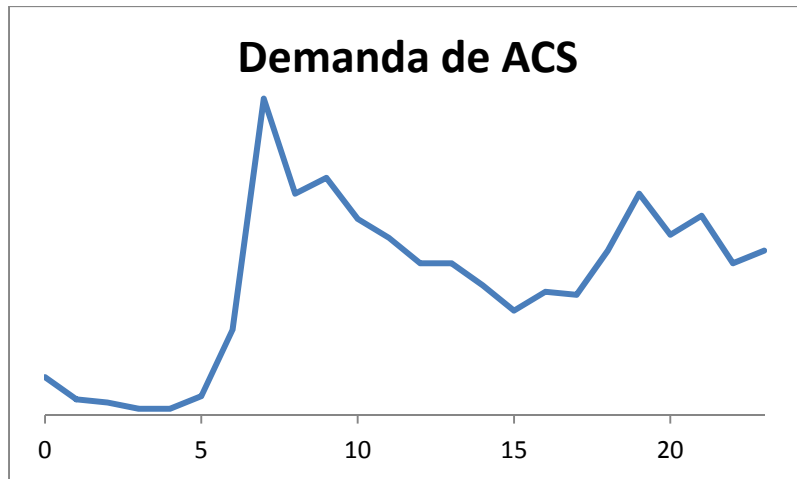


Figura 8. Perfil diario de la demanda de ACS

5.4. Demandas de climatización

5.4.1. Método de cálculo

El software utilizado para el cálculo de demandas es Energy Plus, desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos para el cálculo de demandas.

El procedimiento empleado por el programa es un análisis, generalmente hora a hora, del flujo de calor existente en el bloque de viviendas. Este flujo depende de muchos factores (como los cerramientos, la temperatura o la radiación exterior). El sistema de climatización debe ser capaz de compensar esas cargas, manteniendo la temperatura de confort requerida.

En la figura 9 se muestra un esquema de los factores que influyen en la carga final a eliminar.

Uno de los problemas de Energy Plus es la excesiva complejidad que presenta para introducir datos de entrada. Por este motivo, en LIFTEC ha sido desarrollada la interfaz PLEYADE, que, sin modificar la manera de funcionar de Energy Plus, sí que facilita al usuario la introducción de datos, haciendo el programa más visual.

Debido a su precisión al calcular las demandas por ser un procedimiento hora a hora, podría ser empleado como programa alternativo a LIDER y CALENER, y aceptado por tanto por la legislación.

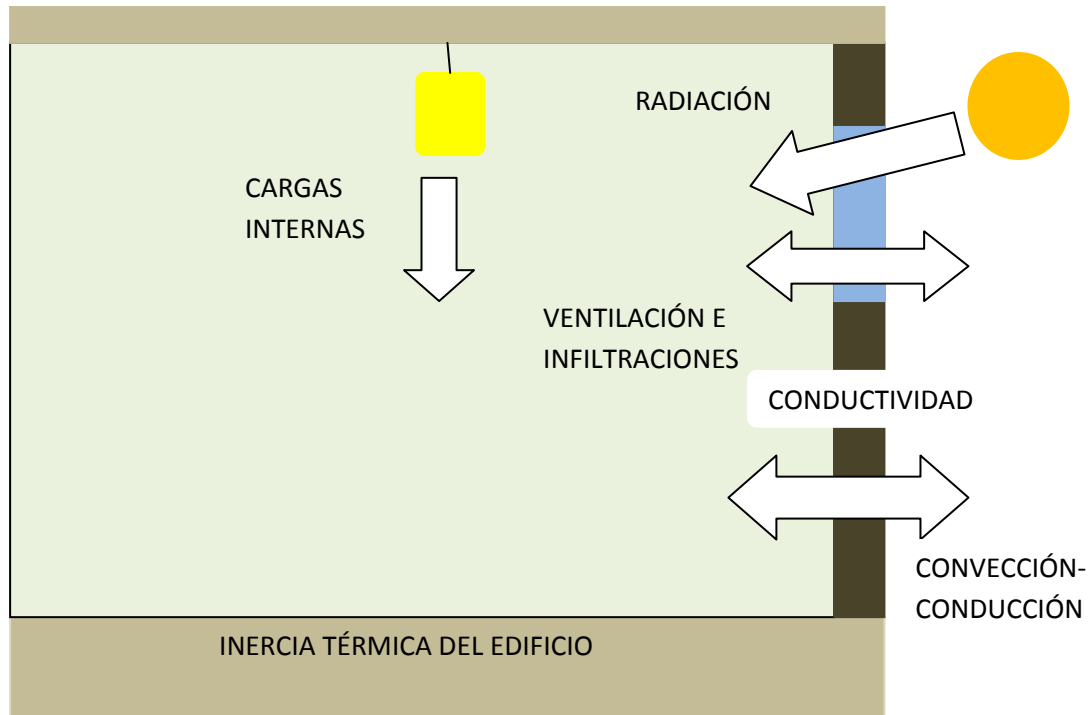


Figura 9. Flujo de calor en cada hora

Para facilitar el uso de Energy Plus, lo que hace PLEYADE es programar unos datos de entrada para permitir al usuario elegir entre opciones definidas previamente, en vez de tener que introducir todos los datos necesarios para definir cada caso. Los parámetros que es necesario especificar en PLEYADE son de tres tipos:

- Parámetros del edificio. Son la orientación, el entorno, el número de plantas, el número de viviendas, la superficie por vivienda, la forma del edificio, el porcentaje de acristalamiento y los materiales empleados.
- Parámetros climáticos. Se debe introducir un fichero climático de la ciudad, en formato epw.
- Parámetros de ocupación. Son el número de ocupantes por vivienda, las temperaturas de climatización y el diagrama de ocupación a lo largo del día.

En el anexo C se muestra más información referente al programa de simulación.

5.4.2. Parámetros utilizados en las simulaciones

Se trata de un apartado fundamental, ya que la demanda depende fuertemente de las hipótesis que se realicen acerca de los parámetros constructivos y de uso de los edificios. Pero a su vez, no resulta en absoluto sencillo definir valores que representen adecuadamente la realidad. Por tanto, siempre que ha sido posible, se han utilizado fuentes bibliográficas de reconocido prestigio. En otros casos, se han tratado de tomar hipótesis de comportamiento realistas.

En la figura 10 se muestra la distribución interior de la vivienda, mientras que en la tabla 7 aparecen las características importantes del edificio, tanto en lo referente a la construcción como a la ocupación. De estos datos, las conductividades se basan en los requisitos de [2] para nueva edificación. El cálculo de las infiltraciones se ha hecho a partir de [24], suponiendo en los meses de verano la recomendación existente en [23].

Para mayor información sobre algún punto, consultar el anexo C.

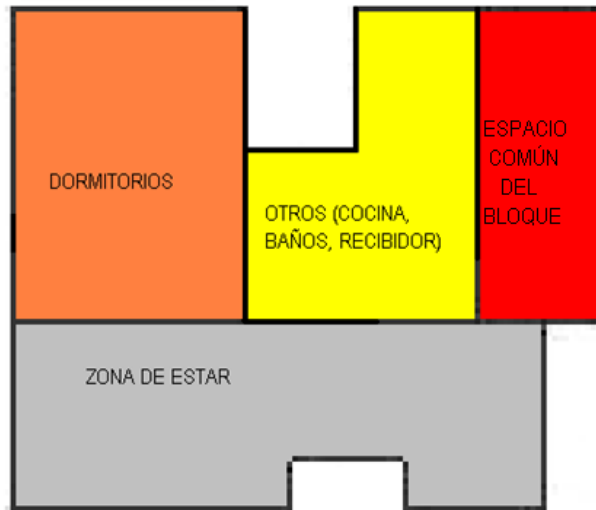


Figura 10. Distribución interior de cada vivienda

Características del edificio	Superficie por vivienda	90 m ²
	Viviendas por planta	4
	Número de plantas	3-9, según el caso
	Relación fachadas este/sur	0,8
	Altura de cada piso	2,5 metros de espacio interior 2,8 metros totales
Características constructivas	Conductividad de las fachadas*	0,67 W/m ² K
	Conductividad de la solera*	0,64 W/m ² K
	Conductividad de la cubierta*	0,45 W/m ² K
	Conductividad de las ventanas*	3,21 W/m ² K
	Porcentaje de acristalamiento	30%
	Composición de las ventanas	Dos capas de vidrio separadas por una cámara de aire
	Ventilación e infiltraciones	0,426 renovaciones/hora Salvo: en verano, de 0h a 8h-> 4 renovaciones/hora
Parámetros de ocupación	Ocupantes por vivienda	3
Otras observaciones	Se considera un perfil de ocupación a lo largo del día (ver anexo C)	
	Se supone un buen uso de las persianas por parte de los usuarios	

*Las conductividades incluyen la convección

Tabla 7. Características del edificio

Por último, en la tabla 8 se indica la división climática del año que se ha considerado para el análisis, junto con las temperaturas de climatización en cada época. Se trata de unos patrones que se han considerado razonables para un edificio genérico en España.

Temporada de invierno	Duración	Del 16 de octubre al 30 de abril
	Período de climatización	De 6 h a 9 h y de 16 h a 0 h
	Temperaturas de consigna	21°C durante el período de climatización 18°C el resto del tiempo
Temporada de verano	Duración	Del 1 de mayo al 15 de octubre
	Período de climatización	De 14 h a 0 h
	Temperaturas de consigna	24°C durante el período de climatización 27°C el resto del tiempo

Tabla 8. Características de la climatización

5.4.3. Resultados obtenidos

A continuación, en las figuras 11-14 y en las tablas 9-12 se muestran los resultados obtenidos, tanto en demandas anuales y potencias de dimensionado como en perfil anual para cada ciudad. Se varía el número de plantas –manteniendo constantes las 4 viviendas por planta, junto con la superficie y ocupación de cada vivienda-. Se han escogido ciudades representativas de las diferentes climatologías españolas: La Coruña, Madrid, Valencia y Málaga.

Nº plantas	Calefacción anual (kWh)	Refrigeración anual (kWh)	Potencia calefacción (kW)	Mínima T anual (°C)	Potencia refrigeración (kW)	Máxima T anual (°C)
3	70166,35	1091,26	62,44	4,4	12,45	27,9
5	104252,54	3028,46	98,97	4,4	31,55	27,9
7	138476,52	4866,84	135,65	4,4	48,78	27,9
9	172775,50	6648,33	172,36	4,4	65,87	27,9

Tabla 9. Resultados de la simulación para La Coruña

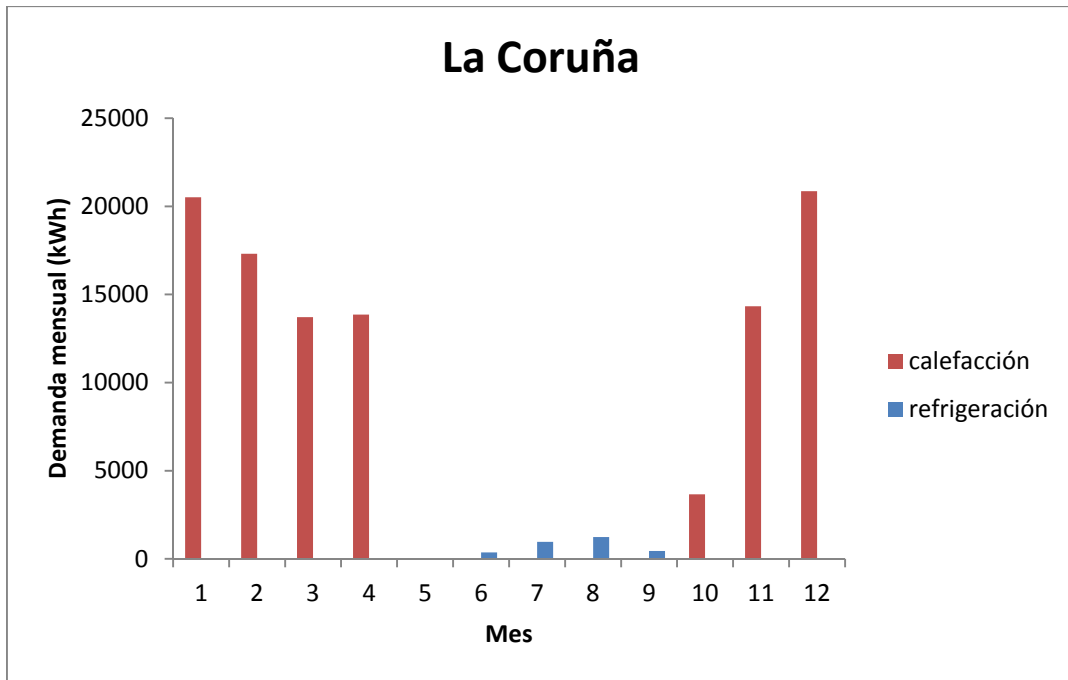


Figura 11. Perfil de climatización anual para La Coruña (caso de 5 plantas)

