**Cod. 8465** | Ingeniería y tecnología del medio ambiente | 3308.99-1 Desarrollo sostenible

# Análisis del ciclo de vida (ACV) de una bomba de calor aire/aire aplicada a un edificio terciario como contribución a una energía renovable

*Life cycle assessment (LCA) methology of air/air heat pump aplicated to a tertiary building as a contribution to renewable energy*

José-Adolfo Lozano-Miralles[1,3], José-Manuel Palomar-Carnicero[3], Rafael López-García[3], Francisco-Javier Rey-Martinez[4]

Universidad de Sevilla[1], Universidad de Madrid[2], Universidad de Jaén[3] y Universidad de Valladolid[4] (España)

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/8465

## INTRODUCCIÓN

La mayor parte de nuestras vidas la desarrollamos en un entorno construido. La industria y la edificación consumen grandes cantidades de recursos del planeta, lo que provoca importantes impactos medioambientales. La creciente explotación de recursos naturales y el aumento de la demanda energética, hacen que nuestro estilo de vida sea insostenible. Como podemos ver en la Figura 1, el consumo de electricidad y de materias primas, encabezan la lista de estos impactos.

Según la Unión Europea CE, y verificado por la UNEP y el OCDE, la construcción urbana y la industria supone altos % de consumo, emisiones y residuos frente al resto de los sectores.

En la fase de diseño de un proyecto constructivo, es donde se toman gran cantidad de soluciones que afectan al resultado final. Buena parte de los procesos asociados al diseño y desarrollo de la actividad industrial o edificatoria no están concebidos para ser sostenibles y por tanto necesitan ser "re-diseñados". Se estima que más del 80% de los impactos ambientales que tiene cualquier edificio durante todo su ciclo de vida, están prefijados desde su etapa de diseño. El diseñador es el que toma las primeras decisiones para mejorar los resultados medioambientales, es el creador del eje vertebrador para el posterior desarrollo del edificio, controlando la elección de materiales y soluciones constructivas empleadas en el proyecto [2].

El crecimiento de las nuevas tecnologías y la constante innovación de las mismas, producen un aumento del confort, pero paradójicamente, también, un aumento de los daños medioambientales. Para reducir estos efectos dañinos, hay que identificar los impactos y los daños en cada etapa o proceso. Uno de estos métodos es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), el cuál de una forma sistemática y objetiva, constituye la herramienta medioambiental más apropiada.

Aunque es cierto que por la energía hay una preocupación ambiental, no debe olvidarse que los límites materiales del mundo son mucho más estrictos que los energéticos, y por tanto el futuro preocupa más por la escasez de recursos, debido al hecho de resultar más fácil convertir materiales en energía que energía en materiales [3].

Es casi imposible cuantificar el impacto negativo sobre el ambiente de las técnicas industriales y constructivas y su coste energético. Se considera que este coste es proporcional al impacto sobre el territorio debido a movimientos de materiales, aunque es bastante ambiguo, ya que para cada material se puede contabilizar su coste a través de una serie de operaciones, escondidas e implícitas en el agregado final de energía. Es decir, el impacto ambiental de un solo material, ya no sólo un sistema constructivo, depende del proceso constructivo, eficiencia, distancia de la producción y transporte, residuos de dicho material. [4]

Existen diversas herramientas que evalúan las emisiones de $CO_2$ de los edificios. Herramientas internacionales de certificación sostenible, que van enfocadas a fases avanzadas de diseño, o cuando el proyecto está finalizado. Coexisten en España otras herramientas, actualmente muy utilizadas, las herramientas de certificación energética, que son herramientas que evalúan el impacto ambiental dependiendo del consumo energético del edificio en la etapa de uso. Ninguna de estas herramientas cuantifica y prevén los impactos producidos por el edificio en todo su ciclo de vida. Las herramientas de Análisis de Ciclo de Vida son clave en la etapa de diseño, para desarrollar un proceso sostenible, para así mejorar los resultados medioambientales. Herramientas que evalúan un edificio "desde la cuna a la tumba", pasando por todas las etapas de vida del edificio y sus materiales.

Para estudios de ACV de cualquier producto o material, la Comisión Europea, *Methodology Study Eco-desing of Energy-Using Products* (MEEUP) clasifica los estudios de ACV según las herramientas informáticas, metodologías y bases de datos. Existen bases de datos de productos químicos, de envases, otras para el ecodiseño de productos, para productos industriales, incluso algunas permiten asociar costes y realizar análisis económicos. Hay herramientas para realizar estudios de ACV prácticamente de todos los productos y sectores específicos.

La metodología estandarizada de ACV se define en la serie de normativas ISO 14040-14050 de aplicación medioambiental. Esta norma es la que marca los límites para la aplicación y desarrollo de un ACV, dividiéndose en otras en función del tema a desarrollar. Se han producido

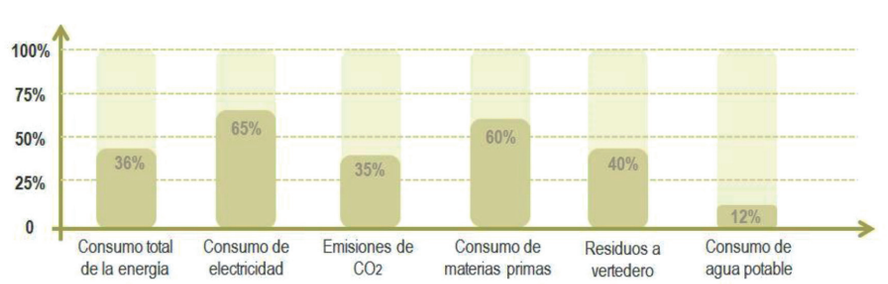


*Figura 1: Consumos y emisiones del sector edificatorio e industrial. [1]*

numerosas modificaciones y actualizaciones a lo largo de los años con respecto a esta norma, pero la base se puede resumir en las siguientes:

| Standard | Descripción | Primera Edición |
|---|---|---|
| ISO 14040:1998 | Principios y marco de referencia | 1998 |
| ISO 14041:1999 | Objetivo, alcance y análisis del inventario | 1999 |
| ISO 14042:2001 | Evaluación del impacto | 2001 |
| ISO 14043:2001 | Interpretación de resultados | 2001 |
| | | |
| Modificaciones: | | |
| ISO 14040:2006 | Principios y marco de referencia | anula a 14040:1998 |
| | | 14041:1999 |
| | | 14042:2001 |
| | | 14043:2001 |
| ISO 14044:2006 | Requisitos y directrices | 2006 |

