

Sobre la evaluación ecológica de las instalaciones en los edificios

Mariano Vázquez Espí^a Margarita Luxán García de Diego^b
Agustín Hernández Aja^b Gloria Gómez Muñoz

Madrid, 27 de septiembre de 2006

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Eficiencia de instalaciones | 2 |
| 2.1. El caso de la electricidad | 3 |
| 2.2. Hacia una certificación energética de las instalaciones | 3 |
| 3. Un intento de clasificación | 4 |
| 3.1. Redes de suministro de energía | 5 |
| 3.2. Rendimientos de las instalaciones en las viviendas | 5 |
| 4. Mitos y realidades | 7 |
| 4.1. Instalaciones solares: eficiencia | 7 |
| 4.2. Bombas de calor: luces y sombras | 8 |
| 5. Conclusiones | 11 |

1. Introducción

La mayor parte del consumo energético de los edificios tiene lugar durante su uso, a lo largo de su vida útil. Y en los climas y con las costumbres españolas, del orden del 60 % de esa fracción se dedica a climatización y agua caliente sanitaria (ACS). Por tanto, para disminuir el consumo energético global, la primera prioridad debiera ser reducir las necesidades energéticas en esos dos capítulos. En primer lugar, deben considerarse todos los temas de diseño *pasivo*: aislamiento, orientación, ventilación, protección solar, etc; tanto en proyectos de rehabilitación como de nueva construcción, pueden alcanzarse reducciones significativas. Pero, en segundo lugar, para las necesidades energéticas que resten después de eso, hay que plantearse la selección y diseño de las instalaciones correspondientes.¹

En este trabajo se sintetizan varios aspectos de la evaluación ecológica de instalaciones, fruto de la investigación de los autores sobre criterios de sostenibilidad en operaciones de rehabilitación.²

Los impactos ambientales negativos de la edificación (también de sus instalaciones) son multidimensionales: no sólo incluyen el consumo de energías contaminantes o emisiones de dióxido de carbono, tienen que ver con varias formas de contaminación química, consumo de agua dulce, o afecciones territoriales lejanas (minería o tala de bosques). Una consideración global de tales impactos queda fuera del alcance de este trabajo, en el que nos limitaremos a considerar flujos energéticos y algunas de las emisiones contaminantes a la atmósfera. Se trata, por tanto, de un primer paso en el intento de trascender la evaluación corriente, en la que sólo la dimensión monetaria entra en consideración.

^aResponsable del Grupo de Investigación en Arquitectura y Urbanismo Más Sostenibles de la Universidad Politécnica de Madrid (GIAU+S-UPM), <http://habitat.ag.upm.es>.

^bGIAU+S-UPM

¹Para una consideración más detallada de los costes energéticos de la edificación, véase VÁZQUEZ (2001).

²Los autores desean agradecer a la Empresa Municipal de la Vivienda del Ayuntamiento de Madrid la oportunidad que les brindó para realizar esa investigación; así como a Ricardo Tendero, Emilia Román y Mar Barbero las aportaciones realizadas durante su desarrollo.

2. Eficiencia de instalaciones

El rendimiento energético de cualquier instalación que ofrezca un servicio energético tiene una definición típica, la termodinámica:

$$\frac{\text{Energía útil obtenida}}{\text{Energía útil consumida}} \quad (1)$$

La *energía útil obtenida* se cuantifica en el lugar de disfrute del servicio. Para el habitante de un edificio, en ocasiones, el servicio no es en sí un servicio energético, pero el rendimiento mide los efectos del servicio en términos energéticos. Un caso típico es el de la refrigeración: lo que se desea no es energía, sino justamente lo contrario, expulsar calor del ambiente interior; pero ese efecto puede medirse precisamente por la cantidad de calor expulsado.

La *energía útil consumida*, por el contrario, tiene que medirse a lo largo de la cadena completa de producción, transporte y disfrute de la energía útil. Con las técnicas actuales, para tomar esa medida, en general hay que ir muy lejos del lugar de disfrute del servicio energético. La energía al inicio de la cadena suele denominarse energía primaria, y en general puede hablarse de *energía útil primaria consumida*. La noción de *consumo* ('destrucción', v. DRAE) implica que debe ser posible elegir lo contrario, la preservación de esa energía. Cuando tal elección no es posible, se trata de energía disipada irrevocablemente: no es posible ahorrarla. Sin embargo, puede convertirse de todas formas en energía útil si se *recolecta* de alguna forma. Pero, en cualquier caso, no es una energía útil que se destruya³ y por tanto no debe contabilizarse en el denominador del rendimiento. Un ejemplo de tales fuentes energéticas es la energía solar. Por tanto, la energía primaria de origen solar *no debe contabilizarse* en el denominador del rendimiento, pues no es posible 'apagar el Sol'. En consecuencia, dadas las condiciones de *clausura* del planeta, la energía primaria que hay contabilizar es la contenida en los materiales consumidos (usualmente combustibles) para la producción del servicio energético. Con estas precisiones, podemos reformular la definición anterior:

$$\eta = \frac{\text{Servicio obtenido (en unidades de energía)}}{\text{Energía primaria de los combustibles consumidos}} \quad (2)$$

Muchos manuales, como la *Guía de la edificación sostenible* del Ministerio de Fomento, recogen en el denominador sólo la energía consumida en destino, olvidando todo el consumo durante el transporte y la extracción de la materia prima. Este **craso error** introduce el espejismo de rendimientos muy cercanos a la unidad, e incluso mayores que ella, induciendo a pensar en la existencia de auténticas maravillas energéticas. Pero una vez se corrige el error, las aguas vuelven a su cauce: nadie da duros a peseta.

En general, rendimientos mayores que la unidad sólo pueden obtenerse, precisamente, acudiendo a la energía primaria solar o a otras fuentes de energía disipada, tal es el caso de una bomba de calor que simplemente concentra el calor previamente disipado en el ambiente. Incluso en estos casos, no debe olvidarse la energía necesaria para la fabricación de la instalación que, por motivos técnicos, debe acudir en buena medida a combustibles incluso en instalaciones solares. La energía de fabricación, o *energía incorporada*, constituye en ocasiones la parte del león, siendo marginal la energía de operación.

A fin de cuentas, la energía primaria de los combustibles destruidos para la obtención de un servicio energético puede expresarse de forma sintética como:

$$\text{Energía útil destruida} = \text{Energía de fabricación} + \text{Vida útil de la instalación} \times \text{Energía anual de operación} \quad (3)$$

o bien, en términos de potencia:

$$\text{Potencia útil destruida} = \frac{\text{Energía de fabricación}}{\text{Vida útil}} + \text{Potencia de operación} \quad (4)$$

Desafortunadamente, la información disponible sobre la energía de fabricación (*energía incorporada*) y sobre la vida útil es escasa, pues se trata de aspectos que hoy por hoy no reciben apenas atención. Por ello, en general, se maneja un *pseudorendimiento*, η^* , que no la tiene en cuenta y que, por tanto, es mayor que el rendimiento real, $\eta < \eta^*$. Se trata, en consecuencia, de un rendimiento inalcanzable en la práctica. No es este trabajo el lugar adecuado para subsanar esta laguna 'histórica', por lo que nos contentaremos con operar con *pseudorendimientos* (lo habitual), pero siendo sabedores de ello. Las expresiones del tipo "rendimiento del tantos por ciento" deben leerse siempre como "rendimiento menor que el tantos por ciento". El símbolo $<$ se usará sistemáticamente para indicar la referencia a un valor de *pseudorendimiento*.