Nº plantas	Calefacción anual (kWh)	Refrigeración anual (kWh)	Potencia calefacción (kW)	Mínima T anual (°C)	Potencia refrigeración (kW)	Máxima T anual (°C)
3	111096,95	18962,93	84,72	-2	39,58	36,8
5	169888,29	39532,94	136,03	-2	80,53	36,8
7	228835,03	59899,28	187,34	-2	121,03	36,8
9	287943,12	80161,11	238,74	-2	161,39	36,8

Tabla 10. Resultados de la simulación para Madrid

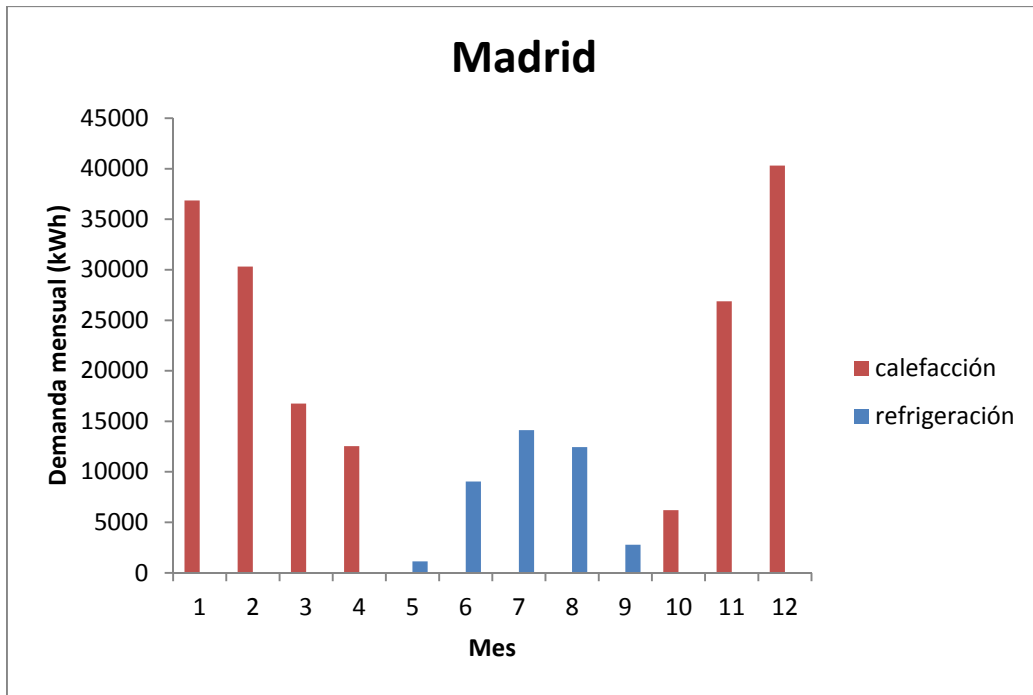


Figura 12. Perfil de climatización anual para Madrid (caso de 5 plantas)

Nº plantas	Calefacción anual (kWh)	Refrigeración anual (kWh)	Potencia calefacción (kW)	Mínima T anual (°C)	Potencia refrigeración (kW)	Máxima T anual (°C)
3	62958,16	26743,57	67,97	0,6	62,92	35,7
5	93112,90	55163,91	108,55	0,6	123,54	35,7
7	124128,72	85557,23	146,2	0,6	189,4	35,7
9	154866,44	114709,37	185,64	0,6	252,43	35,7

Tabla 11. Resultados de la simulación para Valencia

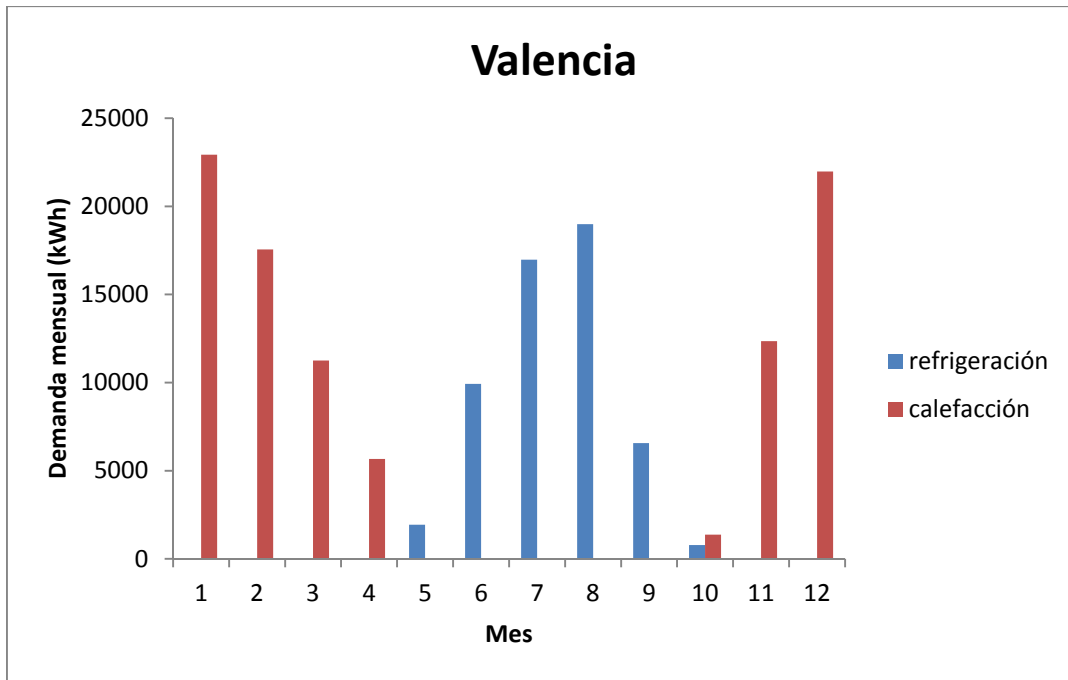


Figura 13. Perfil de climatización anual para Valencia (caso de 5 plantas)

Nº plantas	Calefacción anual (kWh)	Refrigeración anual (kWh)	Potencia calefacción (kW)	Mínima T anual (°C)	Potencia refrigeración (kW)	Máxima T anual (°C)
3	46530,87	22926,48	45,55	3,9	56,7	37,1
5	67236,95	48173,39	70,15	3,9	113,15	37,1
7	88095,47	73152,60	94,62	3,9	169,24	37,1
9	108974,93	97993,89	119,18	3,9	225,16	37,1

Tabla 12. Resultados de la simulación para Málaga

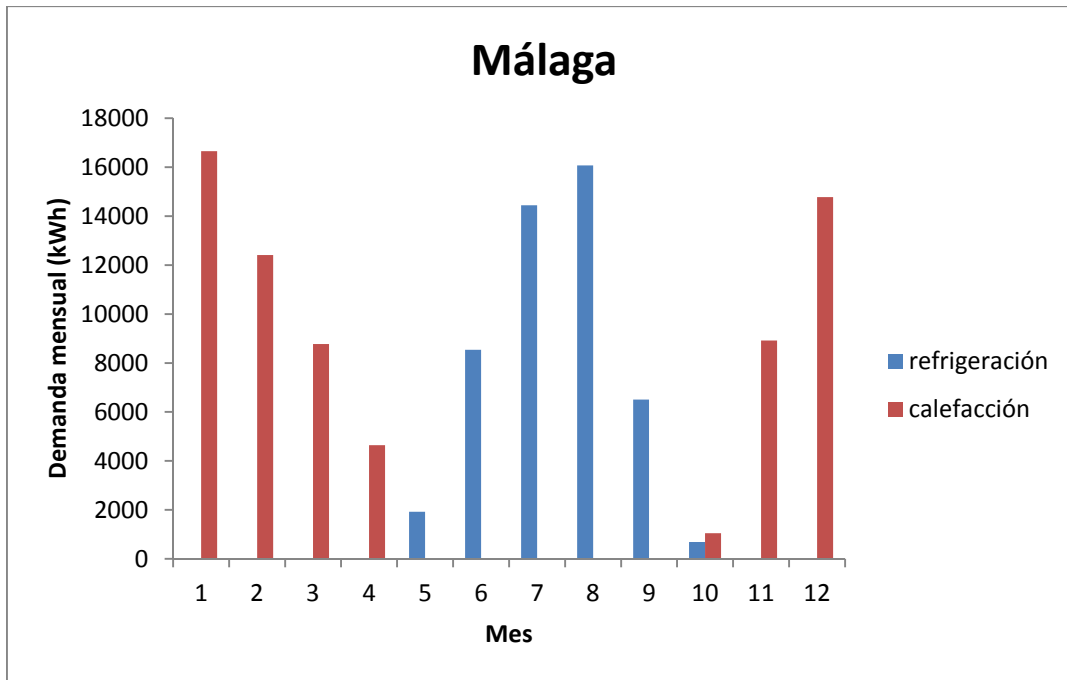


Figura 14. Perfil de climatización anual para Málaga (caso de 5 plantas)

Se pueden apreciar claras diferencias en el calendario, pues el verano en La Coruña es mucho más corto que en el resto de ubicaciones, ya que la demanda de calefacción en abril es todavía considerable. Por otro lado, el invierno en Málaga y Valencia es más corto que en Madrid, como se aprecia sobre todo en la demanda de calefacción de octubre. Estas diferencias influirán en el funcionamiento del sistema de climatización y el aprovechamiento del calor residual para agua caliente de la bomba de calor a gas.

En las figuras 15 y 16 se muestra la comparación entre la demanda anual y la potencia de los bloques de 5 plantas de estas ciudades.

