

La bomba de calor eléctrica y otros artefactos

MARIANO VÁZQUEZ ESPÍ

Ondara y Madrid (España), 30 de septiembre de 2008.

A la memoria de ANTONIO ESTEVAN, 1948–2008.

Bombeo	88
Bombeo de agua	88
Bombeo de calor	89
Termoeconomía	91
Bombas y calderas	94
Detalles aburridos	98
La evaluación del uso	99
Un poco más allá: el coste de construir artefactos	99
Ejercicio final	100

El impulso inicial para este trabajo fue la contemplación de un cuadro en la página 26 de la *Guía de la Edificación Sostenible — Calidad Energética y Medioambiental en Edificación*, libro coeditado por el *Institut Cerdá*, el Ministerio de Fomento y el Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE) en Madrid (1999). El cuadro en cuestión ofrece datos sobre el «rendimiento global» de distintas instalaciones para edificios. Por *rendimiento global* debe entenderse, de acuerdo con la *Guía*, «la relación entre las necesidades térmicas que satisfacen [las instalaciones] y la energía disponible en los combustibles utilizados»; para que no haya dudas aclara a continuación: «Este rendimiento es el producto del rendimiento de generación, del rendimiento de distribución y del rendimiento de regulación». Puesto que se trata de una división entre dos cantidades de energía, calor y energía disponible, expresadas en kilovatios-hora, julios o cualquier otra unidad apropiada, se trata de un número adimensional. Reproduzco a continuación algunas líneas del cuadro en cuestión:

Instalación [y uso]	Rendimiento global
Calefacción	
Radiadores [eléctricos]	1
Bomba de calor [eléctrica]	2,7
Caldera [de gas] de condensación	0,93
...	
Agua caliente sanitaria	
Calentadores instantáneos [eléctricos]	0,95
Bomba de calor [eléctrica]	2,5
Calentadores instantáneos [de gas]	0,76
...	

Aquí viene muy bien un primer ejercicio de comprensión lectora (sin que su resultado sirva para otra cosa que para comprobar sus conocimientos actuales de física elemental). Antes de proseguir la lectura, intente *ver* lo que significan el ‘1’, el ‘2,7’, etc, dedicándole todo el tiempo necesario.

Are you ready?

Si *nada* le ha llamado la atención, continúe leyendo poco a poco, asegurándose de que entiende bien todo lo que sigue. Veamos. El ‘1’ significa que un radiador eléctrico *no consume más energía disponible* que la estrictamente necesaria, pues toda esa energía vuelve a aparecer en forma de calor útil (para la calefacción). Más sorprendente, si cabe, es el ‘2,7’: significa que la bomba de calor eléctrica *produce energía de la nada*: en efecto, por cada unidad de energía disponible, aparecen 2,7 unidades de calor, con una producción neta de 1,7 unidades —recuérdese que 2,7 es un *rendimiento global*. Por supuesto *algo anda mal en todo esto*, porque si así fuera, la actual crisis energética habría quedado resuelta completamente: bastaría con usar bombas de calor eléctricas para *producir* una cantidad ilimitada de energía. Se trata de un error, aunque al tratarse de una *Guía* que pretende proporcionar «referencias concretas a los actores

del sector, para hacer más tangibles las opciones a su alcance» (*op. cit.*, p. V, prólogo de FERNANDO NASARRE y CARMEN BECERRIL), se trata de un error garrafal de difícil justificación, un error que hace que la *Guía* parezca sugerir vigorosamente que tiremos a la basura todos nuestros viejos y nuevos calentadores y calderas de gas para sustituirlos por aparatos eléctricos de superiores prestaciones, consiguiendo así, como poco, resolver las necesidades térmicas de nuestras casas con menores consumos de combustibles¹. ¿Ve en qué consiste el error? Si su formación es técnica y tiene relación con estos temas, probablemente ya se habrá hecho una idea cabal; en caso contrario, le sugiero que mate algo de tiempo intentando descubrirlo antes de continuar la lectura.

Are you ready?

Los rendimientos del cuadro están más o menos bien, **sólo que no son rendimientos globales**, en realidad son los rendimientos *del aparato en cuestión*. Es decir, un calentador de gas estándar sólo consigue transmitir al agua caliente el 76 por ciento de la energía disponible en el gas que quema (un *último modelo* puede alcanzar rendimientos del 1,05). Del mismo modo, una bomba de calor eléctrica consigue transmitir al agua 2,5 unidades de energía por cada unidad de electricidad consumida. Todo esto es esencialmente correcto. El problema es que en el último caso no estamos considerando los «combustibles utilizados» para calcular el rendimiento, sólo consideramos la electricidad, la cual ni siquiera es un combustible (véase LÓPEZ, 2003). Por tanto, ambos rendimientos, parciales, no son comparables en la medida en que los divisores —energía del gas o electricidad— no lo son. Sólo los rendimientos globales, que resultarían de extender la contabilidad hasta los «combustibles utilizados» lo serían. En el caso del calentador de gas habría que incluir en el denominador rubros tales como los combustibles consumidos en el transporte del gas desde su lugar de extracción hasta la vivienda (lo que en muchos casos apenas restaría unas centésimas al rendimiento del propio calentador). En el caso de la bomba de calor eléctrica la situación es similar, salvo que hay que ver cómo se produce la electricidad: una de las situaciones posibles es *precisamente* quemando gas con rendimientos que pueden ser menores del 50%; y también hay que contabilizar, de nuevo, las pérdidas por el transporte del gas hasta la central eléctrica y de la propia electricidad hasta la vivienda. El cuadro de la *Guía* ignora por completo todos estos costes y, en consecuencia, sobrestima (¡y mucho!) el *rendimiento global* de todos los aparatos eléctricos que cita. En realidad la bomba de calor eléctrica, en rendimiento global, es similar o incluso peor que otras alternativas basadas en gas, y desde luego es peor que las alternativas híbridas que incluyen aportes de energía solar (para un estudio más detallado véase VÁZQUEZ *et alii*, 2007; al menos resulta intrigante que en el cuadro de la *Guía* no aparezca mención alguna a instalaciones solares).

El error de la *Guía*, ¿es un error casual? O, por el contrario, ¿se trata de una superstición que se ha ido extendiendo en el imaginario social en los últimos años? De lo que no cabe duda es de que la bomba de calor eléctrica se ha ido popularizando en España: pueden verse (¡y oírse!) sus unidades de intercambio en el exterior de muy diversos edificios, en pueblos o grandes ciudades, en grandes patios de manzana o en estrechos callejones. Campañas publicitarias agresivas y sistemáticas no son ajenas a tal popularidad. Lo peor del caso sería que la citada *Guía* haya dado justificación «ecológica» a tan ingenioso aparato.²

Lo que sigue es un intento de poner las cosas en su sitio, a sabiendas de que contrarrestar las supersticiones con barniz científico es tarea hercúlea en estos tiempos que corren, cuando se alaba a la Ciencia a la vez que repugna tener que hacer alguna multiplicación o vérselas con un par de fórmulas matemáticas.

Bombeo

Las técnicas de calefacción tradicionales en edificios operan quemando el combustible *dentro* del espacio acondicionado, convirtiéndolo en calor, 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, y

¹No puede afirmarse, en general, que consiguiéramos reducir nuestras facturas mensuales de energía, puesto que esta reducción depende de las tarifas monetarias, y éstas no siempre guardan relación con los consumos energéticos reales. Cuando escribo esto, el precio de la energía disponible en una botella estándar de butano es de 2,43 céntimos de euro el megajulio; para una familia «media», el precio de la electricidad es 3,54 céntimos el megajulio (para una familia austera de muy bajo consumo eléctrico, puede llegar a valer 16 céntimos, ¡más de cuatro veces!) Por tanto, para conseguir un megajulio útil de calefacción, según el cuadro de la *Guía*, una familia media pagaría 3,54 céntimos si usa radiadores eléctricos, 1,31 céntimos si usa bombas de calor eléctricas, y 2,61 con una moderna caldera de gas; lo más «barato» es la bomba de calor, mientras que lo más «caro» es el radiador eléctrico. (A la familia muy austera en el consumo de electricidad, un megajulio de calefacción le costaría 5,93 céntimos si usa bomba de calor, bastante más que con butano. Paradójicamente, con las actuales tarifas, cuanto menos se usa la electricidad más cara sale en comparación con otras fuentes, tal parece que estén diseñadas para fomentar el consumo eléctrico, precisamente, con aparatos tales como las bombas de calor.)