En resumen:

$$\eta = \frac{\text{Potencia servida}}{\frac{\text{Energía de fabricación}}{\text{Vida útil}} + \text{Potencia de operación}} \quad (5)$$

³La energía no se crea ni se destruye (primera ley), pero su utilidad se pierde al transformarse de una forma a otra: es a esta destrucción a la que se refiere la segunda ley de la termodinámica como "aumento de entropía". La noción de energía útil y de su consumo, permite manejar la segunda ley sin referencias explícitas a la entropía.

siempre menor que

$$\eta^* = \frac{\text{Potencia servida}}{\text{Potencia de operación}} \quad (6)$$

La falta de datos para considerar la energía de fabricación deja fuera de foco un aspecto muy importante de la eficiencia energética: la *durabilidad* de la instalación. En el caso de los servicios energéticos más tradicionales (calefacción, agua caliente sanitaria), en los que cabe esperar una vida útil larga para la instalación, la energía incorporada sin ser marginal no es sustancial. Pero una corta vida útil puede convertir en sustancial un valor pequeño, en términos absolutos, de la energía incorporada, incluso en el caso de instalaciones con un rendimiento de operación elevado. (Así ocurre, por ejemplo, en los servicios ‘electrónicos’, cuya energía incorporada *no es* en origen marginal, y que ve incrementada su importancia en el rendimiento global por una vida útil cada vez más pequeña, como en el caso de los teléfonos móviles, y los ordenadores portátiles o de sobremesa.)

2.1. El caso de la electricidad

Un ejemplo puede servir para fijar ideas. El caso de la producción de electricidad ha sido detalladamente analizado por VALERO (1999). En nuestro país, la extracción y puesta a pie de central eléctrica de los combustibles empleados tiene un rendimiento η del orden de 0,85; la propia central opera con *pseudorendimientos*⁴ η^* en torno al 0,36; los procesos de abatimiento de las emisiones más contaminantes operan con un rendimiento $\eta^* = 0,9$; el transporte en la red se efectúa con un rendimiento $\eta^* = 0,9$. En definitiva el rendimiento del proceso desde la ‘mina’ hasta la diferencia de potencial en los bornes en una vivienda es $\eta < 0,25$. Finalmente, al enchufar un aparato eléctrico, tal y como una bomba de calor, con un *pseudorendimiento* de operación $\eta^* = 3$, obtenemos un servicio energético con un rendimiento menor que 0,75. Fuentes como la *Guía de la edificación sostenible*, confunden el *rendimiento del servicio* con el *pseudorendimiento de operación del aparato*, creando una enorme confusión a la hora de evaluar la eficiencia energética y comparar entre soluciones alternativas.

2.2. Hacia una certificación energética de las instalaciones

A la hora de realizar un proyecto ¿qué información se precisa para una evaluación del rendimiento real de distintas instalaciones alternativas para un mismo servicio? Pongamos por caso un simple calentador de agua caliente. Durante su fabricación se habrá consumido una energía útil \mathcal{E}_f . El aparato será capaz de suministrar una potencia útil \mathcal{P}_s (en términos de agua caliente, pero medida en unidades de potencia), consumiendo una potencia \mathcal{P}_c . Y dadas sus características se garantiza que el aparato funcionará durante un tiempo t , de forma que a lo largo de su vida útil podría suministrar una energía $\mathcal{P}_s \times t$ consumiendo para ello una energía $\mathcal{E}_c = \mathcal{P}_c \times t$. Vemos pues que la vida útil puede medirse en tiempo o en energía, ya sea servida o consumida.

El rendimiento de operación del aparato o *pseudorendimiento* está dado por:

$$\eta^* = \frac{\mathcal{P}_s}{\mathcal{P}_c} = \eta_{\text{ap}}^* \times \eta_{\text{red}} \quad (7)$$

en donde η_{ap}^* es el *pseudorendimiento* del aparato (generalmente suministrado por el fabricante; es el manejado por la *Guía de la edificación sostenible*), y η_{red} es el rendimiento de la red de suministro del combustible empleado.

El rendimiento global según la definición de más arriba será:

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_s}{\frac{\mathcal{E}_f}{t} + \mathcal{P}_c} \quad (8)$$

Comparando ambas expresiones se ve como el rendimiento global es siempre necesariamente menor que el *pseudorendimiento* de operación, en el que no se tiene en cuenta ni los costes de fabricación ni la vida útil de la instalación.

En consecuencia, una certificación energética de las instalaciones que resultara estable y útil para comparar unas instalaciones con otras requeriría hacer disponible la siguiente información *en el momento del proyecto*:

η_{ap}^* : Rendimiento de operación del aparato, suministrada por el fabricante y certificado por la administración competente (Industria). Esta información está parcialmente disponible en la actualidad: las

⁴En el rendimiento de operación de las centrales eléctricas no se suele tener en cuenta la energía necesaria para fabricarlas: su simple consideración cualitativa basta para deshacer la superstición de que las centrales de fisión no producen emisiones de CO₂.

certificaciones y homologaciones al uso consideran generalmente el *máximo rendimiento* del aparato, en condiciones óptimas de uso. Sin embargo, el uso real nunca opera en tales condiciones si no en un amplio abanico de condiciones cambiantes, durante las que el rendimiento varía: se necesita avanzar hacia definiciones consistentes de rendimientos medios de operación en condiciones estándar (no necesariamente óptimas). Curiosamente, tan sólo en el caso de los colectores solares de energía térmica se dispone de información sobre el rendimiento en un cierto abanico de condiciones de operación.

\mathcal{E}_f : Energía incorporada en la fabricación del aparato, suministrada por el fabricante y certificada por la administración competente (Industria). Se carece por completo de esta información, salvo las estimas realizadas en investigaciones académicas.

t ó \mathcal{E}_c : Vida útil de *operación del aparato*, ya sea en tiempo de operación ya sea en energía primaria consumida durante ese tiempo, suministrada por el fabricante y certificado por la administración competente (Industria). Como en el caso anterior, se carece de esa información.

η_{red} : Rendimiento global de la red, suministrado por la administración competente (Medio Ambiente, Economía y/o Industria). No existe una información clara al respecto.

Sin esa información, las decisiones de proyecto, por bien intencionadas que quieran ser, serán inciertas en un cierto grado, y en el peor de los escenarios, desencaminadas respecto al objetivo de minorar el consumo energético.