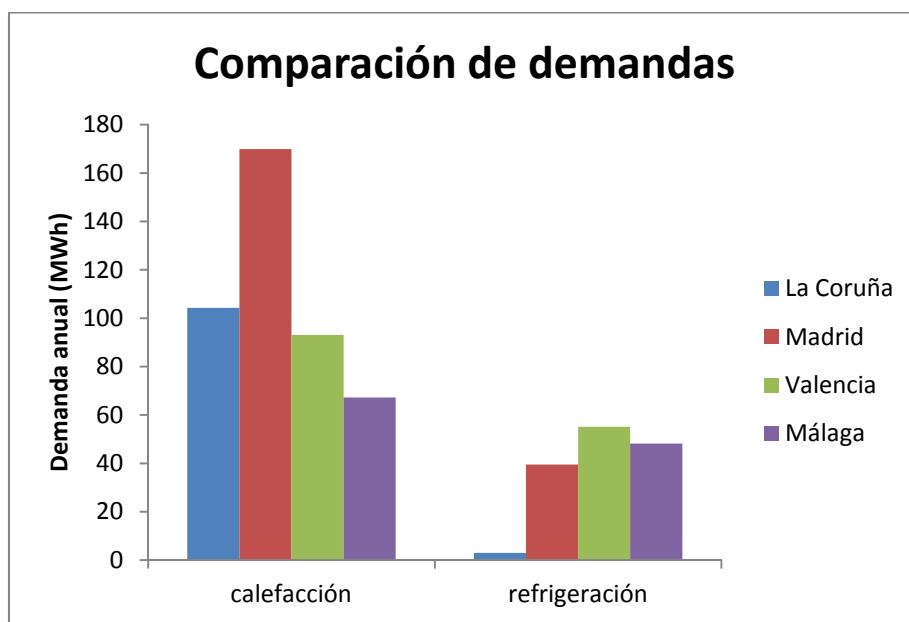


Figura 15. Comparación de demandas anuales para los bloques de 5 plantas

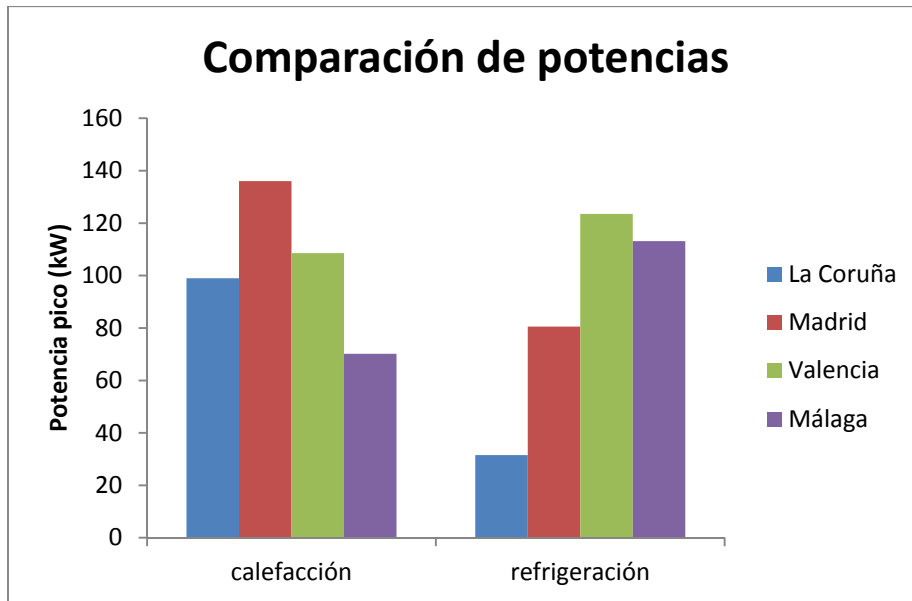


Figura 16. Comparación de potencias para los bloques de 5 plantas

Las gráficas anteriores demuestran la gran influencia que tiene la localización geográfica sobre las demandas térmicas. Entre las cuatro ciudades consideradas, Madrid es la ciudad con mayor demanda de calefacción, debido a que se encuentra en el interior, mientras que en el resto el mar suaviza las temperaturas. Respecto a la refrigeración, aumenta a medida que nos acercamos hacia el sur, siendo especialmente baja en La Coruña.

Por último, resaltar que el período de calefacción es superior a la refrigeración, con lo que, aunque la potencia de refrigeración sea en muchos casos mayor que la de calefacción, en términos de demandas anuales suele ser mayor esta última.

6. Análisis comparativo de instalaciones de abastecimiento de ACS

6.1. Introducción

En este capítulo se presenta una comparación entre diferentes opciones para el abastecimiento de ACS en bloques de viviendas. Para ello es necesario tener en cuenta la exigencia del CTE en cuanto a cobertura mínima a partir de fuentes de energía alternativas. Aparte de la solución más común de instalación de placas solares, se evaluará la alternativa de producción de ACS a partir del calor residual de motores de microgeneración. También se analizan las alternativas de utilizar sistemas auxiliares centralizados o individuales.

Tal y como se ha comentado anteriormente, el análisis se realiza desde los puntos de vista técnico, económico y ambiental. De ellos, es el segundo el que se estudia más detenidamente –es el único en el que se realizan comparaciones cuantitativas detalladas-, para lo cual se estudian bloques con diferentes número de viviendas y de dormitorios por vivienda, situados en diferentes zonas climáticas.

6.2. Comparación técnica

La energía solar ofrece ventajas importantes frente a la microgeneración, como el hecho de que el sol asegura un suministro energético inagotable y con costes de operación muy reducidos. Además, no requiere disponer de una sala de calderas: es suficiente con un espacio interior para mantener el depósito.

No obstante, la energía solar también presenta inconvenientes; por ejemplo, requiere un amplio espacio en la cubierta, espacio del que no siempre se dispone. Además, resulta necesario que no existan edificios cercanos que proyecten sombras, pues en caso contrario la instalación no podría realizarse. Por otro lado, para que el equipo funcione adecuadamente es necesario revisar periódicamente la instalación y realizar las labores de mantenimiento que requiere, tareas que no siempre se llevan a cabo. En realidad, desde la entrada en vigor de la actual normativa, las placas solares han dado multitud de fallos de funcionamiento. Por no hablar del hecho de que se depende de una fuente energética exterior, en la que no se puede influir (si bien este inconveniente es corregido en parte por la presencia del depósito).

Así pues, valorando ambos aspectos, se concluye que ambas tecnologías presentan sus ventajas y sus inconvenientes. Quizá en la comparación global la microgeneración saldría algo mejor desde el punto de vista técnico al aportar una mayor garantía de suministro.

Respecto al tipo de apoyo, también existen argumentos a favor y en contra de las soluciones centralizadas frente a las individuales. En caso de que la caldera sea centralizada es obligatoria la recirculación para evitar que el usuario, al abrir el grifo, tenga que esperar mucho tiempo hasta que el agua llegue caliente. De no ser así, el gasto de agua y la incomodidad de la espera serían notables.

Por otro lado, uno de los problemas que puede presentar el uso de calentadores individuales es su escasa capacidad de reacción frente a simultaneidades en los consumos por encima de lo esperado, debido a la potencia limitada del calentador. Este problema es imperceptible en el caso de calentadores centralizados, pues es mucha coincidencia que, en un bloque de viviendas, la mayor parte de los usuarios decidan consumir agua caliente al mismo tiempo; además, la caldera centralizada suele contar con un depósito de apoyo. No obstante, no se trata de un problema importante en la práctica, ya que el tiempo uso continuado de agua caliente –y por tanto la probabilidad de simultaneidad- es muy bajo.

Así pues, técnicamente, si el dimensionado es correcto, ambos tipos de apoyo son válidos. Las diferencias aparecen al valorar costes y pérdidas térmicas, u otros aspectos más difíciles de cuantificar como son el espacio necesario o la propiedad y gestión de la instalación.

6.3. Comparación económica

6.3.1. Dimensionado para un caso concreto

En primer lugar, se muestran los resultados del dimensionado realizado para el ejemplo del edificio de Salamanca. Recordemos que tiene 30 viviendas de 6 ocupantes cada una.

De acuerdo con el CTE, el consumo es de 22 litros por persona y día. En el global del edificio, esto da lugar a un consumo total de 3960 litros de agua caliente cada día en el bloque. Para edificios de esas características en la zona III, se exige una cobertura del 50%.

Tras la aplicación del método f-chart, se obtiene que son necesarios 26 colectores solares. Puesto que cada uno de ellos tiene 2 metros cuadrados de superficie, se tiene un volumen del depósito de:

$$26 * 2 * 75 = 3900 \text{ l}$$

De entre los depósitos comerciales disponibles, se elige uno de 4000 litros.

Por su parte, la relación exigida por el CTE para la potencia del intercambiador hace que sea necesario un equipo de:

$$0,5 * 26 * 2 = 26 \text{ kW} = 22392 \text{ kcal/h}$$

El valor escogido es de 22500 kcal/h.

Los datos mensuales de temperaturas de red, demandas y coberturas son los que se muestran en la tabla 13.

Mes	Temperatura de red (°C)	Demanda (kWh)	Energía aportada (kWh)	Cobertura
Enero	5	7832	1844	23,54%
Febrero	6	6946	2540	36,57%
Marzo	8	7405	3636	49,10%
Abril	10	6890	3894	56,51%
Mayo	11	6978	4210	60,33%
Junio	12	6615	4576	69,17%
Julio	13	6693	5169	77,23%
Agosto	12	6835	5295	77,47%
Septiembre	11	6753	4660	69,01%
Octubre	10	7120	3597	50,52%
Noviembre	8	7166	2416	33,72%
Diciembre	5	7832	1642	20,97%
Anual	9,25	85064	43479	51,11%

Tabla 13. Cobertura solar mensual en el bloque de Salamanca

El consumo de los colectores es nulo, puesto que obtienen su energía a partir del sol.

Para el dimensionado de la microgeneración, con un equipo es suficiente, ya que es capaz de aportar el 100% de la demanda durante todos los meses. El depósito asociado es de 3500 litros, que es, más o menos, la demanda diaria. El número de horas que funcionará el motor, de 12,5 kW de potencia térmica, será:

$$\frac{85064}{12,5} = 6805 \text{ horas}$$

Puesto que el consumo sobre PCS es de 22,78 kW, este número de horas de funcionamiento dará lugar a un consumo de gas de:

$$6805 * 22,78 = 155018 \text{ kWh}$$

Por su parte, y teniendo en cuenta que la potencia eléctrica del motor es de 5,5 kW, se tiene la siguiente producción eléctrica anual:

$$6805 * 5,5 = 37428,6 \text{ kWh}$$

Todavía no se está en condiciones de evaluar los costes que se producirán como consecuencia del consumo de gas, ya que dependiendo del consumo total se tendrá una u otra tarifa. Lo que sí se puede conocer es el beneficio por la venta de electricidad, conociendo el beneficio total por unidad de energía eléctrica, cuyo cálculo se realiza en el anexo D. El valor total, teniendo en cuenta todos los conceptos, de cada kWh de electricidad producida, es de 18,1643 c€.

Así pues, los beneficios anuales por venta de electricidad serán:

$$37428,6 * 0,181643 = 6805,09 \text{ €}$$

Para los calentadores individuales, deberán instalarse 30 calentadores de 27,5 kW cada uno. Conociendo que su rendimiento nominal es del 77,5% sobre PCS, y que el estacional, de acuerdo con [19], es de 0,98 veces el nominal, por cada kWh producido necesitan consumirse:

$$\frac{1}{0,775 * 0,98} = 1,317 \text{ kWh}$$

Por su parte, para el caso de la caldera centralizada, aplicando las expresiones que aparecen en el capítulo 4, se tiene una caldera de 83 kW, apoyada con un depósito de 1500 litros. Teniendo en cuenta que su rendimiento nominal es de un 83% sobre PCS, y que el estacional es igual al nominal, se tiene un consumo por unidad de energía producida de:

$$\frac{1}{0,83} = 1,205 \text{ kWh}$$

En la tabla 14 se muestra el consumo de gas asociado a cada configuración, distinguiéndose entre individual y colectivo, ya que se modifican los puntos de consumo y, por tanto, el precio del gas. En el caso de la microgeneración, debe tenerse en cuenta que se producen 37428 kWh de electricidad al año, y que una unidad de electricidad es más valiosa que una de gas, tanto económica como energéticamente.