²A día de hoy ignoro si la *Guía* se ha reeditado corrigiendo el error, así como cuál haya podido ser su influencia en la opinión pública.

el propio aparato sofisticado, el funcionamiento teórico de una bomba de calor es análogo a una bomba de agua: se trata de transferir calor desde una fuente fría a una caliente, en sentido contrario al que seguiría el flujo espontáneo. Para ello, como en una bomba de agua, es necesario realizar un trabajo, consumiendo energía útil.

Bombeo de agua

A beneficio de aquellas personas que hayan tropezado en los anteriores *Are you ready?* puede merecer la pena examinar, antes que nada, el bombeo de agua, un proceso mecánico mucho más simple, del cual, quien más quien menos, tenemos experiencia directa.

Una noria de eje horizontal puede servir como bomba para alturas pequeñas (típicamente la mitad de su diámetro). El caudal del río mueve la noria, y los cangilones del ingenioso artefacto elevan el agua hasta el desagüe en el eje. Puesto que el agua del río *baja*, en principio sería posible obtener idéntico resultado con un canal o acueducto que toma el agua aguas arriba, en la misma cota que el eje de la noria; la utilidad de ésta se limita, por tanto, a aquellas situaciones en que es más fácil *construirla* que el acueducto. Porque en definitiva lo único que obtenemos en ambos casos es agua. La segunda ley de la termodinámica pone un límite al agua que puede bombear una noria, y, aunque depende de muchos detalles, en la práctica *es imposible* que la fuerza del río pueda bombearlo completamente: hay que dejar salir agua aguas abajo para que la noria se mueva y *algo* de agua pueda alzarse con la noria. Este límite no opera sin embargo con el acueducto (que es una tubería y no una máquina): podríamos alterar el cauce del río para disponer de todo el caudal a la misma altura que el eje de la noria; el único límite aquí es que no podemos esperar que el canal suba agua espontáneamente por encima de su toma de agua.³ Podemos, en apariencia, sobrepasar este límite con bombas eléctricas convencionales. Un embalse en el río puede servirnos para generar electricidad, con la que mover una bomba que impulse agua por encima del propio embalse. La energía disponible en el embalse es básicamente el producto del peso de agua, P , por la altura de su centro de gravedad sobre la turbina, ΔH , es decir $P \cdot \Delta H$. El servicio energético de la bomba es, del mismo modo, el producto del peso de agua bombeada, p , por la altura a la que se eleva, Δh , es decir, $p \cdot \Delta h$. Pues bien, la segunda ley afirma que $p\Delta h < P\Delta H$: el servicio obtenido, valorado como energía, $p\Delta h$, será siempre *menor* que la energía disponible, $P\Delta H$. La razón es, como siempre, el rendimiento: ni la turbina ni la bomba son máquinas perfectas, algo de electricidad se pierde durante su transporte, el agua del embalse se evapora, hay fricción en las tuberías, etc. Pero, sobre todo, en términos netos, tiene que bajar más agua de la que sube, o, más exactamente, debemos consumir más energía disponible que la potencial que ganamos al subir agua. La segunda ley es compatible con que la altura de bombeo, Δh , sea mucho mayor que la de turbinación, ΔH ; la condición es que el peso de agua consumida en el embalse, P , sea comparativamente *más que* mucho mayor que la del agua bombeada, p : sólo así se verifica el límite impuesto por la segunda ley.

Aunque no es siempre fácil ver como usar estas ideas en sistemas físicos muy diferentes, como la bomba de calor eléctrica, siempre es recomendable partir con la siguiente hipótesis: *no es posible transformar completamente la energía útil de los minerales del planeta en algún efecto útil: siempre se pierde algo por el camino*; por tanto, cualquier afirmación de un rendimiento mayor que la unidad debe contemplarse con cautela: puede tratarse de un error contable, como en el ejemplo de la *Guía*, o de una estafa intelectual, como en el caso del mítico motor de agua que, supuestamente, los «poderosos» pondrán a «funcionar cuando se acabe el petróleo».⁴

Bombeo de calor

Puesto que el calor fluye espontáneamente desde las temperaturas altas hacia las bajas, el gradiente de temperaturas juega un papel análogo a la diferencia de alturas en ríos, bombas, turbinas y norias. Hay, sin embargo, una diferencia crucial: el *factor de Carnot*. En un mundo ideal, sin rozamiento ni pérdidas, sería posible convertir *toda la fuerza del río en fuerza motriz*. Pero, en ese mismo mundo inexistente,

³En acueductos muy, muy largos el agua puede evaporarse por el camino y no llegar ni una gota a destino: el rendimiento *nunca* es del cien por cien, aunque puede ser casi 100 en acueductos o canales cortos y bien concebidos.

⁴La única forma de obtener rendimientos mayores que la unidad, de *producir algo* en sentido estricto aquí en la Tierra, es acudir a la energía solar, una vieja idea que no por antiquísima ha conseguido introducirse en el imaginario social dominante. En el conjunto Tierra-Sol la segunda ley sigue cumpliéndose a rajatabla (rendimientos menores que la unidad), pero al considerar la Tierra sola, que es lo que nos interesa, podemos considerar la energía solar como energía libre o gratuita (la usemos o no, se perderá por el espacio en cualquier caso); de esta forma, desde nuestro punto de vista no contabilizamos la fracción solar de la energía disponible en el denominador del rendimiento (por «combustibles utilizados» debemos entender los terrestres en exclusiva), y por ello éste aumenta con cada aporte solar adicional. Por supuesto que esta fórmula contable representa el punto de vista humano, no el de la Naturaleza; mientras que no compitamos con otras especies por la energía solar (es decir, mientras que nuestro consumo de energía solar no sea desorbitado), puede que sea un punto de vista apropiado.

tal cosa no es posible hacerla con un flujo calorífico. No es cosa aquí de entrar en detalles (véase, por ejemplo, ATKINS, 1984), baste decir que el calor es la forma de energía en la que espontáneamente tiende a transformarse cualquier otra. Debido a ello, la transformación inversa está sujeta a límites más estrictos que el resto. El factor de Carnot da cuenta de esos límites en un mundo ideal: expresa la *máxima* fracción de un flujo calorífico Q que podemos transformar en trabajo útil W , es por tanto el máximo rendimiento de tal transformación:

$$W/Q \leq 1 - (T_F/T_C) = (T_C - T_F)/T_C = \Delta T/T_C \quad (8)$$

T_F es la temperatura ‘fría’ *absoluta* (medida en grados Kelvin), mientras que T_C es la temperatura ‘caliente’, también absoluta. El factor de Carnot es claramente menor que la unidad, salvo que el calor fluya hacia el cero absoluto, en cuyo caso vale la unidad, el máximo rendimiento alcanzable.⁵ La aritmética es engañosamente similar a la de un embalse con una turbina ideal: la diferencia está en que la altura cero, la de la turbina, la podemos fijar arbitrariamente, mientras que el cero absoluto de temperaturas parece ser una constante universal, como la velocidad de la luz en el vacío: algo que no podemos alterar con nuestro ingenio.⁶ Así, un generador eléctrico estándar, trabajando con una diferencia de temperatura de 400°C y con un foco caliente de 500°C (vapor sobrecalentado) transformaría calor en electricidad con un rendimiento *ideal* de $400^\circ\text{C}/(273\text{ K} + 500^\circ\text{C}) = 400\text{ K}/773\text{ K} = 0,52 = 52\%$, aunque las pérdidas en el mundo real lo reducen a un 40% o menos.

Una bomba de calor, realizando trabajo (mediante, por ejemplo, un motor eléctrico), puede bombear calor en sentido contrario, desde un espacio frío a otro caliente (no otra cosa hace un frigorífico). El rendimiento *téorico e ideal* del bombeo de calor viene dado por $T_C/\Delta T$, siendo T_C la temperatura del extremo caliente y ΔT el gradiente térmico contra el que se bombea.⁷ Por ejemplo, una bomba para calefactar un edificio a 20°C desde un espacio exterior a 0°C operaría en un mundo ideal con un rendimiento de $(273\text{ K} + 20^\circ\text{C})/20\text{ K} = 14,7$, ¡1.470%!