3. Un intento de clasificación

Los rendimientos finitos indican siempre la emisión simultánea de contaminantes, típicamente dióxido de carbono. Puesto que la combustión siempre es imperfecta y los reactivos suelen incluir otras sustancias además de las estrictamente combustibles (por ejemplo, el aire aporta oxígeno, pero también nitrógeno, dióxido de carbono, etc), hay otras emisiones contaminantes, que se producen incluso con rendimientos mayores que la unidad (caso de la madera de fuentes renovables).

En teoría, todas estas emisiones podrían evitarse en origen mediante procesos de *abatimiento* de las emisiones, lo que usualmente ocasionaría nuevos consumos de energía primaria y la consiguiente reducción del rendimiento. Es decir, en un entorno teórico de producción industrial limpia, el coste de eliminar emisiones perjudiciales quedaría integrado en el rendimiento de la instalación y, por tanto, varias de ellas podrían compararse con el único criterio de su eficiencia. Pero, al igual que ocurre con la energía de fabricación, hay una carencia estructural de información fiable sobre tales costes. (Además, nuestro contexto industrial queda muy lejos de ser *limpio*.)

Como alternativa a un criterio único, en ocasiones se ha propuesto una clasificación multicriterio, en la que además del rendimiento de instalaciones *no limpias*, se tiene en cuenta sus emisiones contaminantes *de facto*. Sin embargo, este enfoque depende en exceso de la *coyuntura epistemológica* de cada momento: de cuáles son las emisiones que reconocemos hoy como contaminantes e, incluso, de cuáles son las emisiones de las que en efecto tenemos constancia. Por citar un ejemplo clásico, los primeros sistemas de refrigeración que incorporaron compuestos clorofluorcarbonados (CFC) en 1920, lo hicieron pensando que se sustituía un compuesto muy inseguro como el amoníaco por otro inerte; décadas más tarde se descubrió el efecto de dichas sustancias sobre la capa de ozono, etc (VALE & VALE, 1991:19–20). De igual forma, resulta difícil establecer un marco de valoración compartido para algunos residuos, como los radiactivos de las centrales de fisión.

Hay otra razón que desaconseja usar el flujo de emisiones como criterio en el caso de muchos servicios energéticos: la posibilidad demostrada de usar instalaciones limpias, basadas en energía solar, que garantizan la satisfacción del servicio sin emisiones relevantes. En nuestro país, esta situación es clara en lo que se refiere al agua caliente sanitaria; seguir usando otro tipo de instalaciones no puede justificarse por referencia a su rendimiento o a sus emisiones (aunque sin duda, en casos concretos, puede haber otros motivos que hagan el uso de aquellas inviable). Este argumento es especialmente relevante respecto a algunas emisiones críticas, como la de *contaminantes orgánicos persistentes* (COP), respecto a las cuales hay consenso en que no puede ni debe permitirse su emisión en ninguna circunstancia, dada su elevada toxicidad y el coste, prácticamente infinito, de su abatimiento (una vez más, la información sobre tales emisiones para técnicas concretas es prácticamente inexistente).

Todo lo anterior apunta a que, en la actual coyuntura, la fijación de criterios o recomendaciones, no debe hacerse de un modo *aparentemente* objetivo con base a los guarismos del *pseudorrendimiento* o del flujo de emisiones. Junto a esta información, sin duda relevante, debe analizarse también las oportunidades o conveniencias de detalle para cada situación, servicio o instalación considerada como alternativa. Y, por tanto, las recomendaciones (positivas o negativas) que puedan hacerse deben estar sujetas a crítica y a su

futura revisión. Lo que resulta muy conveniente, dado que en la actual coyuntura lo que está sobre todo en juego es realizar una *transición* desde una economía insostenible hacia otra que deje de serlo: no basta saber cual sería un buen punto de llegada, *también es imprescindible* poder trazar un camino para llegar allí.

3.1. Redes de suministro de energía

Se han considerado las que figuran en el Cuadro 1. Aunque hay pequeñas diferencias, no se ha hecho distinción entre el gas natural y los gases licuados de petróleo. La definición de los parámetros considerados es:

η^* : *pseudorendimiento* de la red, desde la mina a ‘pie de edificio’, sin incluir el coste energético del abatimiento de las emisiones efectivas, ni los costes de fabricación de la red.

Emisiones: masa por unidad de energía útil suministrada, de las siguientes sustancias:

CO₂: dióxido de carbono (efecto invernadero)

Polución: SO₂, NO_x y partículas sólidas (lluvia ácida, nieblas urbanas)

Tóxicos: compuestos orgánicos volátiles y monóxido de carbono

Debe tenerse en cuenta que las emisiones consideradas *no reflejan* todas las emisiones potencialmente contaminantes ni la totalidad de los impactos ambientales, muchos de ellos graves. Por ejemplo, el uso de madera sin gestión de su renovación puede ocasionar la pérdida irrevocable de ecosistemas únicos.

Para el uso directo de la energía solar, se ha adoptado un *pseudorendimiento* de 100, dado que en términos de uso, la ‘red’ solar tiene un rendimiento infinito (o un coste nulo).

Cuadro 1: Rendimiento y emisiones en redes de suministro de energía en España
Fuentes: NAREDO & VALERO (1999); NORGARD (1993); *Guía de la edificación sostenible* del Ministerio de Fomento; SEDIGAS (2004); y elaboración propia.

| Energía suministrada | Rendimiento η^* | Emisiones (g/kWh) | | |
|----------------------|-------------------------|-------------------|----------------------|---------|
| | | CO ₂ | Polución atmosférica | Tóxicos |
| electricidad | 0,25 | 462 | 8,090 | 0,113 |
| energía solar | 100,00 | 0 | 0,000 | 0,000 |
| gas | 0,90 | 243 | 0,280 | 0,052 |
| gasóleo | 0,85 | 307 | 1,220 | 0,063 |
| madera no renovable | 0,97 | 590 | 4,610 | 0,905 |
| madera renovable | 10,00 | 0 | 4,610 | 0,905 |

3.2. Rendimientos de las instalaciones en las viviendas

A parte de las instalaciones de energía solar, cuyo uso reporta ventajas en términos de rendimiento (mayores que la unidad) y de emisiones contaminantes mínimas, deben considerarse las instalaciones convencionales. En el Cuadro 2 se aporta el *pseudorendimiento* global y las emisiones contaminantes de las instalaciones típicas. Como en el caso de las redes (Cuadro 1), la información aportada no recoge todos los impactos ambientales.

Las clasificaciones al uso, basadas en una única dimensión, permiten establecer un orden *total* entre alternativas, de forma que puede decirse unívocamente si una alternativa es mejor o peor que otra. La clasificación que ofrece el Cuadro 2 en la columna ‘Clase’ es el resultado de un análisis multidimensional, considerando cuatro dimensiones: el *pseudorendimiento* global y las tres emisiones contaminantes consideradas.

Como consecuencia, se trata de un orden *parcial* en el que sólo puede afirmarse de manera inequívoca que cada instalación perteneciente a una clase es **peor** que al menos una de las instalaciones de la clase superior, siendo esta última la solución alternativa para mejorar el proyecto. Pues ‘peor’ significa aquí, peor en las cuatro dimensiones, es decir, menor *pseudorendimiento* global y mayores valores en las tres emisiones contaminantes. En la Figura 1 se representa este orden parcial para las instalaciones de calefacción.