Caso	Consumo por vivienda (kWh)	Consumo centralizado (kWh)	Consumo total (kWh)
Solar + individual	1825,6	-	54768
Solar + centralizado	-	50102,4	50102,4
Micro + individual	0	155018	155018
Micro + centralizado	-	155018	155018

Tabla 14. Consumo de gas en cada una de las configuraciones

En la tabla 15 se muestran los precios a aplicar para el gas natural, en función del consumo. Hasta consumos de 50000 kWh anuales, se aplica la tarifa de último recurso (TUR), consultable en [9]. Para consumos mayores, deben buscarse precios de comercializadoras, como Gas Natural Fenosa, que es la que se ha escogido en este caso. Dicha tarifa puede consultarse en [25].

Consumo de gas (kWh)		Precio del gas	
Mínimo	Máximo	Fijo (€/mes)	Variable (€/kWh)
0	5000	4,21	0,05513521
5000	50000	8,62	0,04880021
50000	100000	47,91	0,049902
100000	1000000	71,53	0,047152

Tabla 15. Precio del gas natural

Con estos parámetros, se obtienen los resultados económicos que se muestran en las tablas 16 y 17. Para más información sobre la manera de realizar el cálculo, consultar el anexo D.

PARTIDA		PRECIO	
		APOYO INDIVIDUAL	APOYO COLECTIVO
INVERSIÓN INICIAL			
Equipo solar		33.979,00 €	33.979,00 €
Equipo(s) auxiliar(es)		18.720,00 €	7.762,80 €
Sistema de distribución		27.169,80 €	27.169,80 €
Instalación receptora de gas		18.000,00 €	7.000,00 €
Evacuación de gases		9.900,00 €	600,00 €
Sala de caderas		0,00 €	1.000,00 €
Proyecto	Gastos generales	14.009,94 €	10.076,51 €
	Beneficio del contratista	6.466,13 €	4.650,70 €
IVA		23.084,08 €	16.602,98 €
TOTAL INVERSIÓN INICIAL		151.328,95 €	108.841,79 €
PARTE PROPORCIONAL ANUAL		10.321,08 €	7.507,13 €
COSTE ANUAL			
Coste anual de mantenimiento		832,64 €	635,47 €
Coste anual de gas		4.570,03 €	3.104,62 €
IVA		972,48 €	673,22 €
COSTE AL AÑO		6.375,15 €	4.413,31 €
TOTAL			
COSTE TOTAL ANUAL		16.696,23 €	11.920,44 €

Tabla 16. Coste de la instalación para los casos de energía solar

PARTIDA		PRECIO	
		APOYO INDIVIDUAL	APOYO COLECTIVO
INVERSIÓN INICIAL			
Equipo de microgeneración		32.622,00 €	32.622,00 €
Equipos(s) auxiliar(es)		18.720,00 €	7.762,80 €
Sistema de distribución		27.169,80 €	27.169,80 €
Instalación receptora de gas		21.500,00 €	10.500,00 €
Sistema de evacuación de gases		10.500,00 €	1.200,00 €
Sala de calderas		1.000,00 €	1.000,00 €
Proyecto	Gastos generales	14.496,53 €	10.433,10 €
	Beneficio del contratista	6.690,71 €	4.815,28 €
IVA		23.885,83 €	17.190,54 €
TOTAL INVERSIÓN INICIAL		156.584,87 €	112.693,51 €
PARTE PROPORCIONAL ANUAL		11.355,08 €	8.456,02 €
COSTE ANUAL			
Coste anual de mantenimiento		1.412,27 €	1.215,09 €
Coste anual de gas		9.689,81 €	8.174,21 €
Producción de electricidad		-6.805,09 €	-6.805,09 €
IVA		773,46 €	465,16 €
COSTE AL AÑO		5.070,45 €	3.049,37 €
TOTAL			
COSTE TOTAL ANUAL		16.093,96 €	11.505,39 €

Tabla 17. Coste de la instalación para los casos de microgeneración

De estas tablas se obtienen varias observaciones importantes:

- El coste anual asociado a la parte proporcional de la inversión inicial es comparativamente más alto que el coste de uso. Esto es así por el elevado coste de la instalación de distribución, y también porque tanto la tecnología solar como la microgeneración son tecnologías de elevado coste inicial, pero de bajo consumo.
- El apoyo individual es notablemente más caro que el colectivo. Esto se debe al mayor coste inicial por tener más equipos y más potencia total instalada, pero también al mayor coste de gas, debido a la suma de más términos fijos y al mayor coste por kWh en los contratos individuales, con menor consumo.
- En la comparación entre la solar y la microgeneración, la primera tiene menos costes fijos, pero la segunda tiene menos costes anuales. La explicación de ambos factores se encuentra en la cobertura alcanzada: el motor está sobredimensionado, de manera que se alcanza el 100% de la cobertura y sobra capacidad, mientras que las placas se ajustan al mínimo exigido. También influye que la duración del motor es inferior a la de las placas.

- En este ejemplo concreto, la microgeneración sale favorecida económicamente frente a la energía solar. No obstante, parece que el resultado depende fuertemente del tamaño del bloque, y el ejemplo considerado es un edificio grande. En el siguiente apartado se analizan los resultados al variar, entre otros, el tamaño del bloque.

6.3.2. Análisis de sensibilidad

En este apartado, se va a realizar una comparación entre las tecnologías analizadas a medida que cambian algunos de los parámetros de dimensionado. Concretamente, se muestra el coste total anual por ocupante para diferentes casos. Se han analizado estas y otras situaciones, mostrando en este apartado los resultados más importantes.

En el anexo E se muestra el dimensionado para estos otros casos.

- Tamaño del edificio

En primer lugar, se va a comprobar el efecto del tamaño del bloque de viviendas. El tamaño está ligado con el número total de dormitorios y, por tanto, de ocupantes. Para el dimensionado de las instalaciones de agua caliente lo que importa es la ocupación, y no la superficie, por lo que es el parámetro que se manejará.

Se han repetido los cálculos para diferentes números de viviendas en los casos de 1 dormitorio (es decir, 1,5 ocupantes) por vivienda, 2 dormitorios (3 ocupantes) por vivienda y 4 dormitorios (6 ocupantes) por vivienda. La comparación aparece reflejada en las figuras 17, 18 y 19. Todos los casos se refieren a la ciudad de Salamanca. Las gráficas reflejan el coste total anual dividido por el número de usuarios, mostrando en todos los casos un claro comportamiento de economía de escala, donde el coste se reduce al aumentar el número de usuarios (con una reducción más marcada para microgeneración).

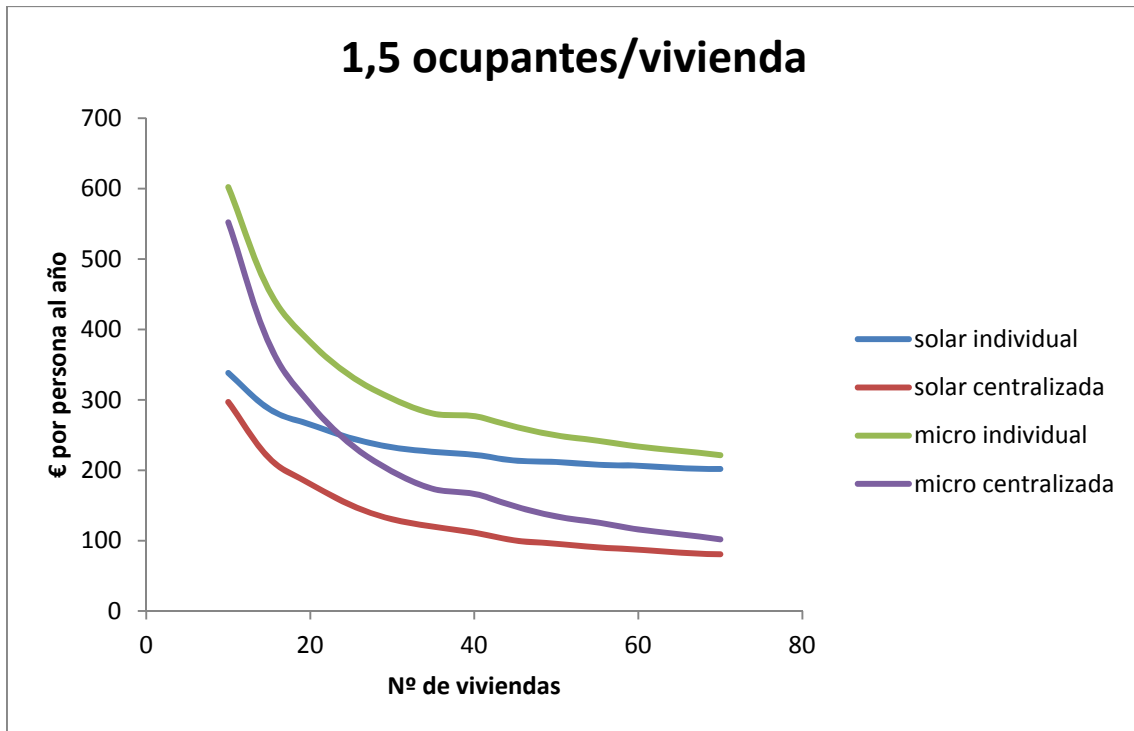


Figura 17. Coste total anual de ACS por persona en bloques de 1 dormitorio por vivienda en Salamanca

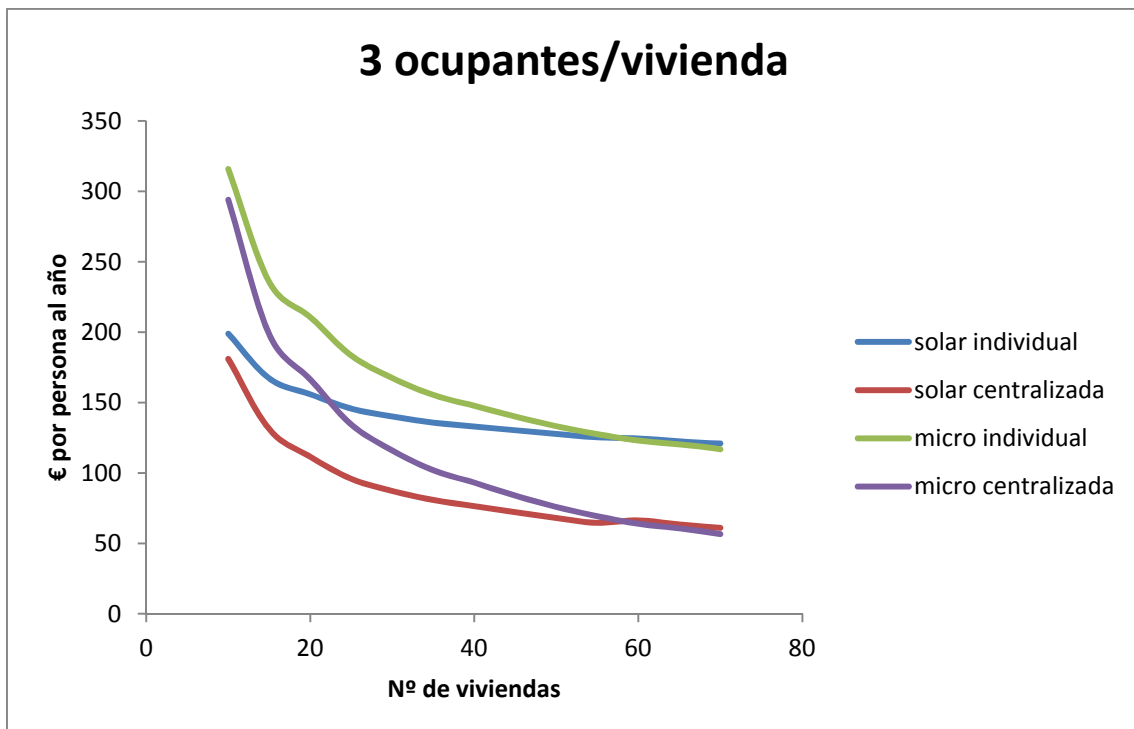


Figura 18. Coste total anual de ACS por persona en bloques de 2 dormitorios por vivienda en Salamanca