Nótese que el rendimiento de la bomba de calor es siempre mayor que la unidad, y disminuye hasta la unidad sólo cuando la bomba extrae calor de un foco en el cero absoluto de temperaturas. De hecho, es el inverso del factor de Carnot. En consecuencia, si sólo dispusiéramos de dos focos térmicos para producir electricidad y para bombear calor, el rendimiento global en un mundo ideal sería exactamente la unidad. En efecto, al transformar calor en electricidad *perderíamos* calor útil y sólo obtendríamos electricidad a razón de $\Delta T/T_C$, pero al consumir la electricidad para rellenar el foco caliente *ganaríamos* calor útil a razón de $T_C/\Delta T$: en conjunto nos quedamos como estábamos: hemos pasado calor al foco frío para producir electricidad, y luego usamos esa electricidad para devolver el calor al foco caliente: se trata de un mundo *reversible*.⁸

En el mundo real hay que contabilizar las pérdidas debidas a fugas, fricciones, transporte, etc, todo lo recogido en la idea abstracta de *rozamiento*. Estas pérdidas juegan *siempre* en contra nuestra, tanto si producimos electricidad como si bombeamos con ella. Si en el mundo ideal el producto de ambos rendimientos era la unidad, en el mundo real, en el que ambos disminuyen, el rendimiento global será menor que 1. Sin embargo, en el mundo real no estamos constreñidos a dos focos térmicos para todo. Podemos generar electricidad mediante un gradiente y bombear contra otro totalmente diferente. Por tanto, en principio, parece posible obtener un rendimiento global mayor del cien por cien *en el bombeo de calor*, pero todo depende de los detalles y no podemos confiar en que vaya a ser así.

Se impone la cautela. Veamos un ejemplo totalmente hipotético: una central eléctrica con un rendimiento de 0,4 y una bomba de calor, también eléctrica, con un rendimiento de 2,7 —como proclama la *Guía*. Es **muy importante** entender bien que este rendimiento es del tipo definido en la *Guía*: rendimiento global⁹ del aparato. Para que no haya dudas, «2,7» significa que por cada unidad de energía eléctrica, la bomba aporta 2,7 unidades de calor al ambiente climatizado, pongamos por caso, a 20°C, sin que medie ningún otro flujo de entrada o salida a temperatura distinta de la ambiental.

⁵Pero, como si de una broma de la Naturaleza fuera, la tercera ley proclama que el cero absoluto es inalcanzable...

⁶Otra, o la misma, diferencia consiste en lo siguiente: la altura geométrica dice cuanto peso podremos convertir en energía útil, y esa energía será una fracción del producto de la altura por el peso. La temperatura dice lo mismo del calor, pero estando medido el calor ya en unidades de energía, hay que multiplicar por una temperatura adimensional, la que se obtiene precisamente por comparación con el cero absoluto.

⁷Para un refrigerador el rendimiento es $T_F/\Delta T$, siendo T_F la temperatura del extremo frío.

⁸La idea de bombear calor es tan antigua como CARNOT, lo que tampoco es tan sorprendente pues en aquella época (principios del XIX) lo que hoy denominamos calor era entonces el «calórico», un extraño fluido con el que se intentaba explicar los fenómenos asociados al fuego y a la combustión. Si se trataba de un fluido nada más natural que bombearlo. CARNOT, y después KELVIN y otros, emplearon la idea para establecer algunos teoremas fundamentales sobre ciclos y reversibilidad, con los que establecieron las bases teóricas de la segunda ley. Para finales de siglo, en la Exposición Universal de 1878, fue presentado el *ingenio* refrigerador de CARRÉ que, en una de las demostraciones, fue accionado por un motor solar.

⁹En particular no se trata del Coeficiente de Prestación o COP.

En principio, el rendimiento del conjunto sería $0,4 \times 2,7 = 1,08$ y, en apariencia, por cada unidad de energía consumida en la central obtenemos 1,08 unidades en el espacio calefactado por la bomba obteniendo una ganancia neta de 0,08 unidades que parecen surgir de la nada: ¡adiós a la crisis energética! ¿Dónde está la trampa? Es útil pensar en términos hidráulicos: el calor consumido en la central *cae desde una altura térmica* de, pongamos, unos 500°C hasta, pongamos, 100°C , mientras que el calor suministrado por la bomba alcanza una *altura térmica* de 20°C , *alzándose* desde una temperatura ambiental de 0°C , por ejemplo¹⁰: en consecuencia hemos perdido *altura térmica* y, al revés que en el ejemplo anterior de un mundo ideal, la bomba de calor *no restituye el calor* al foco caliente inicial de 500°C : hemos perdido algo por el camino, algo que por más que usemos la bomba, con su rendimiento global de 1,08, *no podemos recuperar*. De hecho, la regla de cálculo anterior, la de multiplicar los rendimientos de los aparatos individuales de un proceso en serie, no puede aplicarse sin más en este caso, pues el foco frío sobre el que opera la bomba de calor en el edificio *no es el mismo* sobre el que opera la central eléctrica: ambos aparatos no están directamente conectados, hay otros procesos entre ellos cuyo rendimiento será también, en un mundo real, menor que la unidad y que no hemos considerado.

Queda por explicar aún de dónde surge la ganancia neta de 0,08 unidades. No hay tal (¡la energía se conserva dice la primera ley!): el espacio exterior pierde esa cantidad de calor, de forma que en el conjunto de la central eléctrica y la bomba de calor junto a sus respectivos espacios en derredor no se gana ni pierde energía. Vemos otra vez que central y bomba no están directamente conectadas y que la multiplicación de sus rendimientos es un rendimiento con un significado ambiguo.¹¹

La última pregunta es la siguiente: ¿Qué significa, entonces, el rendimiento de 1,08? ¿Es o no correcto? Un argumento (a favor del «sí») podría ser del siguiente tenor: «0,4 significa que por cada unidad de energía del combustible obtenemos 0,4 unidades de electricidad; 2,7 significa que por cada unidad de electricidad obtenemos 3 unidades de calor; por tanto, 1,08 significa que por cada unidad de energía del combustible obtenemos 1,08 unidades de calor». Y es irreprochable en cuanto a su aritmética. El problema aquí es la interpretación física y económica. Si de una cuenta bancaria decimos que el rendimiento es 1,08 esperamos que por cada euro invertido obtengamos 1,08 euros. Es decir, el rendimiento lo calculamos dividiendo dos magnitudes perfectamente comparables. En el caso de la bomba de calor, las magnitudes sólo son comparables en lo que respecta a sus unidades (megajulios, calorías, etc), pero no en lo que hace a su realidad física y económica. La pregunta clave aquí es: ¿puede conseguirse la misma utilidad con una unidad de energía del combustible que con una unidad de calor a 20°C ? Obviamente no: si podemos elegir siempre nos quedaremos con el combustible (por ello el combustible se vende, mientras que el calor de nuestras casas no).

El rendimiento energético así calculado, el 1,08, sirve para lo que sirve: para compararlo con los de otros artefactos que 1) consumen combustible, y 2) suministran calor a 20°C . Pero no sirve para nada más. En particular, *no podemos interpretarlo* como un rendimiento económico (diciendo por ejemplo que por cada unidad de combustible obtenemos 1,08 unidades de *combustible*). Por tanto, otra ambigüedad de la *Guía* es que ofrece, en el mismo cuadro, rendimientos para distintas instalaciones sin que quede meridianamente claro si son o no comparables entre sí en los anteriores términos.

¹⁰La central corresponde a una estándar de vapor sobrecalentado; la bomba a una eléctrica para calefacción por agua a media temperatura. Los rendimientos indicados son plausibles, no necesariamente reales.

¹¹Sin embargo, la regla de multiplicar los rendimientos de unos pocos aparatos que, conectados, no reconstruyen en su totalidad una secuencia causal completa, aunque conduce a resultados falsos, suele ser útil en los primeros tanteos del análisis: la estima de rendimiento a la que conduce siempre será mayor que el rendimiento real, pero en no pocas ocasiones, esa estima puede ser suficiente para deshacer supersticiones o para sugerir cómo refinar el análisis.

Termoeconomía¹²

¿Existe alguna forma de analizar el rendimiento *económico*¹³ de bombas y calderas? Sí, el análisis del flujo de *energía útil* o *exergía*. No es cosa de entrar en mucho detalle aquí¹⁴, pero podemos al menos realizar un breve análisis del ejemplo anterior.

Antes que nada aclaremos el significado de *energía útil* o *exergía*¹⁵. Midiendo respecto al nivel del mar, un embalse de agua situado a mil metros de altitud tiene una energía potencial de $10000N \times 1000m = 10MJ$ por cada metro cúbico de agua. Sin embargo, si la turbina está 10 metros por debajo del nivel de agua en el embalse, la capacidad de generar electricidad es sólo de $10000N \times 10m = 0,1MJ$ para el primer metro cúbico turbinado, y eso suponiendo que el rendimiento de la turbina es la unidad. Vemos pues que, dependiendo de la configuración y rendimiento del sistema, sólo una parte de la energía potencial puede convertirse en electricidad capaz de realizar trabajo, en energía útil. Por tanto, la misma cantidad de energía *potencial* puede convertirse en mucha o poca energía *útil* según el arreglo que hagamos y los dispositivos que usemos; el resto se disipa en forma de calor (la energía se conserva).¹⁶

En general, la exergía o energía útil, E_X , de una cierta cantidad de energía, depende del gradiente que origina el flujo que se transforma: para el peso, la diferencia de alturas; para la corriente eléctrica, el potencial; para el calor, la temperatura; etc.