Sin embargo, de dos instalaciones pertenecientes a la misma clase, tan sólo puede decirse que ninguna de ellas es **peor** —en el sentido anterior— que la otra: la elección entre ellas habrá de basarse en consideraciones adicionales. Por ejemplo, para ACS, la clase II la forman una bomba de calor a gas y una caldera

Cuadro 2: Rendimiento y emisiones en instalaciones de edificios

En la columna 'Clase' se indica la clase a la que pertenece la instalación cuando se ordenan con los criterios de máximo rendimiento y mínimas emisiones. η^* : pseudorendimiento global; η_{ins}^* : pseudorendimiento de la instalación; η_{red}^* : pseudorendimiento de la red de suministro.

No está contabilizada la energía ni las emisiones de fabricación, ni la durabilidad. Tampoco están contemplados otros aspectos importantes como el carácter individual o colectivo de los mecanismos de control o las costumbres del usuario. Factores todos ellos que, en ocasiones, pueden alterar sustancialmente la eficacia global de cada instalación.

Fuentes: NORGARD(1993); *Guía de la edificación sostenible* del Ministerio de Fomento; EU(2002); SEDIGAS(2004) y elaboración propia.

| Instalación | Rendimientos | | | Emisiones (g/kWh) | | | Clase |
|---|----------------|----------------|--------------|-------------------|----------|---------|-------|
| | η_{ins}^* | η_{red}^* | η^* | CO ₂ | Polución | Tóxicos | |
| Agua caliente sanitaria | | | | | | | |
| Bomba de calor a gas | 1,70 | 0,90 | 1,53 | 143 | 0,165 | 0,031 | II |
| Bomba de calor eléctrica | 2,35 | 0,25 | 0,59 | 197 | 3,443 | 0,048 | III |
| Caldera a gas con recuperación | 0,85 | 0,90 | 0,77 | 286 | 0,329 | 0,061 | V |
| Caldera a gas de condensación | 0,95 | 0,90 | 0,85 | 256 | 0,295 | 0,055 | III |
| Caldera de gasóleo | 0,85 | 0,85 | 0,72 | 361 | 1,435 | 0,074 | VI |
| Caldera de madera no renovable | 0,60 | 0,97 | 0,58 | 983 | 7,683 | 1,508 | VII |
| Caldera de madera renovable | 0,60 | 10,00 | 6,00 | 0 | 7,683 | 1,508 | II |
| Caldera eléctrica de acumulación | 0,84 | 0,25 | 0,21 | 550 | 9,631 | 0,135 | IX |
| Calentador eléctrico instantáneo | 0,90 | 0,25 | 0,23 | 513 | 8,989 | 0,126 | VII |
| Calentador o caldera a gas (tradicionales) | 0,86 | 0,90 | 0,77 | 283 | 0,326 | 0,060 | IV |
| Colector solar de agua a baja temperatura | 0,40 | 100,00 | 40,00 | 0 | 0,000 | 0,000 | I |
| Termos eléctricos | 0,88 | 0,25 | 0,22 | 525 | 9,193 | 0,128 | VIII |
| Calefacción | | | | | | | |
| Acumuladores eléctricos | 0,92 | 0,25 | 0,23 | 502 | 8,793 | 0,123 | XII |
| Bomba de calor a gas con recuperación | 1,44 | 0,90 | 1,30 | 169 | 0,194 | 0,036 | III |
| Bomba de calor a gas sin recuperación | 1,26 | 0,90 | 1,13 | 193 | 0,222 | 0,041 | IV |
| Bomba de calor eléctrica | 2,50 | 0,25 | 0,62 | 185 | 3,236 | 0,045 | IV |
| Bomba de calor solar (absorción de simple efecto) | 0,40 | 100,00 | 40,00 | 0 | 0,000 | 0,000 | I |
| Caldera a gas con quemador atmosférico | 0,85 | 0,90 | 0,77 | 286 | 0,329 | 0,061 | VII |
| Caldera a gas de condensación | 0,95 | 0,90 | 0,85 | 256 | 0,295 | 0,055 | VI |
| Caldera de gasóleo | 0,85 | 0,85 | 0,72 | 361 | 1,435 | 0,074 | VIII |
| Caldera eléctrica de acumulación | 0,84 | 0,25 | 0,21 | 550 | 9,631 | 0,135 | XIII |
| Colector solar de agua a baja temperatura | 0,30 | 100,00 | 30,00 | 0 | 0,000 | 0,000 | II |
| Convectores murales a gas | 0,80 | 0,90 | 0,72 | 304 | 0,350 | 0,065 | VIII |
| Convectores y radiadores eléctricos | 1,00 | 0,25 | 0,25 | 462 | 8,090 | 0,113 | X |
| Estufa de madera no renovable | 0,60 | 0,97 | 0,58 | 983 | 7,683 | 1,508 | X |
| Estufa de madera renovable | 0,60 | 10,00 | 6,00 | 0 | 7,683 | 1,508 | III |
| Estufas a gas | 1,00 | 0,90 | 0,90 | 243 | 0,280 | 0,052 | V |
| Generadores de aire, a gas | 0,71 | 0,90 | 0,64 | 342 | 0,394 | 0,073 | IX |
| Techos y suelos radiantes eléctricos | 0,93 | 0,25 | 0,23 | 497 | 8,699 | 0,122 | XI |
| Refrigeración | | | | | | | |
| Bomba de calor a gas | 1,10 | 0,90 | 0,99 | 221 | 0,255 | 0,047 | II |
| Bomba de calor eléctrica | 2,25 | 0,25 | 0,56 | 205 | 3,596 | 0,050 | II |
| Bomba de calor solar (absorción de simple efecto) | 0,20 | 100,00 | 20,00 | 0 | 0,000 | 0,000 | I |
| Máquinas de absorción a gas, efecto doble | 0,81 | 0,90 | 0,73 | 300 | 0,346 | 0,064 | III |
| Máquinas de absorción a gas, efecto simple | 0,54 | 0,90 | 0,49 | 450 | 0,519 | 0,096 | IV |