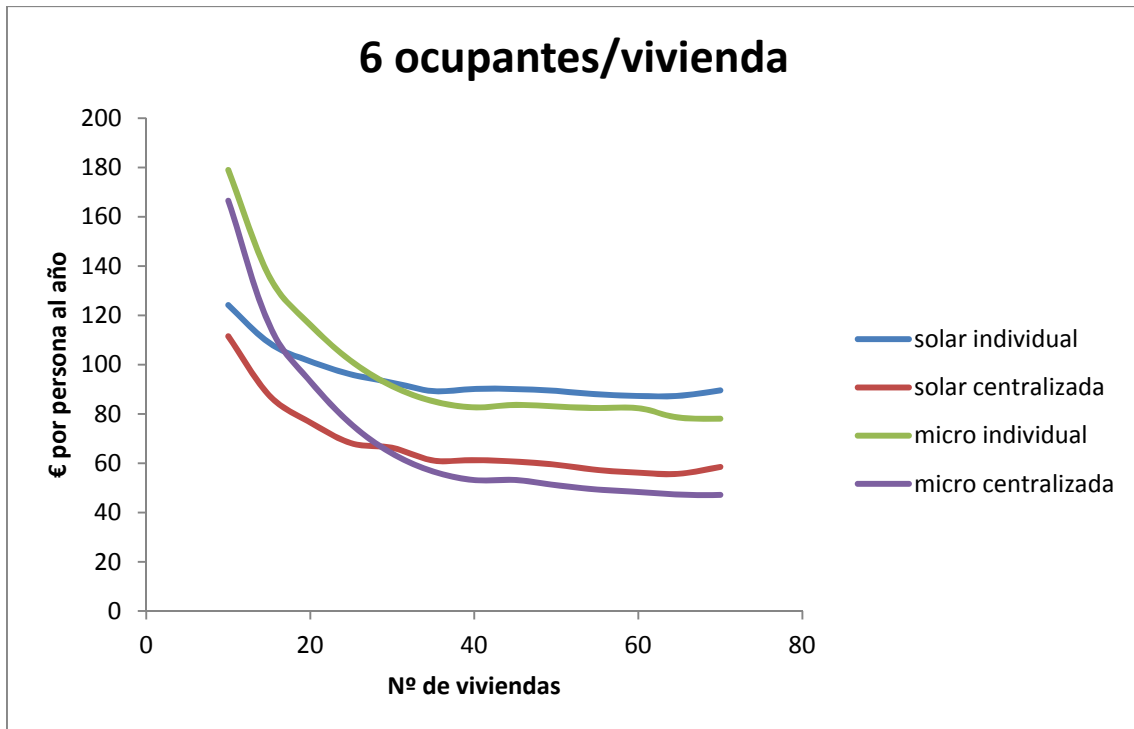


Figura 19. Coste total anual de ACS por persona en bloques de 4 dormitorios por vivienda en Salamanca

Se puede ver que la microgeneración resulta preferible económicamente frente a la energía solar para bloques grandes (a partir de unos 180 ocupantes totales). Estos bloques garantizan el funcionamiento del motor durante más de 6500 horas. Para edificios más pequeños, una posible mejora económica consiste en emplear el motor también para cubrir parte de la demanda de calefacción, aumentando su funcionamiento y, por tanto, su rentabilidad.

Por su parte, el resultado de la comparación entre apoyos depende fundamentalmente del número de viviendas y no de los ocupantes de cada una de ellas.

- Zona climática

A continuación, en las figuras 20 y 21, se muestra la comparación entre los bloques de 6 ocupantes por vivienda para las ciudades de La Coruña y Sevilla, ubicadas en diferentes zonas climáticas.

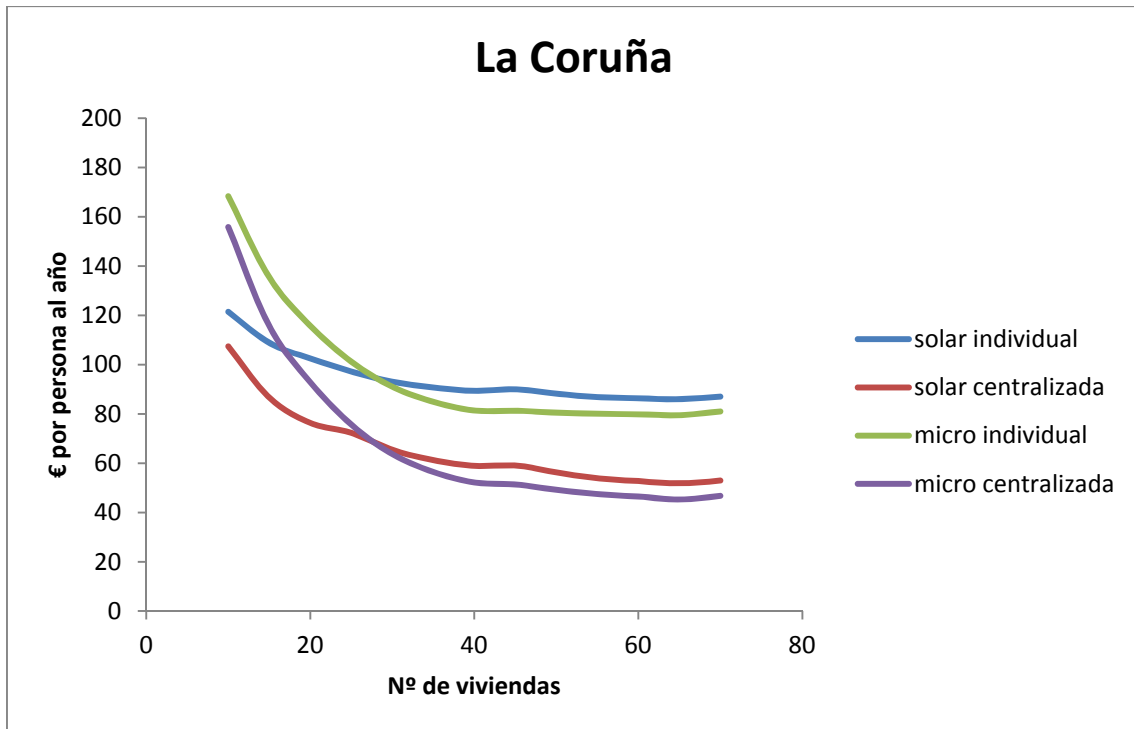


Figura 20. Coste total anual de ACS por persona en bloques de 4 dormitorios por vivienda en La Coruña

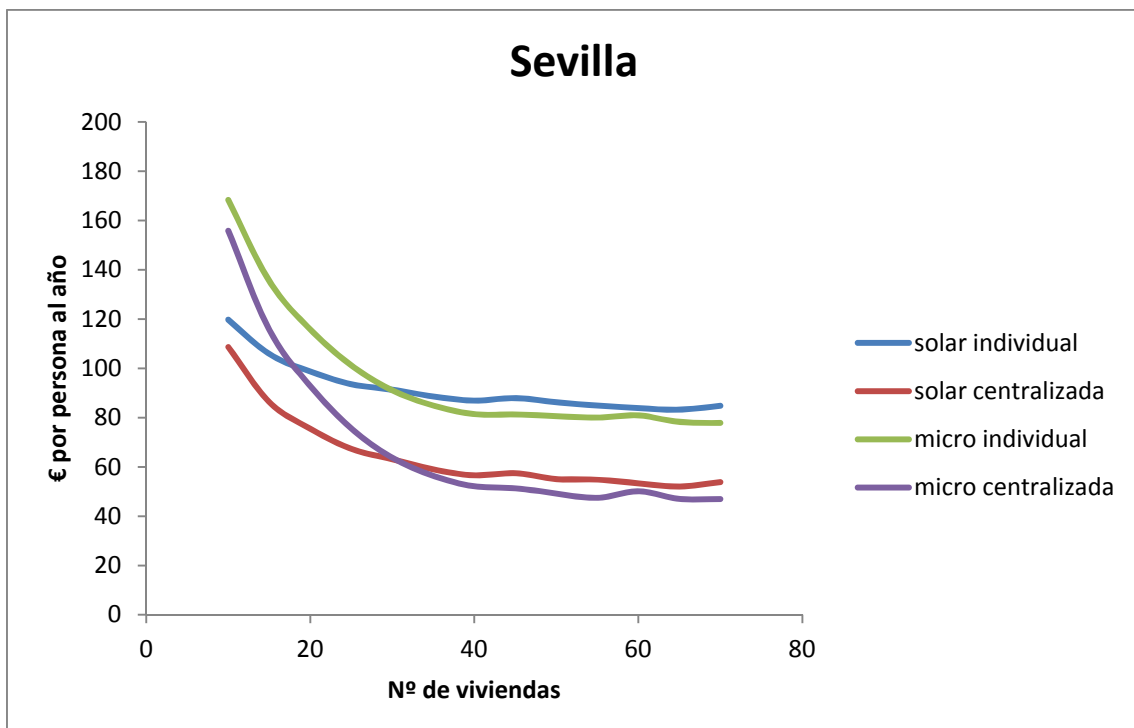


Figura 21. Coste total anual de ACS por persona en bloques de 4 dormitorios por vivienda en Sevilla

Se puede apreciar que en todos los casos, para bloques pequeños, es más económica la energía solar; y para bloques grandes, la microgeneración. La única diferencia se encuentra en el punto de igualdad, que se encuentra más desplazado hacia la derecha cuanto más favorables sean las condiciones de la ciudad para la energía solar.

- Tarifa del régimen especial

Debido a la actual crisis económica, un riesgo que es necesario valorar es la posibilidad de que se retiren las tarifas del régimen especial. De hecho, mientras se redactaba este proyecto el gobierno ha decidido suprimir las primas para nuevas instalaciones -si bien en principio la situación es temporal y no afecta a los equipos que ya se encuentran en marcha-. Si ocurriese esto, la mejor opción sería el autoconsumo de energía, preferible a la comercialización en el libre mercado, ya que el precio de compra de la electricidad es mayor que el de venta.

En la figura 22 se muestran las consecuencias de no disponer de los beneficios del régimen especial, siendo la discontinua la situación con tarifa regulada. De acuerdo con [26], el precio de la electricidad en la tarifa de último recurso durante el primer trimestre de 2012 es de 14,2319 c€/kWh, sin incluir el impuesto sobre la electricidad ni el IVA.