El cálculo de la exergía de un material, de un flujo de calor, etc, se realiza siempre tras haber definido sin ambigüedad los límites geométricos del sistema así como el rendimiento energético de cada transformación involucrada. La segunda ley, aplicada a una «caja negra» de la que entra y sale un flujo se expresa como:

$$E_{X,in} - E_{X,out} = I > 0 \quad (9)$$

en donde E_X simboliza ambos flujos de exergía e I es la irreversibilidad producida. La ley significa que siempre perdemos exergía debida a las inevitables *pérdidas*: la energía útil obtenida como producto será

¹²En este apartado, debo expresar un agradecimiento profundo a ANTONIO VALERO, quien me indicó cómo introducir el análisis de la exergía a lo largo de una conversación electrónica entre el 17 y 19 de septiembre de 2008, fecha aciaga para ambos, al coincidir con el fallecimiento de nuestro común amigo ANTONIO ESTEVAN. También a éste último: nuestro trabajo ya citado, VÁZQUEZ *et alii* (2007), fue fruto de una pequeña investigación llevada a cabo a partir de 2005. Tras recibir el diagnóstico de cáncer con metástasis en huesos, allá en 2006, ESTEVAN decidió instalar una bomba de calor eléctrica en su casa de Ondara, dado que la metástasis iba a reducir sustancialmente su capacidad para preparar y acarrear leña para la estufa. Le recuerdo ahora estudiando cuidadosamente la variación del rendimiento de su bomba con la temperatura, calculando los costes monetario y energético del calor bombeado, todo para determinar en qué condiciones era razonable su uso (este verano de 2008, a pesar de su delicado estado, la bomba apenas se empleó como refrigerador). Conociendo él el manuscrito de aquel trabajo, y siendo vecinos y amigos, mantuvimos muchas discusiones sobre su bomba en particular y sobre artefactos en general, y parte de ellas tienen reflejo en este texto, cuya publicación ha coincidido con su muerte, algo con lo que ni él ni yo contábamos entonces. La discusión con VALERO se convirtió en un seminario acelerado sobre análisis exergético, con algunas discusiones, y se prolongó hasta casi el instante de esta edición final, sin que llegáramos a un completo acuerdo en cuanto a las conclusiones que cabe extraer de tal análisis (sin cuya ayuda no habría podido realizar); pero, gracias a su insistencia, espero haber expresado con claridad para qué y para qué no sirve la exergía. Por supuesto, las imprecisiones que aún queden, y todas las interpretaciones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

¹³Doy por supuesto que usted entiende que me refiero a una *economía física* que *nada* tiene que ver con la economía corriente, meramente monetaria.

¹⁴Hoy por hoy existen bastantes manuales —SZARGUT *et alii* (1988), SZARGUT (2005), EL-SAYED (2003)— y muchos ejemplos accesibles en Internet; también hay revistas especializadas como *Exergy*. En VALERO (2000) hay un recuento de la teoría así como de sus dificultades y límites.

¹⁵El neologismo «exergía» es necesario por razones históricas. Antes de la formulación de las leyes de la termodinámica a mediados del XIX, la palabra «energía» venía a ser sinónima de «trabajo» y era algo que se *consumía*: un tronco sólo se puede quemar una vez; si había que transportar algo, se consumía energía (se hacía trabajo), y si luego había que devolverlo a la posición inicial, había que consumir otra vez. Pero con el establecimiento de la equivalencia mecánica del calor y la primera ley (conservación), «energía» pasó a significar cualquiera de sus formas, la *energía que se conserva*, sirva o no para realizar trabajo. La segunda ley se maneja bien analizando los trabajos realizados y, por tanto, la energía útil consumida para ello, pero ahora esa energía debe adjetivarse o denominarse con palabra distinta a «energía» a secas, a fin de evitar la confusión con la nueva energía *conservativa*. De ahí «exergía».

¹⁶Puede citarse una definición, a día de hoy clásica, de *exergía*:

La exergía de un sistema termodinámico es la mínima cantidad de trabajo técnico necesario para constituirlo a partir del ambiente de referencia (AR), donde el AR representa aquellos recursos que la Naturaleza pone a nuestra disposición en cantidades ilimitadas a un coste de extracción nulo evaluado en trabajo técnico.

[...]

Dos flujos o sistemas serán termodinámicamente equivalentes; es decir, será posible, al menos teóricamente, obtener uno a partir del otro, y viceversa, sin un consumo adicional de recursos limitados (fuentes de energía) si y sólo si tienen igual exergía

siempre menor que la exergía consumida como combustible, trabajo, etc. La irreversibilidad se cuantifica como la exergía perdida en la transformación. El rendimiento exergético es $E_{X,out}/E_{X,in} < 1$, y su inverso se denomina *coste exergético* del producto: $E_{X,in}/E_{X,out} > 1$.

¿Cuál es la exergía de un flujo de calor Q a temperatura T ? Fijada una temperatura de referencia (temperatura ambiental $T_o < T$), la exergía máxima posible viene dada por el factor de Carnot, ecuación 1:

$$E_X(Q) \leq Q \times (1 - T_o/T) < Q \quad (10)$$

Así pues, si todos los flujos de energía o materiales de un sistema pueden valorarse en términos exergéticos, con la exergía de los flujos de entrada y salida puede calcularse el rendimiento exergético, un rendimiento económico que cumple con la regla de que denominador y numerador se expresen con magnitudes intercambiables.

Volvamos ahora al ejemplo de la central y la bomba. El rendimiento de 0,4 de la central significa, esencialmente, que la exergía del combustible¹⁷, $E_{X,C}$, es 2,5 veces la exergía obtenida en forma de electricidad, W , es decir, hemos perdido el 60% de la exergía puesta en juego. La segunda ley puede expresarse así:

$$I_{central} = E_{X,C} - W = E_{X,C} - 0,4 \cdot E_{X,C} = 0,6 \cdot E_{X,C} > 0$$

En la bomba de calor pasa algo similar. La exergía que consumimos es ahora electricidad, W , y la que obtenemos es la que tenga el calor para calefacción, Q . El rendimiento *energético* de la bomba nos permite saber cuanto *calor* obtendremos: $Q = 2,7 \cdot W$. La primera ley exige que al sistema de calefacción entre tanta energía como sale, así que:

$$W + Q_{in} = Q$$

en donde Q_{in} es el calor de la fuente fría desde la cual bombea el aparato. Puesto que se trata de un rendimiento global, podemos suponer que esa fuente esté a la temperatura ambiental. Como $Q = 2,7 \cdot W$, $Q_{in} = 1,7 \cdot W$. Y con esto cumplimos con la primera ley.

Vamos ahora con la segunda, ecuación 2. Hay que fijar la temperatura ambiental: pongamos el interior de Madrid en condiciones extremas medias de invierno, 0°C. Al sistema entra exergía en forma de electricidad, W , y de calor que, según la ecuación 3, es $Q_{in} \cdot (1 - 273 \text{ K}/(273 \text{ K} + 0^\circ\text{C})) = 0$. Del sistema sale exergía en forma de calor a 20°C, es decir, $Q \cdot (1 - 273 \text{ K}/(273 \text{ K} + 20^\circ\text{C}))$. La segunda ley nos da la pérdida de exergía al operar el sistema:

$$\begin{aligned} I_{vivienda} &= W + Q_{in} \cdot (1 - 273 \text{ K}/(273 \text{ K} + 0^\circ\text{C})) - Q \cdot (1 - 273 \text{ K}/(273 \text{ K} + 20^\circ\text{C})) \\ &= W + 0 - 2,7 \cdot W \cdot 0,068 \\ &= 0,816 \cdot W \\ &= 0,816 \times 0,4 \cdot E_{X,C} = 0,326 \cdot E_{X,C} \end{aligned}$$

es decir, que perdemos el 82% de la exergía puesta en juego en forma de electricidad (o el 33% de la del combustible), exergía que *ya no está disponible para otros usos*.

La pérdida total es simplemente la suma de ambas: $I_{central} + I_{vivienda} = 0,926 E_{X,C}$. ¡El 93% de la exergía del combustible! (que hemos consumido (y que ya no podremos volver *nunca* a quemar). El rendimiento global es del 7%. Y eso ¡usando una máquina eficiente!¹⁸

¹⁷Aproximadamente, la exergía del combustible es igual a su potencia calorífica.