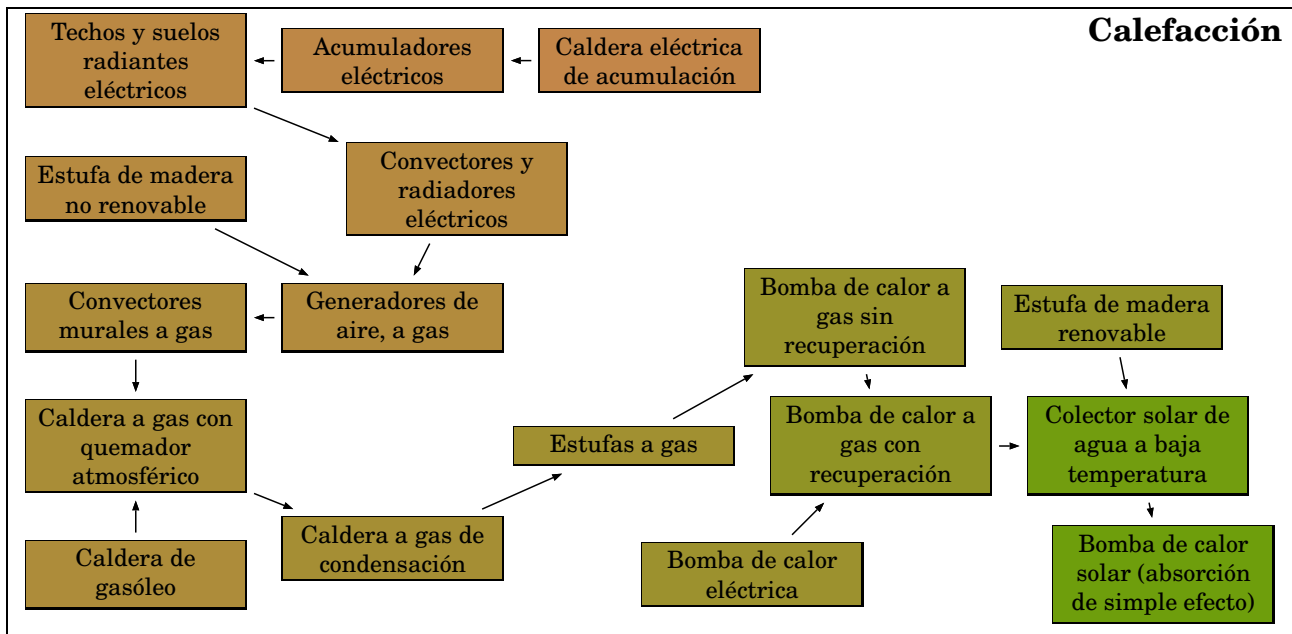


Figura 1: Clasificación de las instalaciones de calefacción

Cada instalación apunta a una alternativa que es mejor en las cuatro dimensiones consideradas, véase el Cuadro 2.

de madera renovable; observando el Cuadro 2 se observa que la primera presenta menor polución y menores emisiones tóxicas, mientras que la segunda presenta mayor *pseudorendimiento* global y menores emisiones de CO₂.

4. Mitos y realidades

Al comparar el Cuadro 2 con el ya mencionado de la *Guía de la edificación sostenible* se ven dos panoramas radicalmente diferentes. Y no sólo se trata de que el Cuadro 2 ofrezca un panorama más realista, sobre todo de que es una panorama más complejo e incierto, en el que a la hora de tomar decisiones se nos exige un *conocimiento* más detallado. De hecho, siempre pasa algo así cuando entre los valores a considerar se introduce la *sostenibilidad*.

No faltan obstáculos para avanzar en esa dirección. En particular, los hábitos heredados de los análisis unidimensionales que han sido los corrientes hasta hoy mismo, siguen propiciando toda suerte de equívocos que, en ocasiones, exageran la incertidumbre de nuestro conocimiento y capacidad de previsión, introduciendo dudas justamente allí donde, a pesar de la incertidumbre, podemos obtener una razonable certeza. Merece pues la pena hacer algo de luz sobre estos equívocos, entre los que hemos escogido dos ejemplos que nos parecen muy ilustrativos.

4.1. Instalaciones solares: eficiencia

Respecto a las instalaciones solares hay que salir al paso de algunas consideraciones confusas que, desgraciadamente, son todavía muy habituales. El núcleo central de la confusión puede ilustrarse con las siguientes preguntas:

- ¿En que plazo se amortiza energéticamente una instalación solar?
- ¿Captura un panel fotovoltaico tanta energía como la necesaria para fabricarlo?

Lo primero a señalar es que este género de preguntas está absolutamente desenfocado. Veámos por qué. Una caldera de gas para calefacción (o cualquier instalación de aporte energético similar) **nunca se amortiza energéticamente**: tanto si su coste energético de fabricación es muy elevado como si es pequeño, tanto si dura mucho como poco, a lo largo de su vida consumirá **más** energía útil y producirá **más** contaminación. Por tanto si, como es el caso, se acepta socialmente el uso de calderas de gas en tales condiciones, en *esas mismas condiciones* debe aceptarse el uso de otras instalaciones que puedan proyectarse. Sólo cuando se prohibiera o se renunciara de modo genérico al uso de instalaciones que no pueden amortizarse energéticamente tendría sentido formular tales preguntas.

Por supuesto que las instalaciones de energía solar tienen actualmente un coste energético de fabricación que no es nulo y, por tanto, no cabe decir que sean instalaciones perfectamente limpias. Pero si en el caso de otras instalaciones no se tiene en cuenta ese coste, no tiene sentido penalizar las instalaciones solares con su consideración. Porque de lo contrario, caeríamos en el contrasentido de investigar la más mínima huella de contaminación en instalaciones potencialmente limpias, mientras que nos olvidaríamos de una fracción de la contaminación en aquellas otras de las que tenemos constancia de que son contaminantes. El avance en el conocimiento del rendimiento y el coste globales de *cualquier* instalación debe proseguir ampliando la cadena contable hasta donde sea posible, pero siempre conservando la *comparabilidad* de los resultados para distintas alternativas. Es por ello que en el Cuadro 2 no se ha contabilizado ninguna emisión para las instalaciones solares: sabemos que tales emisiones existen durante la fabricación, pero ante la ausencia de información comparable para *todas* las instalaciones consideradas, hemos prescindido de esos costes para todas ellas.

Resulta además que, paradójicamente, se tiene más información sobre los costes globales de todo tipo de paneles solares que, por ejemplo, de bombas de calor. En el caso de los paneles fotovoltaicos, por ejemplo, una evaluación muy detallada de su amortización energética la situaba entre 1 y 5 años en las condiciones climáticas de Holanda (véase PHYLIPSEN & ALSEMA, 1995:50), lo que sitúa el *rendimiento global* entre 6 y 15, dependiendo de la vida útil del panel (entre 15 y 30 años), que se compara muy favorablemente con el anteriormente calculado de 0,25 para la red eléctrica española.

Finalmente, puede ser muy ilustrativo ver que pasaría si una instalación solar fuera tan ineficiente o de tan corta vida como para que sólo recolectara la misma cantidad de energía empleada en su fabricación e instalación: estaríamos ante una instalación con un rendimiento global de 1, lo que se compara favorablemente con instalaciones contaminantes tradicionales con *pseudorendimientos* menores que la unidad. A fin de cuentas, rendimientos menores que la unidad implican pérdidas sostenidas en el tiempo, que es lo que pretendemos evitar ‘ganando’ energía del Sol. Los rendimientos mayores que la unidad, por el contrario, indican la cantidad de energía limpia que ganamos del Sol por cada unidad de energía contaminante invertida; sólo en este caso, el aumento de la durabilidad del artefacto tiene como resultado una ganancia solar sostenida.