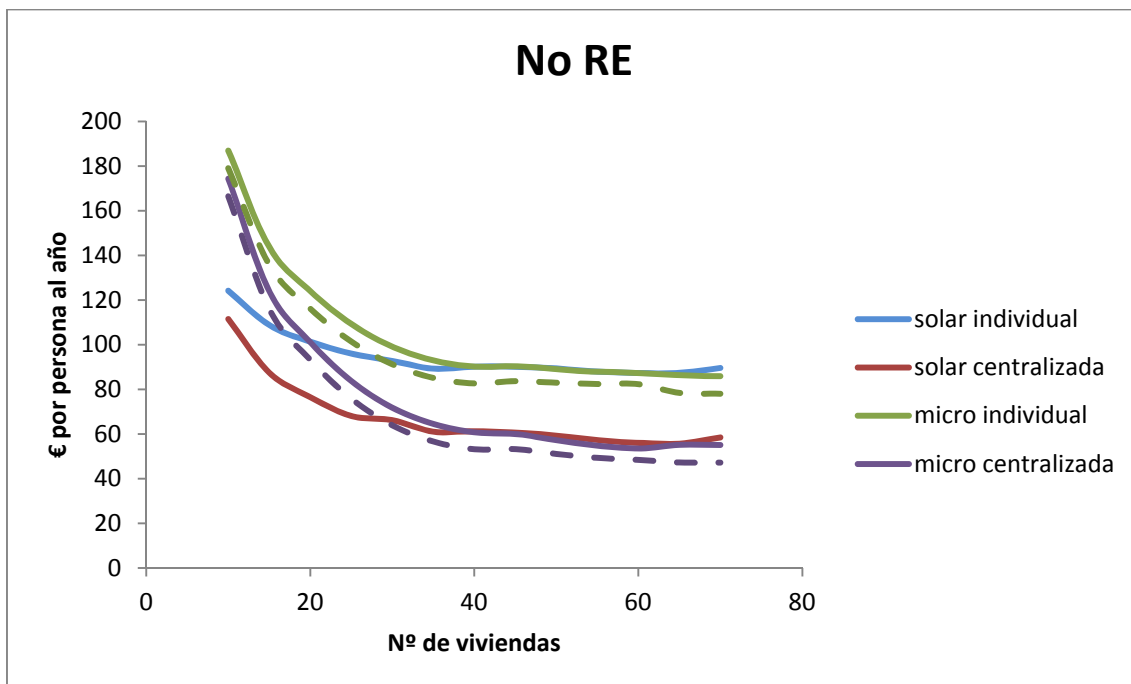


Figura 22. Consecuencias de no disponer de la tarifa del régimen especial en bloques de 6 ocupantes por vivienda de Salamanca

- Otros

Existen otros factores con influencia en el resultado final. En el anexo E se muestran los gráficos correspondientes del estudio, cuyas principales conclusiones son:

- El precio del gas natural. Afecta al porcentaje de demanda que cubre la caldera auxiliar. En el caso de la microgeneración, la tarifa de venta de electricidad se actualizaría teniendo en cuenta la subida del gas, pero no se llegaría a mantener el margen constante, con lo que aumentaría también el coste de dicha tecnología.
- La demanda de agua caliente. Aunque la legislación obligue a utilizar, como mínimo, 22 litros por persona y día para los cálculos, en la realidad la demanda puede ser mayor. En caso de disponer de un equipo de microgeneración sobredimensionado, las consecuencias serían menores, pues tendría capacidad para abastecer la demanda extra, o parte de ella.

6.4. Comparación ambiental

Desde el punto de vista ambiental, el uso de la tecnología solar es claramente preferible frente al equipo de microgeneración. Esto es así porque las placas ofrecen una energía completamente limpia, mientras que el motor, al fin y al cabo, basa su funcionamiento en un proceso de combustión, aunque sea aprovechando al máximo las posibilidades energéticas. Sólo en casos de que el motor cubra mucho más porcentaje del requerido –en ciudades donde se exija poco–, ambas tecnologías podrían ser comparables.

Para saber exactamente cuánto mejor son las placas, necesitaríamos conocer las emisiones que se evitan por la producción de una unidad eléctrica. Con frecuencia, en este tipo de estudios, se toma como referencia un indicador de las emisiones medias de producción eléctrica en España. No obstante, éste no es un indicador real, ya que hay procesos de obtención de energía que son más reemplazables que otros, y que por tanto se verían más afectados. Por ejemplo, las centrales térmicas se adaptan mucho más a las necesidades que los aerogeneradores o las centrales nucleares, aunque las tres tecnologías se tengan en cuenta de la misma forma al hallar la media.

En la tabla 18 se muestra una comparación entre las emisiones producidas por cada uno de los dos sistemas en un bloque de 30 viviendas de 4 dormitorios cada una en las diferentes ciudades analizadas, suponiendo que la electricidad se genera a partir de gas natural. El apoyo se supone centralizado. Las emisiones asociadas al gas natural son de 184 kg de CO₂ por MWh de PCS consumido.

Ciudad	Con energía solar	Con microgeneración		
		Producidas	Evitadas*	Netas
La Coruña	12.155 kg CO₂	26.802 kg CO ₂	14.888 kg CO ₂	11.914 kg CO₂
Salamanca	9.307 kg CO₂	28.486 kg CO ₂	15.823 kg CO ₂	12.663 kg CO₂
Sevilla	5.026 kg CO₂	26.802 kg CO ₂	14.888 kg CO ₂	11.914 kg CO₂

* Se supone un rendimiento de un 52,5% sobre PCI en la central de ciclo combinado, y un 8% de pérdidas en la distribución de energía

Tabla 18. Emisiones anuales asociadas a las instalaciones de producción de ACS, suponiendo apoyo centralizado

Respecto al tipo de apoyo, el centralizado podría ser algo menos eficiente debido al mayor recorrido y a la recirculación, si bien en la legislación se limitan las pérdidas por este motivo. Por otro lado, en los casos de apoyo colectivo se suelen emplear equipos más eficientes que para apoyo individual, pues el coste asociado al consumo durante la vida del equipo tiene más importancia. Así pues, no existe un tipo de apoyo preferible siempre: depende del caso.

7. Análisis comparativo de instalaciones de abastecimiento de ACS más climatización

7.1. Introducción

En este capítulo se realiza un estudio comparativo de diferentes soluciones para abastecer las demandas térmicas (agua caliente y climatización) en un bloque de viviendas. La comparación se realiza entre bombas de calor eléctricas y bombas a gas, que son equipos que pueden abastecer tanto las demandas de calefacción como las de refrigeración.

En el caso de las bombas de calor eléctricas, el equipo empleado como fuente renovable para ACS son los colectores solares, dado que así viene impuesto por la legislación. En cambio, en el caso de bombas de calor a gas es posible sustituir la instalación solar por la generación de ACS a partir del calor residual del motor, siempre y cuando se alcance la cobertura exigida. Esto supone una ventaja competitiva importante de las bombas de calor a gas, que puede favorecer su introducción en el sector residencial. En ambos casos el apoyo será de caldera centralizada, ya que se ha comprobado en el capítulo anterior que suele ser preferible frente al individual.

7.2. Comparación técnica

Desde el punto de vista técnico, la principal diferencia consiste en el mal funcionamiento de las bombas de calor eléctricas en los climas de invierno riguroso: a medida que desciende la temperatura exterior, tanto el rendimiento como la potencia de la bomba disminuyen. Puesto que el diseño debe realizarse para condiciones de bajas temperaturas, el equipo estará sobredimensionado en relación a las necesidades de la mayor parte de las horas del año. Por ello, en algunos casos se opta por limitar la capacidad (y el coste) de la bomba de calor, cubriendo la diferencia hasta la potencia pico en los momentos fríos mediante una caldera auxiliar o una resistencia eléctrica.

Por otro lado, para temperaturas menores de 7°C se forman escarches en las bombas, que deben eliminarse invirtiendo periódicamente el sentido de funcionamiento –es decir, introduciendo calor del ambiente a la bomba-, con el consiguiente descenso del confort del lugar, precisamente cuando más falta hace.

En contraste, para temperaturas menores de 7°C, lo que hace la bomba de calor a gas es emplear el calor residual de la combustión del motor para desescarche y precalentamiento. De este modo, además de evitar la necesidad de sobredimensionar al mantener constante la potencia, conserva las condiciones de confort requeridas.

Así pues, en climas de invierno severo, las bombas de calor a gas son preferibles técnicamente a las eléctricas. En el resto de climatologías ambas soluciones son igual de válidas, ya que el comportamiento es parecido en modo verano.

Por otro lado, la bomba de calor a gas, al evitar la instalación de placas solares, no requiere de la necesidad de disponer del espacio que éstas ocupan en la cubierta.

Por último, es necesario valorar la disponibilidad de la fuente energética empleada por las bombas, que depende del lugar en cuestión. Así, existen casos en que la potencia eléctrica es limitada, y resulta imposible la instalación de una bomba eléctrica para no sobresaturar la red. Sin embargo, también hay zonas –generalmente de montaña– donde no se cuenta con red de distribución de gas.

7.3. Comparación económica

7.3.1. Dimensionado para un caso concreto

En primer lugar, se muestra el dimensionado para un bloque de 28 viviendas repartidas en 7 plantas en Valencia. Cada vivienda tiene 3 ocupantes.

Para el caso considerado, serían necesarias 14 placas solares para alcanzar el 60% de cobertura exigida en Valencia. En la tabla 19 se muestran los resultados mensuales de la cobertura.

Mes	Temperatura de red (°C)	Demanda (kWh)	Energía aportada (kWh)	Cobertura
Enero	8	3456	1252	36,23%
Febrero	9	3061	1477	48,26%
Marzo	11	3256	2019	62,00%
Abril	13	3023	2073	68,58%
Mayo	14	3057	2216	72,48%
Junio	15	2894	2280	78,78%
Julio	16	2924	2484	84,94%
Agosto	15	2990	2445	81,77%
Septiembre	14	2958	2244	75,86%
Octubre	13	3123	1951	62,46%
Noviembre	11	3151	1494	47,41%
Diciembre	8	3456	1156	33,45%
Anual	12,25	37349	23090	61,82%

Tabla 19. Cobertura solar mensual en el bloque de Valencia

Además de los colectores, se emplearía un depósito de 2000 litros, y un intercambiador de 22500 kcal/hora.

Como equipo auxiliar, se emplearía una caldera de 50 kW, apoyada con un depósito de 1000 litros, para cubrir el resto de la demanda de agua caliente.

Las bombas de calor eléctricas deben ser capaces de cubrir tanto la potencia de calefacción (146,2 kW) como la de refrigeración (189,4 kW). Se incluirán tres bombas de calor del modelo 30RQS070. Entre las tres, aportan 209,1 kW de calefacción y 191,7 kW de refrigeración en condiciones Eurovent (que son, respectivamente, 174,8 kW y 191,1 kW en las condiciones extremas anuales de Valencia). El máximo consumo asociado a estas bombas, necesario para el coste fijo asociado a la electricidad, es de 65 kW.

El depósito de inercia debe ser capaz de soportar 15 minutos de la bomba de mayor potencia (que en este caso es cualquiera de las tres). Es decir:

$$\frac{0,25 \text{ horas} * 69,7 \frac{\text{kWh}}{\text{hora}} * 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}}{4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 5\text{K}} = 3001,5 \text{ l}$$

Por tanto, el depósito escogido tiene una capacidad de 3500 litros, pues uno de 3000 andaría algo escaso de volumen.

El consumo eléctrico mensual asociado a las bombas se muestra en la tabla 20.

Mes	Demanda de calefacción (kWh)	Demanda de refrigeración (kWh)	Consumo eléctrico (kWh)
Enero	30859	0	9260
Febrero	23699	0	7052
Marzo	14942	0	4253
Abril	7442	0	2075
Mayo	0	3149	787
Junio	0	15260	4100
Julio	0	26065	7247
Agosto	0	29284	8246
Septiembre	0	10426	2770
Octubre	1554	1374	770
Noviembre	16172	0	4606
Diciembre	29460	0	8729
Anual	124129	85557	59894

Tabla 20. Comportamiento mensual de la bomba de calor eléctrica en Valencia

Por su parte, para el dimensionado de las bombas de calor a gas, se emplearán tres bombas GP710D1, que aportan entre las tres 240 kW de calefacción y 202,5 kW de refrigeración en condiciones Eurovent, que son 240 kW y 200,5 kW en las condiciones extremas de Valencia.

El depósito de inercia, estimado de la misma manera que para las bombas eléctricas, debe ser de 3500 litros. No obstante, ahora hay que añadir un depósito de agua caliente de 2000 litros, que es, más o menos, la demanda del bloque en un día.

En la tabla 21 se muestran los resultados de consumo y de producción de ACS de la bomba.