¹⁸Al utilizar rendimientos globales perdemos información de como ocurren las cosas dentro de la *caja negra* que representa a la bomba de calor y los sistemas de intercambio asociados. Puede merecer la pena un análisis algo más detallado. Pongamos que la bomba trabaje entre un foco frío de agua a 15°C y un intercambiador a 50°C, con un rendimiento o COP de 3. Entonces la primera ley en la bomba es:

$$W + Q_{in} = Q$$

con $Q = 3 \cdot W$, y $Q_{in} = 2 \cdot W$. El balance exergético del bombeo es:

$$\begin{aligned} I_{bombeo} &= W + Q_{in} \cdot (1 - 273 \text{ K}/(273 \text{ K} + 15^\circ\text{C})) - Q \cdot (1 - 273 \text{ K}/(273 \text{ K} + 50^\circ\text{C})) \\ &= W + 2 \cdot W \cdot 0,052 - 3 \cdot W \cdot 0,155 \\ &= 0,640 \cdot W \\ &= 0,640 \times 0,4 \cdot E_{X,C} = 0,256 \cdot E_{X,C} \end{aligned}$$

Por simplificar, supongamos que en el intercambiador el agua, a 50°C, cede todo su calor al aire, a 20°C, algo imposible en todo caso. El balance exergético será:

$$I_{intercambio} = Q \cdot (1 - 273 \text{ K}/(273 \text{ K} + 50^\circ\text{C})) - Q \cdot (1 - 273 \text{ K}/(273 \text{ K} + 20^\circ\text{C}))$$

Hubiera sido peor si hubieramos empleado la electricidad para calentar el aire con una resistencia eléctrica (de rendimiento unidad: $Q = W$). El balance exergético en la resistencia es básicamente:

$$I_{vivienda} = W - Q \cdot (1 - 273 \text{ K} / (273 \text{ K} + 20^\circ\text{C})) = W - 0,068 \cdot W = 0,932 \cdot W = 0,373 \cdot E_{X,C}$$

Y la pérdida global es $(0,6 + 0,373) \cdot E_{X,C} = 0,973 E_{X,C}$, con un magro rendimiento global de 2,7%.

Y, en este caso, la combustión directa del combustible hubiera arrojado una pérdida del orden de $0,93 \cdot E_{X,C}$ si el rendimiento global de la caldera fuera 1; con rendimiento estándar la combustión queda a medio camino entre la bomba y la resistencia eléctricas.

En resumen:

Sistema	Rendimiento «global» (según la <i>Guía</i>)	Exergía de combustibles		
		pérdida	rendimiento	índice
Bomba de calor eléctrica	2,7	0,926	7,4 %	100
Resistencia eléctrica	1	0,973	2,7 %	36,5
Caldera	1	0,932	6,8 %	92,0
	0,93	0,937	6,3 %	85,1

Podemos ver que en estas condiciones hipotéticas la bomba de calor puede exhibir el mayor de un conjunto de rendimientos *muy bajos*. En el siguiente apartado analizaremos los rendimientos energéticos globales de bombas y calderas representativas del mundo real. En cualquier caso, el análisis exergético despeja cualquier duda: estamos perdiendo mucha energía útil. ¡No hay ganancia por ningún lado! Además, el grosero análisis que hemos hecho indica que, en el caso de los aparatos eléctricos, la mayor pérdida es imputable a la central eléctrica.

Todo esto indica que vamos por mal camino, *con independencia del sistema empleado*: mejor sería captar radiación solar durante el día, acumularla con la inercia de la construcción y atesorarla con el aislamiento de la superficie exterior de la vivienda; de cualquier otro modo perderemos mucha energía útil. La arquitectura vernácula ideó en el pasado innumerables formas de conseguir este efecto, a saber, disminuir la demanda de *calefacción activa* antes de ocuparse de cómo *ofrecerla*.¹⁹

¿Habría que volver a quemar madera en estufas, siempre que no quememos al año más madera que la que producen nuestros bosques? Las innovaciones tecnológicas en calderas de combustibles sólidos ofrecen alternativas en ese sentido (utilizando como combustible *pellets*, papel, tela, u otros residuos). La energía útil de la madera se pierde igualmente al quemarla, incluso con mucho peores rendimientos globales, pero al menos, cumpliendo la condición indicada, esa exergía se renueva en los ecosistemas no-artificiales (a los que explotariamos de modo prudente y de los que recibiríamos otros servicios y disfrutes). La *contabilidad exergética no nos dice nada*, sin embargo, del *tiempo* implícito aquí, ni de su significado económico.²⁰

En todo caso, lo fundamental es disminuir nuestra demanda de combustibles. Sospecho que otras *innovaciones*, en la línea de la *climatización* de cada vez mayores espacios, continuarán ocasionando pérdidas cuantiosas e irreparables de combustibles escasos y preciosos, como en la actualidad.

Bombas y calderas

La diferencia señalada al principio del apartado entre el aporte de calor mediante combustibles y el aporte mediante bombeo hace que la comparación entre ambas técnicas no sea, de hecho, *caeteris paribus*, incluso con idéntico rendimiento. Este hecho ya fue advertido en la literatura teórica, aunque como veremos de forma ambivalente. Por el lado positivo:

$$\begin{aligned} &= Q \times (0,155 - 0,068) \\ &= 0,087 \cdot Q \\ &= 0,087 \times 3 \times 0,4 \cdot E_{X,C} = 0,104 \cdot E_{X,C} \end{aligned}$$

La pérdida global, entre bombeo e intercambio, es de $0,36 E_{X,C}$.

Como se ve, el análisis exergético permite identificar dónde y en qué medida se producen las pérdidas, a condición de que tengamos una descripción detallada de la *estructura* del sistema global.

¹⁹Las estrategias para ello son muy diversas y no pueden resumirse aquí. Como ejemplo baste recordar el íglú esquimal: una lámpara de aceite y el calor de los cuerpos tras el juego amoroso bastaban para disfrutar del sueño en un ambiente confortable. En la combustión en la lámpara también se pierde mucha exergía pero, al menos, se emplea para *dos cosas*: iluminación y calefacción; además, y más fundamental, el espacio a *climatizar* se reduce al mínimo imprescindible. En esta tradición arquitectónica no se trata por tanto de diseñar el espacio y mirar, más tarde, qué artefactos y consumos son necesarios para *climatizarlo*: la cuestión del calor está presente desde el principio.

²⁰Sobre el tiempo como indicador del valor de los recursos, véase VALERO (1998).

[...] 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 implícitamente 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, simplemente, lo fácil que es caer en él.²¹ La situación real se muestra en la Figura , en la que para la bomba de calor se usa un rendimiento real, es decir, aquel que puede obtenerse con bombas disponibles comercialmente en la actualidad.

Pero en lo que se refiere al uso masivo de bombas de calor, ATKINS también ve un lado negativo:

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. De hecho, en la Figura ya hemos visto que la bomba de calor *recicla* parte del calor disipado por las centrales eléctricas, de suerte que, al menos globalmente, se trata de un problema inexistente.

Sin embargo, su observación es importante, especialmente en entornos urbanos, pues ahora lo que está en juego es una energía que, como vamos a ver, *necesita* el resto de los habitantes de la ciudad.²²

El profesor FERNANDO RAMÓN (1980) ya sugería la conveniencia de considerar tres espacios o ambientes para entender el funcionamiento térmico de los edificios urbanos y de la propia ciudad:

- el espacio *exterior* a la ciudad, al que en general se le pueden asignar los valores climáticos *meteorológicos* (temperatura, humedad, etc), suministrados por observatorios;
- el espacio *dentro* de los edificios, en donde se desea obtener por cualquier medio condiciones de *confort*; y
- el espacio *afuera* de los edificios (calles, plazas, patios), en los que operan valores *microclimáticos* que dependen de la propia morfología²³ urbana.

Para cada situación climática típica, los dos primeros espacios tienen esencialmente fijadas sus condiciones (estadísticas meteorológicas y condiciones de confort), mientras que las del tercero *dependen* de cómo sea el diseño urbano en sus aspectos térmicos y climáticos, y de cómo funcionen 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 *afuera* realizado por la bomba de calor (aporte endógeno).

²¹ Así que si usted también ha caído en la trampa, no se preocupe en exceso, puede codearse con ATKINS.