4.2. Bombas de calor: luces y sombras

Las técnicas de aporte de calor tradicionales operan convirtiendo el combustible en calor *dentro* del espacio acondicionado, calor que espontáneamente fluirá desde el interior caliente hacia el espacio exterior frío. La novedad de la bomba de calor reside en que la energía suministrada, frecuentemente electricidad, se usa para *bombear* calor desde el espacio inmediatamente exterior hacia el interior del edificio, en contra del gradiente de temperaturas. Aunque el proceso práctico es complicado, el funcionamiento teórico de una bomba de calor es análogo a una bomba de agua: se trata de bombear calor desde una fuente fría a una caliente, en sentido contrario al flujo espontáneo. Para ello, como en una bomba de agua, es necesario realizar un trabajo, consumiendo energía útil.

La diferencia señalada entre el aporte de combustibles y el aporte mediante ‘bombeo’ hace que la comparación entre ambas técnicas no sea, de hecho, una comparación *caeteris paribus*. Este hecho ya fue advertido en la literatura teórica, aunque como veremos de forma ambivalente. Por el lado positivo:

... es infinitamente más rentable usar una cantidad mínima de esta energía de cinco estrellas [electricidad], altamente concentrada, para acumular la energía antigua desordenada y de baja calidad que yace en nuestros patios y concentrarla dentro de la casa. ¡Esto sí que constituye una gestión eficiente de los recursos energéticos!

ATKINS (1984:135-136)

En el párrafo citado, ATKINS, físico de formación y reconocido investigador en mecánica cuántica, se queda *maravillado* sobre todo por la idea de que la bomba de calor de alguna forma reutiliza o recicla una energía térmica que, debido a su dispersión, ya no sirve propiamente para nada. También queda *maravillado* por el elevado rendimiento *teórico* del aparato, esa «cantidad mínima» de energía, aunque aquí pierde de vista el bajo rendimiento en la generación de la «energía de cinco estrellas», un error común tal y como hemos analizado más arriba. Que un físico del prestigio de ATKINS caiga en ese error, muestra lo fácil que es caer en él cuando ni los objetivos que se persiguen ni el método empleado son claros (ATKINS hace estas observaciones casuales en el contexto de una obra sobre el concepto de entropía, con unos objetivos en mente que nada tienen que ver con lo que tratamos aquí). La situación se muestra en la Figura 2, en la que para la bomba de calor se usa un rendimiento real, es decir, aquel que puede obtenerse con bombas disponibles comercialmente.

Pero en lo que se refiere al uso masivo de bombas de calor, ATKINS también acierta a ver un cierto lado negativo:

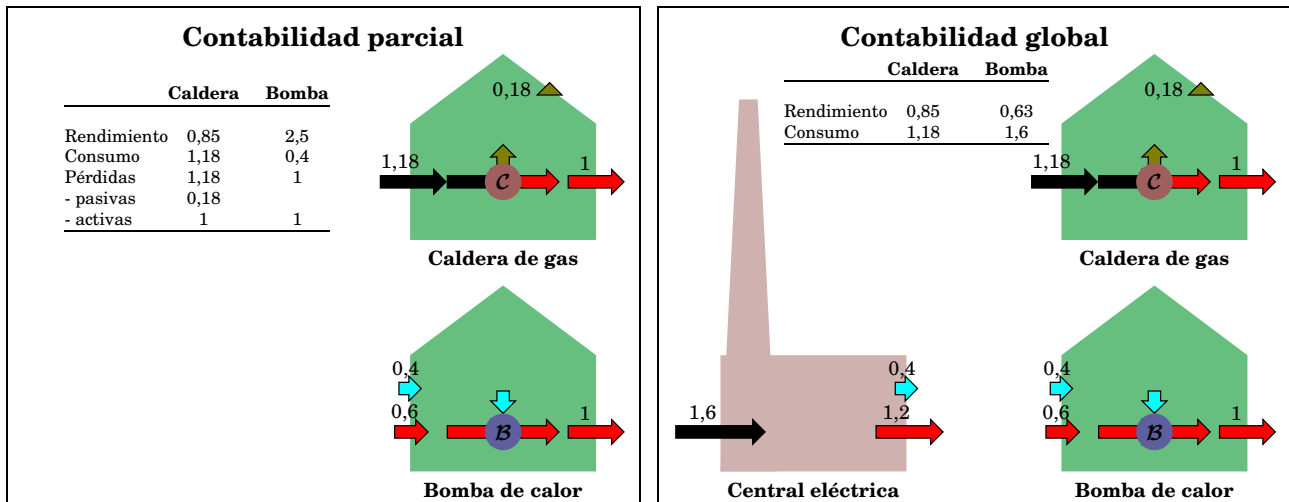


Figura 2: Evaluación del rendimiento de una bomba de calor eléctrica en calefacción

A la izquierda, evaluación *parcial* del rendimiento, en el que sólo se tiene en cuenta el rendimiento del propio aparato (para la caldera, el rendimiento del aparato es prácticamente el rendimiento global).

A la derecha, evaluación *global* teniendo en cuenta el coste de generación de la energía eléctrica.

En ambos casos, se usa la 'mejor' instalación de la bomba de calor para calefacción, disipando la energía del motor en el ambiente interior (una instalación poco frecuente que sería inadecuada para refrigeración), de forma que los rendimientos calculados son superiores a los de instalaciones reales.

... como siempre, el enfoque ecológico presenta también otra cara. Con la utilización masiva de combustibles fósiles, estamos viviendo de nuestra herencia del pasado. [...] Sin embargo, de extenderse el uso de bombas de calor, estaríamos usando la energía del presente. Utilizaríamos en particular la energía que el Sol nos envía diariamente, una energía que también pueden necesitar otros procesos de la vida. Estaríamos enfriando el terreno de nuestro alrededor durante largos períodos del año y, por tanto, descendería su temperatura media. Nadie sabe si esa absorción de calor del entorno próximo y presente, a tan gran escala, llegaría a tener efectos ecológicos a largo plazo, tales como un retraso en la germinación de las semillas o en la reproducción de las lombrices de tierra.

ATKINS (1984:136-137)

Ahora Atkins llama la atención sobre un problema más bien teórico: la posibilidad de que las bombas de calor en viviendas unifamiliares en un entorno rural alteren las condiciones del espacio exterior, preocupación que muchos podrán considerar ciertamente ridícula. Sin embargo, su observación es importante en entornos urbanos, pues ahora lo que está en juego es una energía que, como vamos a ver, *viene muy bien* al resto de los habitantes de la ciudad.

RAMÓN (1980) ya señalaba la necesidad de considerar tres espacios para entender el funcionamiento térmico de los edificios urbanos:

- el espacio *exterior* a la ciudad, al que en general se le pueden asignar los valores climáticos *meteorológicos* (temperatura, humedad), suministrados por observatorios;
- el espacio *dentro* de los edificios, en donde se desea obtener por cualquier medio condiciones térmicas de *confort*; y
- el espacio *fuera* de los edificios (calles, plazas, patios), en los que operan valores *microclimáticos* que dependen de la propia morfología urbana.