Mes	Demanda de calefacción (kWh)	Demanda de refrigeración (kWh)	Consumo de gas (kWh de PCS)	ACS producida (kWh)	Cobertura
Enero	30859	0	21326	3344	96,69%
Febrero	23699	0	16175	3000	97,92%
Marzo	14942	0	9628	2792	85,66%
Abril	7442	0	4706	1955	64,62%
Mayo	0	3149	1922	951	31,07%
Junio	0	15260	10047	2605	89,94%
Julio	0	26065	17779	2927	100,00%
Agosto	0	29284	20243	2993	100,00%
Septiembre	0	10426	6784	2171	73,31%
Octubre	1554	1374	1803	818	26,16%
Noviembre	16172	0	10439	2737	86,77%
Diciembre	29460	0	20007	3446	99,63%
Anual	124129	85557	140860	29739	79,55%

Tabla 21. Comportamiento mensual de la bomba de calor a gas en Valencia

Para los precios de la electricidad a pagar por la bomba de calor eléctrica, esas potencias contratadas no entran en la tarifa de último recurso, con lo que se han empleado los costes de la oferta de Iberdrola [27], teniendo en cuenta que para otras empresas los precios son similares. El precio es el siguiente:

Término por potencia-> 24,759775 €/kW al año

Término por energía -> 17,0783 c€/kWh

Ninguno de los dos incluye el impuesto sobre la electricidad.

Para el gas, se utilizan los mismos precios que en el capítulo anterior, es decir, los de la tabla 15.

En la tabla 22 se muestran los resultados económicos del dimensionado, que se han elaborado siguiendo los patrones citados en el anexo D.

PARTIDA		PRECIO	
		BOMBA DE CALOR ELÉCTRICA	BOMBA DE CALOR A GAS
INVERSIÓN INICIAL			
Equipo solar		20.391,80 €	0,00 €
Caldera auxiliar para ACS		6.824,40 €	6.824,40 €
Sistema de distribución de ACS		23.885,40 €	23.885,40 €
Bombas de calor		82.687,60 €	148.472,22 €
Sistema de distribución de climatización		36.175,82 €	36.175,82 €
Sistema de fan-coils		48.818,88 €	48.818,88 €
Instalación receptora de gas		7.000,00 €	10.500,00 €
Sistema de evacuación de gases		600,00 €	600,00 €
Sala de calderas		1.000,00 €	1.000,00 €
Aumento de potencia eléctrica		7.500,00 €	0,00 €
Proyecto	Gastos generales	30.534,91 €	35.915,97 €
	Beneficio del contratista	14.093,03 €	16.576,60 €
IVA		50.312,13 €	59.178,47 €
TOTAL INVERSIÓN INICIAL		329.823,97 €	387.947,76 €
PARTE PROPORCIONAL ANUAL		26.456,16 €	32.471,96 €
COSTE ANUAL			
Coste anual de mantenimiento		3.506,83 €	7.408,80 €
Coste anual de gas		942,61 €	7.934,51 €
Coste anual de electricidad	Aumento de potencia	1.691,67 €	-
	Por consumo	10.751,85 €	-
IVA		3.040,73 €	2.761,80 €
COSTE AL AÑO		19.933,69 €	18.105,11 €
TOTAL			
COSTE TOTAL ANUAL		46.389,85 €	50.577,07 €

Tabla 22. Coste de la instalación de climatización

Las conclusiones fundamentales que se extraen son las siguientes:

- Por un lado, la inversión inicial a realizar es ligeramente mayor en el caso de la bomba de calor a gas. Esto es así porque el equipo es notablemente más caro. Ni siquiera la necesidad de instalar placas solares en el caso de la bomba de calor eléctrica compensa la diferencia.
- Sin embargo, los costes asociados al consumo son algo inferiores en el caso de la bomba de calor a gas. La principal causa de esto es el precio del gas en el mercado, mucho menor que el de la electricidad. También influye la mayor cobertura de la demanda de agua caliente alcanzada por el calor residual de la bomba de calor a gas respecto a la energía solar.

- En este caso concreto, el sistema de climatización mediante bombas de calor eléctricas sale mejor económicamente frente a las bombas de calor a gas. En el siguiente apartado se estudia esta comparación para otros casos.

7.3.2. Análisis de sensibilidad

A continuación, en las figuras 23, 24, 25 y 26 se muestra el resultado del coste total anual por persona a medida que varía el número de viviendas (con la misma ocupación por vivienda) para diferentes climatologías españolas. Cabe destacar que, pese a que la cobertura de ACS con energía solar que se exige a Málaga según [2] es del 60%, existe una ordenanza en Andalucía que obliga a todos los edificios de nueva construcción a alcanzar un 70% de cobertura, con lo que éste ha sido el criterio de dimensionado del equipo solar. Esa ordenanza es [28].