²² La observación de ATKINS tiene más enjundia de la que parece a primera vista. Una idea bastante extendida entre las pocas personas que prestamos atención a estos asuntos es que la energía solar es *gratuita*, sin coste. Es ésta una visión *idealista*. La energía solar podría no tener coste *siempre que no compitamos por ella*, ya sea con otras personas humanas, ya con otras especies o ecosistemas. De hecho, la creciente acaparación humana del producto mundial de la fotosíntesis (véase NAREDO *et* VALERO, 1999) significa que la propia energía solar va por la senda de costes crecientes, debido a la competencia, aunque partiendo de costes muy bajos. No hay que olvidar que la potencia de la radiación solar, aunque enorme en comparación con nuestros actuales consumos, es limitada, y su uso no puede crecer indefinidamente.

²³ RAMÓN llama la atención sobre el hecho de que igual que existe una «arquitectura del dentro» (la que ‘disfrutamos’, por ejemplo, en un cine) también existe una «arquitectura del fuera», es decir, el conjunto de operaciones de diseño formal que hagan posible mejorar el bienestar climático en ese espacio (calles, plazas, etc).

Comparación del rendimiento y pérdidas en la calefacción de viviendas según la instalación empleada, caldera de gas (rendimiento del 85 %) y bomba de calor eléctrica (250 %). En el primer caso (p.95) se contabiliza exclusivamente los flujos de energía y materiales en la propia vivienda. En el segundo (p.95), se amplía la contabilidad para incluir la generación de la electricidad que consume la bomba de calor.

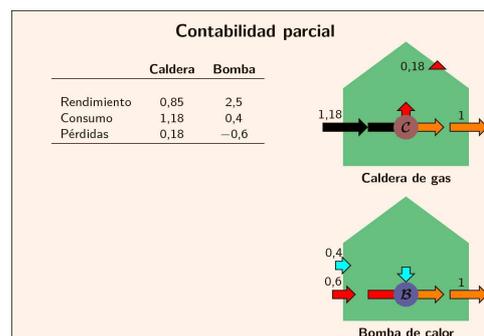
En ambos casos, se usa la ‘mejor’ instalación de la bomba de calor para calefacción, disipando la energía del motor en el ambiente interior (una instalación poco frecuente que sería inadecuada para refrigeración), de forma que los rendimientos calculados son ligeramente superiores a los de instalaciones reales. Por el contrario, la caldera elegida es estándar, existiendo hoy en día calderas de mayor rendimiento. (La justificación de los valores empleados se da en VÁZQUEZ *et alii*, 2007.)

Los números, adimensionales, representan los flujos energéticos para compensar en cada caso la pérdida de una unidad de energía, pérdida asociada al mantenimiento del confort en el interior de la vivienda, es decir, a mantener el gradiente de temperatura entre el interior del edificio y el espacio inmediato exterior; esta pérdida es, por tanto, *necesaria* y el flujo de calor correspondiente es un flujo *útil*, mientras que el resto son consumos de combustibles o pérdidas sin utilidad. Los flujos son de calor (rojo, naranja en el caso de las pérdidas necesarias), de combustibles (negro), o de electricidad (azul).

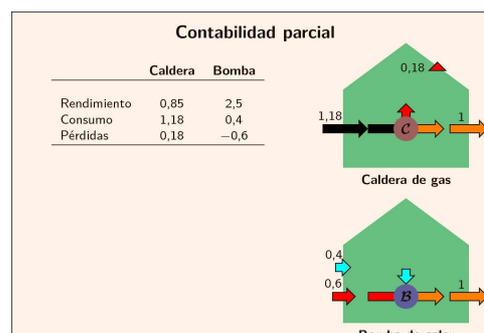
El flujo *útil* es esencialmente proporcional, en condiciones estáticas, al gradiente de temperatura entre el interior y el exterior del edificio y a la transmitancia de su envolvente exterior. En condiciones dinámicas, las del mundo real, interviene también la inercia térmica y la capacidad de ganar o perder calor por radiación del edificio, detalles que no se tienen aquí en cuenta.

Evaluación *parcial* del rendimiento, en la que sólo se tiene en cuenta el rendimiento del propio aparato.

Nótese que las pérdidas en el caso de la bomba son, según esta contabilidad, *negativas*: la bomba *gana* calor, o, más exactamente, recicla el calor exterior.



Evaluación *global* teniendo en cuenta el coste de generación de la energía eléctrica. La imagen de la central eléctrica es una simplificación pues, por conveniencia, se incluyen en sus pérdidas todas las que se producen desde la extracción de los combustibles hasta la diferencia de potencial en el enchufe de la vivienda (véase un análisis del rendimiento de la generación de electricidad en España en VALERO, 1999). El rendimiento asignado a la generación eléctrica (25 %) representa al *pool* eléctrico en España, aunque debe notarse que este rendimiento medio varía en el tiempo (dependiendo, por ejemplo, de la electricidad de origen eólico producida cada año o del recurso a centrales térmicas de carbón). Para la caldera, el rendimiento del aparato es prácticamente el rendimiento global.



Nótese que la bomba de calor efectivamente *recicla* calor disipado por la propia central eléctrica, aunque sólo alcanza a reciclar una parte, por lo que el proceso conjunto central/bomba (en cuya cadena contable reaparecen los combustibles) ofrece un rendimiento menor (y mayores pérdidas) que la caldera de gas.

Al considerar el espacio de *afuera*, 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 de todo lo demás), lo que resulta en un consumo energético proporcionalmente menor.²⁴

Las técnicas tradicionales de aporte exógeno de calor resultaban perfectamente compatibles con el efecto de la morfología urbana: en invierno, el calor aportado *dentro* se disipaba hacia *fuera*, caldeándolo a su vez. Es decir, el calor aportado en forma de combustión *dentro* se usa en realidad dos veces para mantener dos gradientes térmicos diferentes: por un lado la diferencia **dentro/fuera**, y por otro la diferencia **fuera/exterior**. 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/exterior**, 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 de *afuera*, disminuye la diferencia **fuera/exterior**, 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 las normativas técnicas de cálculo de instalaciones, en las que implícitamente se supone que todas las instalaciones consideradas han de mantener el mismo gradiente térmico entre el *dentro* y el *afuera*, lo que no es necesariamente el caso.

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 *afuera* 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 .

Este efecto negativo, sin embargo, es más significativo en verano: en nuestro país, el efecto de varias bombas de calor, operando en patios o calles de pequeña anchura para refrigerar el interior de los edificios, tiene como resultado la elevación de la temperatura de *afuera* 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 de *afuera* 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 tradición de ventilar por la noche, 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 (si no te dejan dormir, júnete a la fiesta!): 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.

En definitiva, el efecto de las bombas de calor sobre el microclima urbano, sobre el espacio de *afuera*, 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. Además, una vez instalada para calefacción, ¿quién puede resistir la tentación de encenderla en un tórrido verano?

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

²⁴Estos fenómenos han recibido distintas denominaciones: microclima urbano, isla de calor, etc.

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*. El microclima urbano (caracterizado por una temperatura T_{fC}), resulta así algo más suave que el clima meteorológico, aquél que se padece en el rededor rural.

En la ‘**ciudad eléctrica**’, abajo, sólo una pequeña fracción del calor consumido en las centrales eléctricas llega a la ciudad, en forma de electricidad, 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, temperatura T_{fB} , 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 a mayores pérdidas por tanto), viendo *a la vez* disminuir su rendimiento.

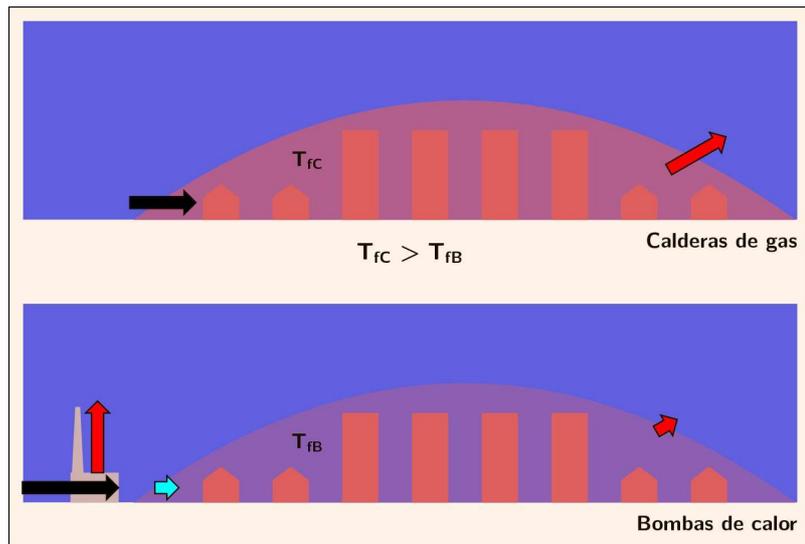


FIGURA 2: Efectos urbanos del tipo de calefacción

Detalles aburridos

Se pueden cuantificar los distintos aspectos mencionados manejando un mundo ideal, sin rozamientos ni pérdidas. En él, como vimos, el rendimiento *teórico e ideal* del bombeo de calor viene dado por $T/\Delta T$, siendo T la temperatura de confort y ΔT el gradiente térmico contra el que se bombea.²⁵

En Madrid, el invierno, puede caracterizarse por temperaturas mínimas medias: una temperatura de confort de 20°C y una meteorológica de -5°C en el espacio exterior, y de 0°C en el *afuera* urbano, es decir, un gradiente fuera/exterior de 5°C. Para el espacio *exterior*, el bombeo tiene un rendimiento *teórico* de $(273\text{ K} + 20^\circ\text{C})/(20^\circ\text{C} - (-5^\circ\text{C})) \approx 12$, mientras que para el espacio del *fuera*, el rendimiento es superior: $(273 + 20)/(20 - 0) \approx 15$. En conclusión, dentro de la ciudad, una bomba de calor que se aproveche del calor disipado por otros artefactos de aporte exógeno, ve aumentar su rendimiento en un 25 %.