Para cada situación climática típica, los dos primeros espacios tiene fijadas sus condiciones (meteorología y confort), mientras que las del tercero *dependen* de cómo sea el diseño urbano en sus aspectos térmicos y climáticos, y de cómo funciones de hecho las instalaciones activas de los edificios. Respecto de estos tres espacios puede distinguirse la aportación de energía desde el *exterior* (combustibles, aporte exógeno para la ciudad), del aporte desde el 'fuera' realizado por la bomba de calor (aporte endógeno).

Al considerar el espacio del 'fuera', RAMÓN se percató de que las morfologías urbanas tradicionales (o vernáculas) actuaban con frecuencia como una primera técnica de climatización pasiva que, en síntesis y en condiciones de invierno, ofrecía una temperatura intermedia entre la temperatura 'meteorológica' o exterior y la de confort (la situación estival es generalmente más compleja). Una consecuencia importante, en términos de consumo energético para calefacción, es que el edificio urbano, por el hecho de serlo, tiene

que hacer frente a gradientes térmicos menos intensos que el edificio aislado en un entorno rural (a igualdad del resto de condiciones), lo que resulta en pérdidas de calor proporcionalmente menores.

Las técnicas de aporte exógeno de calor tradicionales resultaban perfectamente compatibles con el efecto de la morfología urbana: en invierno, el calor aportado en el ‘dentro’ se disipaba hacia el ‘fuera’, caldeándolo a su vez. Es decir, el calor aportado en forma de combustión se usa en realidad dos veces para mantener dos gradientes térmicos diferentes: por un lado la diferencia **dentro/fuera**, y por otra la diferencia **fuera/exterio**. En ambos casos, el aporte de calor juega en la misma dirección que los aportes pasivos (inercia térmica de la edificación, soleamiento, disipación de calor en automóviles y otros sistemas urbanos). El consumo energético, a igualdad de condiciones, es proporcional al gradiente térmico **dentro/fuera**, menor en la ciudad que en el campo, *gracias* al segundo de los gradientes, **fuera/exterio**, que es precisamente la diferencia entre un gradiente urbano y uno rural.

La bomba de calor aporta, igualmente, calor para mantener la diferencia **dentro/fuera**. Pero como el calor aportado proviene *precisamente* del espacio del ‘fuera’, disminuye la diferencia **fuera/exterio**, aumentando correlativamente la diferencia **dentro/fuera**, resultando que el edificio urbano verá aumentar el gradiente térmico al que tiene que hacer frente. Este efecto negativo no está contemplado en los rendimientos calculados en el Cuadro 2, en los que implícitamente se supone que todas las instalaciones consideradas han de mantener el mismo gradiente térmico entre el ‘dentro’ y el ‘fuera’.

Por supuesto que la *primera* bomba de calor instalada tiene un efecto negativo insignificante, al bombear desde un foco térmico, el ‘fuera’, que puede considerarse infinito respecto al caudal bombeado. De hecho, la *primera* bomba de calor instalada se aprovecha de la situación de un ‘fuera’ parcialmente caldeado por las vecinas instalaciones tradicionales de aporte energético: *juega con ventaja*. Pero ¿qué ocurre si todos los edificios operan con bombas de calor? Hay bastantes evidencias de todo tipo que confirman que el efecto negativo deja de ser insignificante, para convertirse en perceptible, véase la Figura 3.

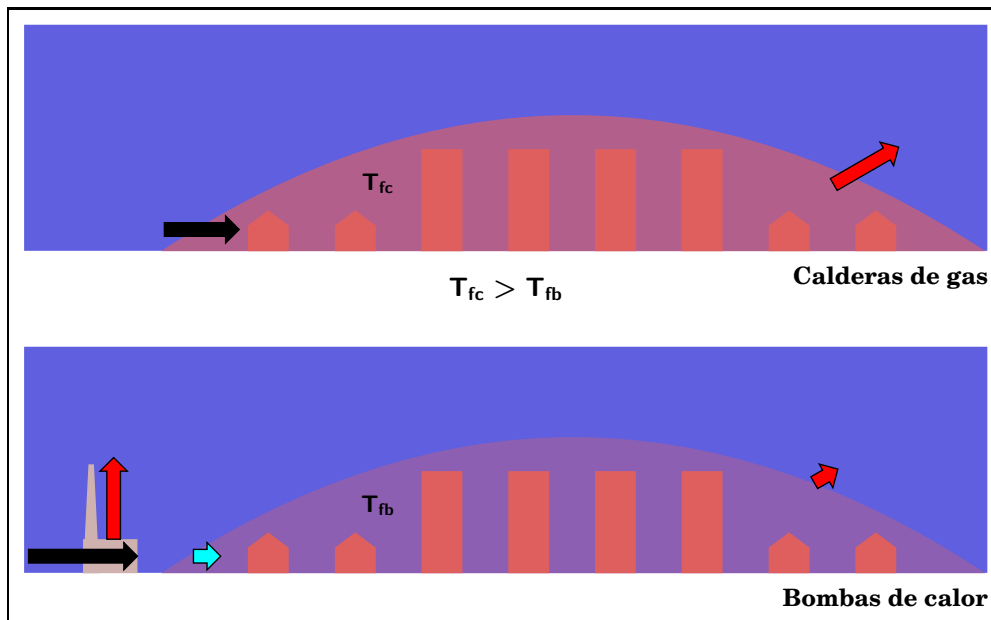


Figura 3: **Efectos urbanos del tipo de calefacción**

En la ‘ciudad del gas’, arriba, la energía consumida se usa dos veces: primero caldea el interior de los edificios; luego caldea el espacio urbano, el espacio del ‘fuera’ (FERNANDO RAMÓN). El microclima urbano resulta así algo más suave que el clima meteorológico, aquel que se padece en el rededor rural. En la ‘ciudad de la bomba’, abajo, solo una pequeña fracción de la energía consumida llega a la ciudad para caldearla, disipándose la mayor parte en el entorno rural de la central eléctrica. Las propias bombas caldean los edificios enfriando el espacio urbano. El microclima urbano resulta así algo más ‘duro’ que en la ‘ciudad del gas’: las propias bombas han de hacer frente a una mayor diferencia de temperaturas (y mayores pérdidas por tanto), viendo disminuir su rendimiento.

La mejor de las evidencias se obtiene con la bomba de calor refrigerando: en nuestro país y en verano, el efecto de varias bombas de calor operando en patios o calles de pequeña anchura tiene como resultado la elevación de la temperatura del ‘fuera’ respecto a los valores habituales que indican las series históricas (incluso descontando el calentamiento global). Las consecuencias negativas son muy diversas, desde la propia contaminación térmica en el espacio del ‘fuera’ hasta casos graves de contaminación acústica que han dado lugar a pleitos y sentencias condenatorias en los últimos años. Pero, para lo que aquí nos ocupa, una consecuencia importante es que la proliferación de instalaciones individuales en patios y calles hace

imposible aplicar la técnica de ventilación nocturna para la refrigeración pasiva de las viviendas sin bomba de calor. A los usuarios de estas últimas sólo les queda como única defensa práctica instalar una bomba de calor adicional en su propia vivienda, abrazando, por así decir, la causa del enemigo: de este modo, tenemos un *feedback* positivo, de nefastas consecuencias. No resulta tan extraño, después de todo, que el consumo eléctrico estival en España haya superado en alguno de los últimos años al invernal.