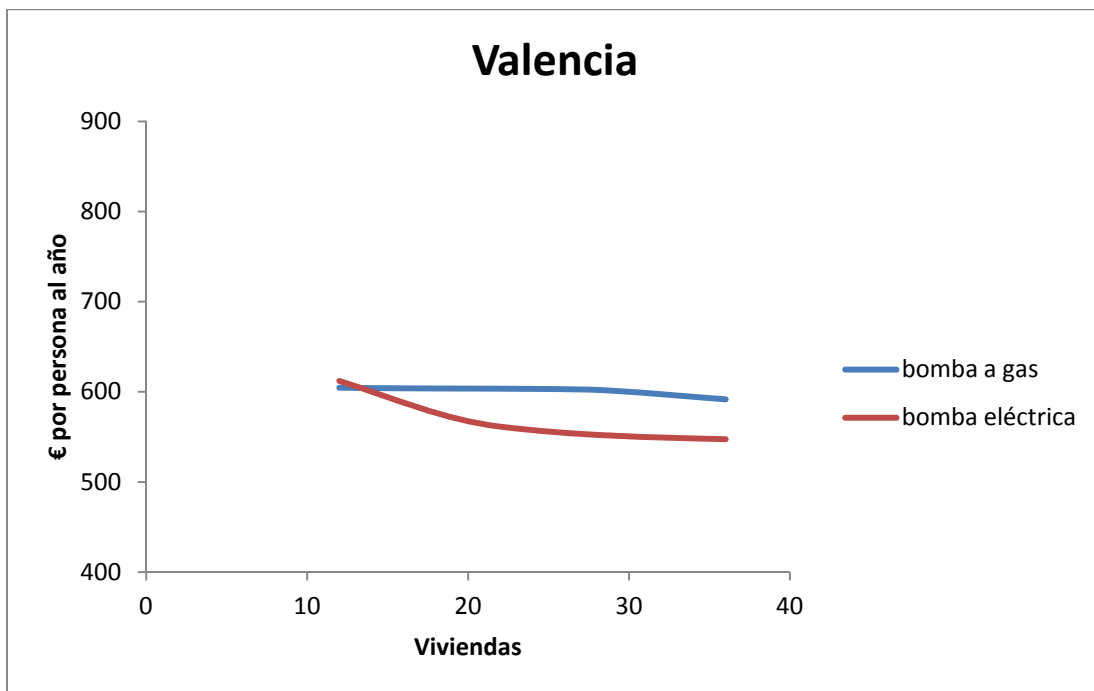


Figura 23. Coste total anual de ACS + climatización por persona en Valencia

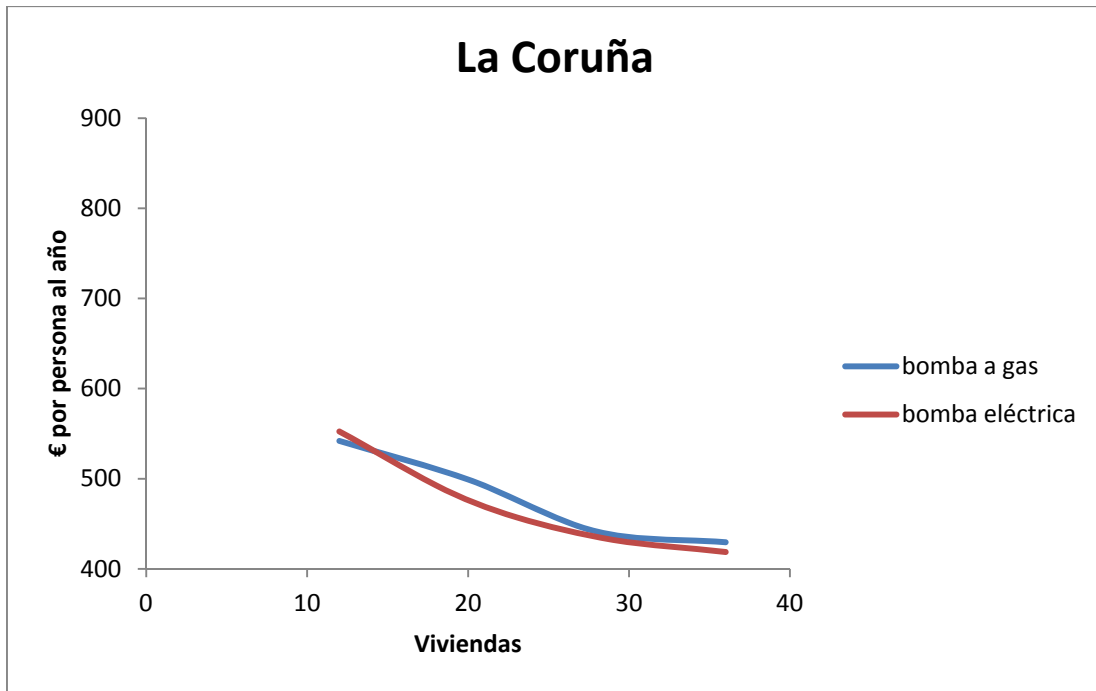


Figura 24. Coste total anual de ACS + climatización por persona en La Coruña

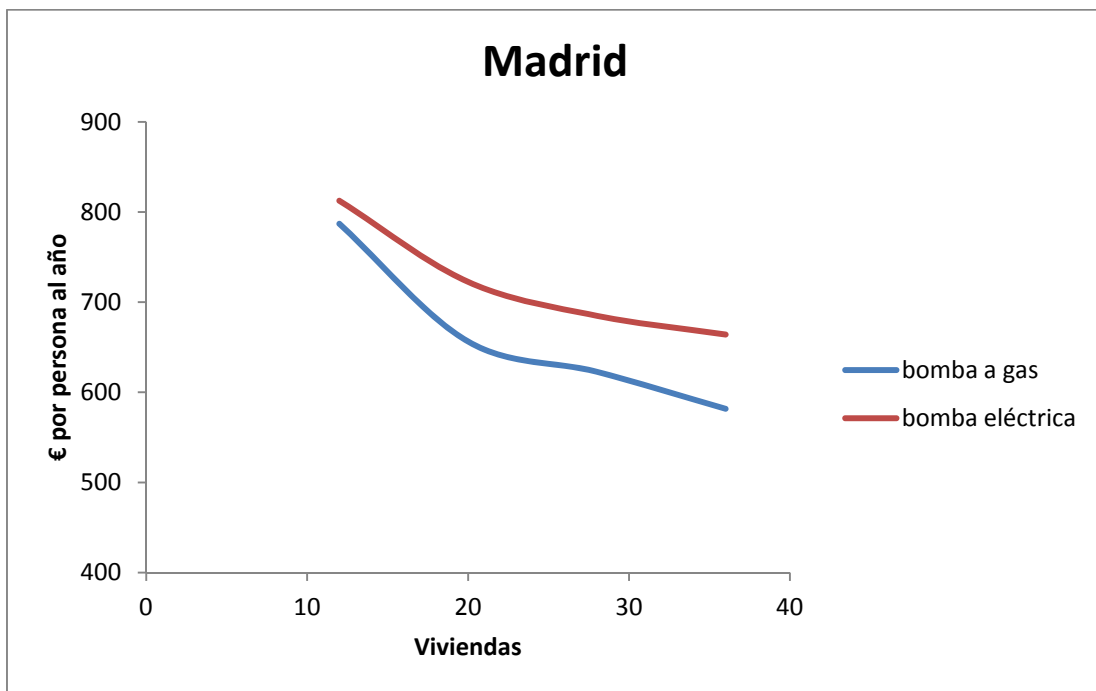


Figura 25. Coste total anual de ACS + climatización por persona en Madrid

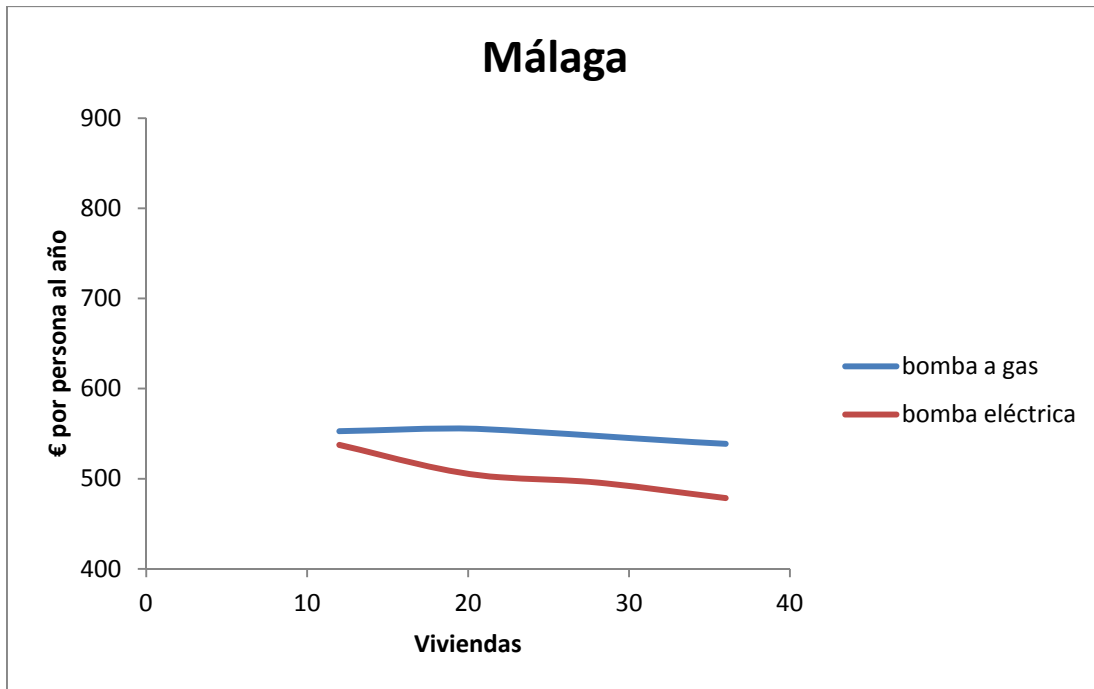


Figura 26. Coste total anual de ACS + climatización por persona en Málaga

En las gráficas mostradas se aprecia la gran influencia de la climatología en el resultado final. En general, se puede decir que, cuando se dimensiona en base a la potencia de calefacción, la bomba de calor a gas sale más rentable que la eléctrica, debido a que no baja su potencia a temperaturas menores que 7 grados. Eso es lo que ocurre en Madrid. Sin embargo, en casos como el de Málaga la mayor potencia es la de refrigeración, lo que hace que la configuración con bomba eléctrica sea mejor económicamente por sus menores costes y también por el mejor funcionamiento de la energía solar.

En Valencia la mejor opción depende del tamaño, ya que la potencia de refrigeración crece comparativamente más que la de calefacción al aumentar el número de viviendas.

Por su parte, en La Coruña, ambas opciones son similares. En realidad, en este tipo de climatologías no vale la pena instalar ni una ni otra, ya que la demanda de refrigeración es prácticamente inexistente, y la de calefacción no compensa el esfuerzo económico a realizar para obtener una eficiencia mayor.

En este caso la sensibilidad respecto al precio de combustible resulta muy difícil de realizar, ya que sería necesario conocer cómo varía el precio de la electricidad al cambiar el del gas. Simplemente, decir que, puesto que son equipos de poco consumo, las consecuencias no serían especialmente importantes.

7.4. Comparación ambiental

Ambientalmente, ambos equipos ofrecen resultados parecidos, pues el consumo en energía primaria es similar. En un caso habría que producir electricidad, p.ej. mediante combustión del gas en una central, y posteriormente transformar esa electricidad en energía mecánica; en la bomba de gas se quema el combustible en el propio equipo, dando lugar directamente al movimiento necesario para el funcionamiento de la bomba.

Obviamente, si se consideran las emisiones medias de la electricidad en España, la bomba de calor eléctrica obtiene mejores resultados que la bomba de calor a gas. No obstante, como se ha comentado en el apartado 6, éste no es un modo justo de evaluar las emisiones, ya que la consecuencia por parte de la red eléctrica de necesitar menos electricidad estaría más encaminada a reducir la potencia producida por una central térmica que a detener un aerogenerador.

A continuación, en la tabla 23, se comparan ambientalmente ambas tecnologías para los casos de 28 viviendas de entre los analizados anteriormente, suponiendo que la electricidad se genera a partir de un ciclo combinado de gas.

Ciudad	Emisiones anuales*	
	Bomba de calor eléctrica	Bomba de calor a gas
La Coruña	22.600 kg CO ₂	20.022 kg CO ₂
Madrid	41.084 kg CO ₂	42.267 kg CO ₂
Valencia	28.454 kg CO ₂	27.557 kg CO ₂
Málaga	21.209 kg CO ₂	21.448 kg CO ₂

* Se supone un rendimiento de un 52,5% sobre PCI en la central de ciclo combinado, y un 8% de pérdidas en la distribución de energía

Tabla 23. Emisiones anuales asociadas a las instalaciones de producción de climatización

8. Conclusiones

El autor del proyecto considera que son dos las aportaciones que se han realizado con la elaboración de este trabajo:

- En primer lugar, se han consultado, analizado, valorado y escogido procedimientos para el dimensionado de equipos de climatización y cobertura de agua caliente. Estos procedimientos incluyen tanto la elección de la magnitud de los equipos, como una valoración económica de la inversión inicial y del coste anual a pagar por el uso de los mismos.
- En segundo lugar, se ha realizado una comparación de varias tecnologías existentes bajo diferentes puntos de vista. El objetivo no es marcar unas pautas absolutas, sino realizar un análisis crítico que pueda ayudar a tomar la decisión correcta, tras valorar todos los aspectos y decidir cuál o cuáles son más importantes en cada caso.

Con estos resultados, los objetivos iniciales del proyecto se consideran cumplidos.

Para trabajos futuros relacionados con el tema, existen dos posibles líneas de actuación, complementarias:

- Por un lado, se podrían analizar y comparar más equipos. En este proyecto se ha pretendido estudiar un conjunto de tecnologías representativas del mercado. No obstante, está claro que existen muchas más configuraciones y tecnologías que, por el alcance del proyecto, no han podido desarrollarse (por ejemplo, energía solar más caldera mixta para calefacción y agua caliente, más enfriadora eléctrica para refrigeración).
- Por otro lado, se podría trabajar en la elaboración de un programa informático que dimensionase las diferentes instalaciones, además de realizar una estimación de la inversión inicial y del coste anual. Esto ayudaría a tener una idea inicial de lo que supondrá la instalación de una determinada tecnología en cada aplicación particular.

A nivel personal, la realización de este proyecto ha sido una manera muy útil de profundizar en el conocimiento de las diferentes tecnologías energéticas domésticas, junto con las ventajas y desventajas de cada una de ellas. Además, la experiencia del trabajo en el LIFTEC ha sido muy provechosa, constituyendo una atractiva posibilidad

de madurar y de aprender, tanto con el director del proyecto como con el personal del centro en general.

La principal dificultad del trabajo la ha constituido la bomba de calor a gas, ya que es sin duda la tecnología menos madura y más desconocida de las que se han analizado. Esto se ha notado a la hora de buscar información, referencias y procedimientos de análisis. En este sentido, es de agradecer el comportamiento mostrado por parte de la empresa Absorsistem, respondiendo a las consultas realizadas y mostrando disponibilidad y amabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Análisis del consumo energético del sector residencial en España. IDAE. 16 de julio de 2011
- [2] Código Técnico de la Edificación. 17 de mayo de 2006
- [3] Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios. 20 de julio de 2007
- [4] Real Decreto 661/2007, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. 25 de mayo de 2007. Su versión actualizada puede consultarse en el BOE
- [5] Escala de calificación energética para edificios de nueva construcción, de IDAE
- [6] Decisión de la comisión de 21 de diciembre de 2006, por la que se establecen valores de referencia de la eficiencia armonizados para la producción por separado de electricidad y calor
- [7] Boletín Oficial del Estado. Consultable en <<http://www.boe.es/boe/dias/2011/12/31/pdfs/BOE-A-2011-20646.pdf>>
- [8] Circular 4/2009, de la Comisión Nacional de Energía, que regula la solicitud de información y los procedimientos para implantar el sistema de liquidación de las primas equivalentes, las primas, los incentivos y los complementos a las instalaciones de producción de energía eléctrica en régimen especial
- [9] Boletín Oficial del Estado. Consultable en <<http://www.boe.es/boe/dias/2011/12/31/pdfs/BOE-A-2011-20649.pdf>>
- [10] Manual de cálculo de las instalaciones solares. Gas Natural. Teoría y problemas. 2004
- [11] Documentación técnica sobre el motor de microgeneración Dachs

- [12] DTIE 10.03. Calderas individuales. Editado por Atecyr. Patrocinado por Saunier Duval
- [13] Calderas murales. Tecnología, clasificación, funcionamiento y reglamentación. Con la colaboración de Roca
- [14] Norma UNE-EN 15459:2008, sobre la evaluación económica de los sistemas energéticos de los edificios
- [15] Análisis de viabilidad de la sustitución de paneles solares por Microgeneración para la obtención de ACS en dos hoteles. Proyecto de fin de carrera de Mónica Casado de Aguinaca. Madrid, junio de 2010
- [16] Instalaciones de Energía Solar Térmica. Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones de Baja Temperatura. IDAE. Enero de 2009
- [17] Sizing of thermal energy storage devices for micro-cogeneration systems for domestic hot water preparation. Theory and experimental results. J. Linares, M. Cledera, B. Moratilla, A. Ibáñez. Madrid, 2011
- [18] Guía del instalador de agua caliente sanitaria. De la casa Junkers
- [19] Prestaciones medias estacionales de equipos y sistemas de producción de frío y calor en edificios de viviendas. Universidad de Sevilla
- [20] DTIE 1.01. Preparación de ACS
- [21] Guía técnica. Instalaciones de calefacción individual. IDAE. 2008
- [22] Documentación técnica sobre las bombas de calor a gas de Absorsistem
- [23] Condiciones de aceptación de programas alternativos a LIDER y CALENER. IDAE. Mayo de 2009
- [24] ASHRAE. Documentación sobre dimensionado de sistemas de climatización en viviendas
- [25] Página web de Gas Natural Fenosa (<<http://portal.gasnatural.com>>)

[26] Boletín Oficial del Estado. Consultable en <<http://www.boe.es/boe/dias/2011/12/31/pdfs/BOE-A-2011-20650.pdf>>

[27] Página web de Iberdrola (<<https://www.iberdrola.es>>)

[28] Decreto 169/2011 de Andalucía, por el que se aprueba el reglamento de fomento de las energías renovables, el ahorro y la eficiencia energética en Andalucía. Del 9 de junio de 2011