¿Cómo afecta la proliferación de bombas a la temperatura *afuera*? Una aproximación lineal, en la que se desprecian todos los fenómenos no lineales de la convección y la circulación, permite dar una imagen si quiera cualitativa. Para Madrid, en invierno, en las condiciones antedichas, se obtienen las siguientes estimaciones en función de la fracción de volumen edificado acondicionado con bombas, contando el resto con una instalación de aporte exógeno:

Volumen acondicionado con bombas (%)	0	25	50	75	100
Temperatura <i>afuera</i> (°C)	0	-0,97	-2,04	-3,21	-4,49
Incremento de las pérdidas de calor (%)	0	4,87	10,2	16,0	22,4
Incremento del rendimiento de las bombas (%)	0	-4,63	-9,26	-13,8	-18,3
Incremento del consumo de energía primaria (%)	0	6,14	15,8	29,9	50

El incremento de las pérdidas de calor se refiere a las de todo el volumen edificado, que se supone aislado de manera uniforme, con independencia de la instalación empleada; y como se ve, la potencia servida aumenta con la proliferación de bombas de forma significativa. Para estimar el incremento del consumo de energía primaria se ha partido de la hipótesis de que la instalación de aporte exógeno opera con un rendimiento global idéntico al de la *primera* bomba instalada y de que es independiente del gradiente térmico. En todo caso, la cuantificación anterior debe leerse en clave *cualitativa*, dada la simplicidad del modelo empleado. (Entre las muchas cosas que el modelo empleado no refleja está el aporte energético exógeno al espacio del *fuera* con distinto origen que la propia edificación: soleamiento, transporte, etc; aunque que cabe esperar que su influencia cualquiera que sea no dependa del número de bombas.)

El rendimiento de una bomba depende sustancialmente del gradiente térmico de operación, por lo que resulta en parte ilusorio hablar del rendimiento como de una constante —aunque sea habitual.²⁶ Por ejemplo, dentro de la ciudad, el aumento de 5°C en el termostato durante el invierno, puede ocasionar una variación del rendimiento desde el 15 anterior hasta $(273 + 25)/(25 - 0) \approx 12$. Es decir, el aumento innecesario de la temperatura de confort tiene, en el caso de Madrid, el mismo efecto sobre el rendimiento que trasladar *literalmente* la vivienda de la ciudad al campo.

En Madrid, para el espacio ‘exterior’ en verano, el bombeo tiene un rendimiento $(273 + 25)/(30 - 25) \approx 60$, mientras que para el espacio del *fuera*, el rendimiento es inferior: $(273 + 25)/(40 - 25) \approx 20$. Comparando con la situación invernal, el bombeo resulta *teóricamente* algo más eficaz para la refrigeración que para la calefacción, debido a las peculiaridades climáticas de Madrid. ¿Cómo afecta la presencia de una multitud de bombas de calor? Aquí no es posible un análisis lineal, dado que la refrigeración pasiva (ventilación nocturna, inercia) no admite un representación de ese tipo. Pero, para tener una idea, puede cuantificarse la influencia de un aumento de un grado en la temperatura *afuera*: $(273 + 25)/(41 - 25) \approx 19$, es decir una disminución del rendimiento de la bomba del 6 % por cada aumento de un grado en la temperatura del *fuera*. Como además la carga térmica aumenta por un factor $(41 - 25)/(40 - 25) \approx 1,07$, el consumo de energía primaria aumentaría un 14 % por cada aumento de un grado.

La influencia del ‘termostato’ en verano puede igualmente evaluarse: para una temperatura de confort de 20°C—en vez de 25—, $(273 + 20)/(40 - 20) \approx 15$, con una disminución del rendimiento del 25 %.

La evaluación del uso

En el trabajo ya citado (VÁZQUEZ *et alii*, 2007), tuvimos la oportunidad de estimar el rendimiento global de diferentes instalaciones en edificios atendiendo a varios criterios: consumo de energía prima-

²⁵Nótese que esta formulación es general, así expresada, y vale tanto para refrigeración como para calefacción.

²⁶Es por esta razón que, en los manuales técnicos sobre bombeo de calor, tras definir el *Coefficient of Performance* (COP) —coeficiente de prestación—, como el inverso del factor de Carnot afectado por un coeficiente reductor bastante menor que la unidad (es decir, el rendimiento del aparato), en seguida se introduce el COP estacional, una suerte de rendimiento medio que intenta ponderar los momentos en que la bomba trabaja a su máximo rendimiento junto a aquellos en que funciona en condiciones desfavorables —*Seasonal Performance Factor* (SPF).

ria y varias emisiones contaminantes (consideradas de forma independiente: se trataba de realizar una clasificación multicriterio). En nuestras conclusiones se observaba 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 categoría. 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 los proyectos de nueva planta o de reforma. 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 prohibidos los intercambiadores en fachadas a calles, plazas o patios. (En realidad, en muchos lugares estas prohibiciones ya existen, pero, como pasa con el automóvil, la voluntad política por hacer cumplir normas y leyes en estos casos es inexistente, un hecho que merecería un análisis detallado; véase para un planteamiento general, ARGULLO, 2008.)

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, por una parte, el rendimiento en la generación de la energía suministrada a la bomba, 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 *afuera*, 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). ¡Volvemos a la vieja técnica de la acumulación térmica! 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 fuera significativamente superior al actual uso de la bomba de calor, individual, alocado e insolidario. En todo caso, todas estas esperanzas en un uso racional del bombeo de calor (expresadas en trabajos como el de COURTY *et* KIERLIK, 2007:88-89) deben pasar el filtro del análisis termoeconómico cuanto antes: no tiene sentido seguir especulando en base a simples (y como hemos visto a veces engañosos) balances energéticos.

Un poco más allá: el coste de construir artefactos

Tras mi experiencia en el uso de la segunda ley (durante años y en diversas áreas) he llegado a una conclusión provisional: conforme se examinan más y más detalles del funcionamiento de un artefacto o de un sistema, la estimación de su rendimiento global va disminuyendo (nunca aumenta). A favor de la validez general de esta conclusión provisional juega la estructura epistemológica de la propia ley, aunque no es este lugar apropiado para entrar en detalles. Bastará, espero, con examinar más y más detalles de la bomba de calor eléctrica en comparación con calderas, hornos y otros ingenios para la combustión.

Usted, sin duda, se sentirá capaz de organizar un simple fuego en el campo (siempre y cuando cuente con cerillas o encendedor de gas, o al menos un chisquero). Un poco más difícil, pero todavía a su alcance, sería organizar un hogar, abierto, sin chimenea. Quizá sólo alguien con artesanía se sentiría capaz de un horno para pan. Y llegar al horno de porcelana, 1,500°C o más, parece fuera del alcance común. Pero no es así: basta una lectura pausada de cualquier buen manual (véase, por ejemplo, RHODES, 1981) para darse cuenta de que la construcción de los hornos de leña es asequible: no hace falta muchos materiales, ni que sean especiales o exóticos: la clave está en la *forma*: proporción de la altura de la chimenea con el volumen del horno, trazado de la circulación del gas desde el hogar hasta la chimenea, etc. Lo que hay que poner es sobre todo *ingenio*.