El efecto de las bombas de calor sobre el microclima urbano, sobre el espacio del 'fuera', es de sentido contrario según las estaciones. En invierno, el espacio urbano se enfría; en verano, se caldea. Las bombas de calor como sistema de calefacción en invierno podrían defenderse teniendo en cuenta la contaminación térmica producida por el transporte motorizado: las bombas estarían reutilizando la 'contaminación' térmica del tráfico y su uso generalizado podría considerarse como una forma de contrarrestarla. Pero esa defensa no puede mantenerse en verano: entonces, las bombas de calor invierten su funcionamiento y su efecto sobre el espacio del 'fuera' se suma a la contaminación térmica del tráfico, empeorando sustancialmente la situación.

Nótese también que los efectos negativos de las bombas de calor en una situación urbana tiene poco ver con el tipo de energía suministrada a la bomba: se produciría incluso si se bombea con electricidad fotovoltaica.

En el Cuadro 2 se observa que las bombas de calor *están bien situadas*, aunque en el caso de la calefacción y el agua caliente sanitaria, existen alternativas de igual o superior clase. También, que en general son preferibles las bombas de gas a las eléctricas. Pero el efecto negativo de la bomba de calor en entornos urbanos debe ser considerado, aún cualitativamente, al evaluar la sostenibilidad de los proyectos. Buena parte de dicho efecto desaparecería con imponer la condición de que las bombas de calor operen con tomas en las cubiertas de los edificios, quedando prohibidas las tomas en fachadas a calles, plazas o patios.

Toda la crítica anterior debe entenderse bien: se trata de mostrar las consecuencias negativas del uso más frecuente que se hace actualmente de las bombas de calor, no del concepto de bombear calor en sí. De hecho, es posible plantear alternativas en que la bomba de calor se utilice eliminando sus consecuencias negativas. Los dos aspectos fundamentales a considerar son el rendimiento en la generación de la energía suministrada por una parte, y por la otra el foco empleado para bombear calor desde o hacia el espacio del 'dentro'. El primer aspecto puede resolverse mediante el empleo de energía eléctrica de fuentes renovables (eólica, fotovoltaica, etc). Y el segundo, renunciando a utilizar como foco térmico el espacio del 'fuera', el espacio urbano. La alternativa más evidente es emplear como foco térmico el subsuelo, en forma de pozos, galerías, etc. El uso del subsuelo, por su gran estabilidad térmica, difícilmente puede afectar térmicamente al espacio urbano; además de esta forma, caldeando el subsuelo en verano para enfriarlo en invierno, la instalación funcionaría a lo largo del año acumulando calor solar cuando es sobreabundante (verano) para emplearlo cuando resulta escaso (invierno). Obviamente, este uso requiere el empleo de instalaciones colectivas (en vez de individuales), un proyecto detallado de la instalación, y una inversión superior en la fabricación del conjunto. Pero cabe esperar que su rendimiento global sea significativamente superior al actual uso de la bomba de calor.

5. Conclusiones

Como quiera que es de buen tono hablar de sostenibilidad, proliferan los manuales como la *Guía de la Edificación Sostenible* del Ministerio de Fomento mencionada más arriba. Pero lo preocupante es que el libro se edita y ya está: como «esperando que el libre albedrío de promotores y constructores reconvierta los actuales modos constructivos. El 'laissez faire' de las administraciones en materia ecológica-ambiental contrasta con la imperativa exigencia con que dispone que toda nueva vivienda ha de contar con un equipamiento [tan] 'básico' [como un] doble circuito de televisión por cable. Si no se produce por las administraciones implicadas un cambio de análoga imperatividad en las reglas del juego económico-constructivo que impulse la aplicación de determinados materiales, técnicas u orientaciones de los proyectos y prohíba o penalice otros, el statu quo seguirá promoviendo indiscriminadamente el estilo internacional por razones de coste monetario y ahorro de mano de obra.» (NAREDO, 2005).

Y como hemos mostrado hay varias tareas pendientes que sólo pueden ser impulsadas adecuadamente desde la administración:

- Normativa y certificación de los rendimientos globales de las instalaciones, junto a protocolos claros y razonables para su medida.
- Identificación y prohibición normativa de *las peores prácticas*, como por ejemplo los casos más escandalosos en la colocación de intercambiadores de calor (frente a ventanas, a pie de calle, etc).

Finalmente, para disminuir la incertidumbre sobre la eficiencia *real* de las instalaciones en uso, sería muy deseable un esfuerzo conjunto entre administraciones, empresas y universidades para explotar un rico yacimiento de información valiosa que está ahí esperando ser utilizado: la facturación de las empresas

suministradoras de todo tipo de energía, junto a los datos del Censo decenal sobre el patrimonio edificado, suministraría información sobre los consumos reales (y con el grado de agregación que interese en cada caso). Si, para edificios concretos, se añade además información libremente facilitada por sus habitantes acerca de sus equipamientos, costumbres y grado de confort alcanzado, se tendría una base empírica con la que contrastar los modelos teóricos.

Referencias

ATKINS, P.W

1984 *The second law*.
s.c.: Scientific American Books, Inc

EU

2002 *Best Practice Projects Yearbook 1997-2000*.
Madrid: IDAE / European Communities

NAREDO, JOSÉ MANUEL

2005 «Instrumentos Financieros y Económicos para la Sostenibilidad Urbana»,
Boletín CF+S, 29/30, <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n29>

NAREDO, JOSÉ MANUEL; & ANTONIO VALERO

1999 *Desarrollo económico y deterioro ecológico*
Madrid: Fundación Argentaria / Visor

NORGARD, JORGEN S.

1993 «Energía para el confort personal: opciones eficaces y límites»,
en *Energía para el mañana: conferencia sobre 'energía y equidad para un mundo sostenible'*,
Madrid: Los libros de la catarata

PHYLIPSEN, G.J.M.; & E.A. ALSEMA

1995 *Environmental life-cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules*.
Utrecht: Department of Science, Technology and Society of Utrecht University. Report no. 95057

RAMÓN MOLINER, FERNANDO

1980 *Ropa, sudor y arquitecturas*.
Madrid: H. Blume Ediciones

SEDIGAS

2004 *La energía solar y el gas*.
Barcelona: Sedigas (Asociación española del gas). 24pp.

VALERO, ANTONIO

1999 «El «coste ecológico» de la energía eléctrica. Un ejemplo de cálculo.»,
en NAREDO & VALERO (1999:219–222)

VÁZQUEZ ESPÍ, MARIANO

2001 «Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales»,
Informes de la construcción, nº 471, pp.30–43. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas

VALE, BLENDIA; & ROBERT VALE

1991 *Green Architecture. Design for a sustainable future*.
London: Thames and Houdson, Ltd