¿Y una bomba de calor eléctrica? Aquí el panorama es desolador. A parte de compresores, serpentines, ventiladores, y toda una retahíla de chismes, más tarde o más temprano, aparece como el elemento más importante el fluido refrigerante. En España, el más común es el R-22, que responde a la fórmula química CHClF_2 , un fluido halogenado, bastante menos perjudicial para la capa de ozono que los famosos CFCs, pero que en cualquier caso dejará de fabricarse en la Unión Europea hacia 2014. El fluido refrigerante debe cargarse en el circuito correspondiente tras hacer el vacío en el mismo (y la calidad de ese «vacío» es clave para obtener el maravilloso rendimiento esperado). Rápidamente se llega a la conclusión, a la vista de las complicaciones, que la bomba de calor es un producto intrínsecamente industrial y que sólo cabe comprarlo, estando su fabricación artesana fuera de lugar: la bomba de calor necesita *la industria* —de hecho muchas industrias— en funcionamiento.

Fácil o difícil, artesanía o industria, construir cualquiera de estos artefactos requiere energía y, por tanto, consumir combustibles. Y estos consumos, en buena lid, deben contabilizarse a la hora de calcular un rendimiento global. Claro que, para ello, hay que tener al menos una idea de cuanto tiempo van a estar en funcionamiento. O, más precisamente, cuanto calor van a producir a lo largo de su vida. Pues sólo entonces podremos repercutir adecuadamente estos costes de fabricación sobre cada unidad de calor producido. Por tanto, un factor clave es la *durabilidad*: un gran coste de fabricación del artefacto puede tener una repercusión marginal si el artefacto en cuestión es capaz de producir una cantidad igualmente enorme de calor a lo largo de su vida. Y al revés, un pequeño consumo de combustible durante la fabricación puede significar la mayor parte del total si el artefacto en cuestión deja de funcionar al cabo de poco tiempo (sin apenas oportunidad de consumir combustibles durante su funcionamiento). En cualquier caso, la consideración de la fabricación *siempre rebaja* la estima del rendimiento global basada en el simple uso.

¿Cuánto dura una caldera? ¿Cuánto dura una bomba de calor eléctrica? En ningún documento de los fabricantes encontrará semejante información: la única pista es el periodo de garantía ofrecido en el momento de la compra —es una pista poco significativa al ser, normalmente, un periodo mínimo obligado por la legislación. Todavía más, ¿cuánto dura una bomba de calor eléctrica con el rendimiento oficial ofertado —medido según protocolos aplicados a aparatos recién estrenados? No hay respuesta.

La carencia de información contrastada sobre estos asuntos suele justificarse con el argumento de que la fabricación representa un coste energético pequeño comparado con el consumo posterior durante el uso. Una curiosa conclusión, pues para comprobarla habría que manejar *precisamente* la información cuya carencia se intenta justificar: la pescadilla se muerde la cola. El contra-argumento habitual detalla el coste monetario de la inversión y lo compara con el coste monetario del uso durante una vida media arbitraria (o, al menos, no garantizada), reivindicando que es pequeño o marginal. Pero puesto que los costes monetarios no tienen una relación clara con los costes energéticos y, menos aún, con los impactos en el ambiente (véase la nota 1), tales cálculos tan sólo muestran que es más barato comprar el artefacto que usarlo, ¡una curiosa noticia! Cuando ya es demasiado tarde, el presupuesto familiar ha de hacer frente a una nueva factura mensual.

Este tipo de cálculos, el del coste de fabricación, mantenimiento, etc, es decir, todos los costes necesarios para mantener *en uso* un artefacto; cuando se acometen, suelen deparar sorpresas. Así por ejemplo, en España, en condiciones medias, para estimar el coste monetario global de un trayecto en automóvil hay que multiplicar por dos el coste de la gasolina, a fin de tener en cuenta la amortización del vehículo, su mantenimiento, seguros, etc. Mientras que tal análisis no se realice con solvencia para las instalaciones de los edificios, el debate sobre «qué es mejor» consistirá en navegar en círculos pensando que vamos hacia alguna parte.

Sin este tipo de análisis, e ignorando sus más plausibles resultados, se puede afirmar alegremente que la energía atómica no emite CO₂ a la atmósfera, como si al construir la central, al extraer el mineral de uranio de sus yacimientos, al refinar el metal en un proceso químico y físico complicado y laborioso (recuérdense las famosas centrifugadoras de Irán), al elaborar las barras de combustibles, al construir los almacenes para los residuos, y al mantener éstos últimos en buen estado con sus diversos sensores durante cientos sino miles de años, no fuéramos a consumir ni gota de combustible. Afirmación que, de forma preocupante, se ve repetida cada vez con más frecuencia en los *media* de una sociedad que vive en la ilusión de encaminarse a un futuro luminoso.

No es ocioso recordar, como último ejemplo, el papel importante jugado por el análisis del coste energético de la construcción de la infraestructura, en la tarea de dotar de argumentos al importante movimiento social de oposición al Trasvase del Ebro, proyecto felizmente abandonado hasta la fecha (véase el número monográfico *Boletín CF+S 27*).

Ejercicio final

Casi al principio (p. 88) se afirmó la existencia de calentadores de agua a gas con un rendimiento mayor de la unidad, de 1,05. La cifra, referida al rendimiento del propio aparato, es correcta en términos energéticos, y no una trampa. ¿Sería usted capaz de imaginar que tipo de artilugio se ha empleado en tales calentadores *high-tech*?

Are you ready?

Por supuesto se trata de una suerte de mini-bomba de calor eléctrica (esos calentadores se enchufan también a la red), capaz de recuperar calor de los gases de la combustión mediante el consumo de un poco de electricidad adicional. En el rendimiento de tales aparatos, en el denominador, se suman ahora alegremente la energía útil del gas y la electricidad. Sin duda se trata de un progreso...

Referencias

- ARGULLOL, RAFAEL
2008 «Hybris»
El País, 26-4-2008.
- ATKINS, P.W.
1984 *The second law*.
s.c.: Scientific American Books, Inc. (Se cita la traducción castellana de JOSEP ENRIC LLEBOT, DAVID JOU, y JOSÉ CASAS-VÁZQUEZ, *La Segunda Ley*, Barcelona: Prensa Científica, 1992.)
- COURTY, JEAN-MICHEL; EDOUARD KIERLIK
2007 «El calor que vino del frío»
Investigación y Ciencia, edición española de *Scientific American*, número 364, pp. 88-89.
- DGVAU (ESPAÑA)
1999 *Guía de la edificación sostenible*.
Madrid: Ministerios de Fomento, Centro de Publicaciones. Dirección de la Vivienda, la Arquitectura y el Urbanismo; Institut Cerdà; Instituto para La Diversificación y Ahorro de la Energía
- EL-SAYED, YEHIA M.
2003 *The Thermoeconomics of Energy Conversions*.
s.c.: Pergamon, 276 p.
- LÓPEZ, CAYETANO
2003 «La quimera del hidrógeno»
El País, 26-3-2003, <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n37/aclop.html>
- NAREDO, JOSÉ MANUEL; et FERNANDO PARRA
2000 *Economía, ecología y sostenibilidad en la sociedad actual*.
Madrid: Siglo XXI
- NAREDO, JOSÉ MANUEL; et ANTONIO VALERO
1999 *Desarrollo económico y deterioro ecológico*.
Madrid: Fundación Argentaria / Visor Distribuciones
- RAMÓN MOLINER, FERNANDO
1980 *Ropa, sudor y arquitecturas*.
Madrid: H. Blume Ediciones
- RHODES, DANIEL
1981 *Kilns*.
s.c.: Chilton Book Co. (Hay traducción castellana anónima, *Hornos para ceramistas*. Barcelona: Ediciones CEAC, 1987.)
- SZARGUT, J.; MORRIS, D.R.; STEWARD, F.R.
1988 *Energy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes*.
Hemisphere Publishing Co., New York
- SZARGUT, J.
2005 *Exergy Method: Technical And Ecological Applications*.
Southampton; Boston: WIT Pr/Computational Mechanics
- VALERO, ANTONIO
1998 «Termoeconomía: El punto de encuentro de la Termodinámica, la Economía y la Ecología»
Boletín CF+S, número 5, <http://habitat.aq.upm.es/boletin/>.
- VALERO, ANTONIO
1999 «El “coste ecológico” de la energía eléctrica. Un ejemplo de cálculo»
en NAREDO et VALERO (1999:219-222)
- VALERO, ANTONIO
2000 «El marco termodinámico para iluminar la sociedad actual»
en NAREDO et PARRA (2000:67-95)
- VALERO CAPILLA, ANTONIO; MIGUEL ÁNGEL LOZANO SERRANO
1994 *Curso de Termoeconomía*
Zaragoza: Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza

VÁZQUEZ ESPÍ, MARIANO; MARGARITA LUXAN GARCÍA DE DIEGO; AGUSTÍN HERNÁNDEZ AJA;
GLORIA GÓMEZ MUÑOZ
2007 «Sobre la evaluación ecológica de las instalaciones en los edificios»
El Instalador, número 438