*Figura 2: Serie ISO 14040 Standard [7]*

## 2. ACV DE UNA BOMBA DE CALOR AIRE/AIRE EN UN EDIFICIO TERCIARIO

### 2.1. OBJETIVOS

De acuerdo a estas normas, nuestro principal objetivo es la aplicación de un Análisis de Ciclo de Vida a un Sistema de Bomba de Calor situado en un edificio terciario, usando para ello la metodología EPS 2000. Esto nos permitirá, en un futuro, tener conocimiento de los impactos que producen otras alternativas, y disponer de otro criterio más a la hora de la elección de un determinado sistema de producción de energía.

### 2.2. METODOLOGÍA

#### 2.2.1. EQUIPOS

La bomba de calor seleccionada tiene las siguientes características, de acuerdo a los requerimientos térmicos de calefacción demandados por cuatro aulas de 93,90 $m^2$ localizados en un edificio de la Universidad de Jaén. El análisis se realizó a una bomba de calor compuesta por una máquina exterior de la marca MITSUBISHI ELECTRIC, modelo FDCA224HKXE4, y cuatro máquinas interiores de la misma marca y modelo FDT36KX. Las especificaciones técnicas de estas máquinas han sido obtenidas del catálogo técnico [8].

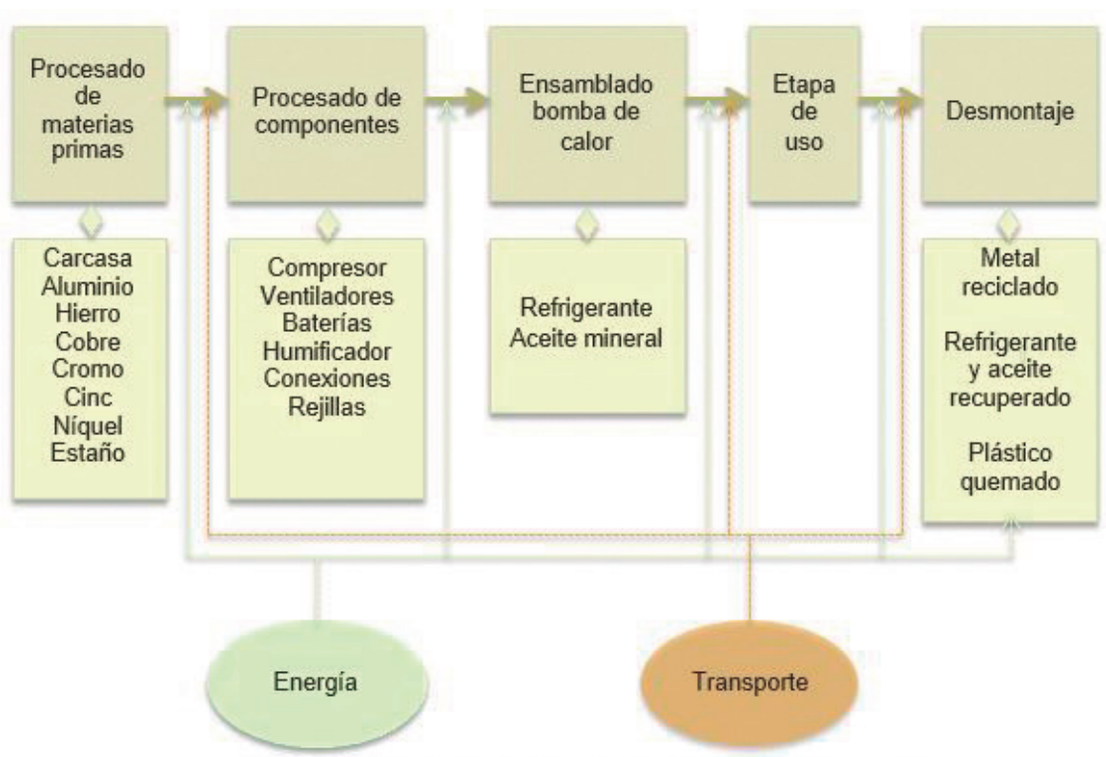


*Figura 3: Ciclo de vida de la bomba de calor. (Elaboración propia)*

### 2.2.2. CICLO DE VIDA

Para entender de una manera sencilla el ciclo de vida de la bomba de calor, hemos realizado el siguiente diagrama representativo, tal y como se observa en la Figura 3. En él se desglosan los flujos de materiales y la energía que habitualmente se necesitan para este tipo de sistemas. Los datos para la realización del inventario fueron obtenidos de los catálogos correspondientes a cada máquina, y adaptados a las unidades y características de la base de datos utilizada. Así mismo, para el cálculo de distancias para el transporte de los aparatos ya fabricados, se ha considerado que la fábrica se encuentra en Sevilla, y que para su montaje en el edificio, se ha utilizado un camión completo hasta el almacén de la empresas instaladora. Posteriormente, la distribución se ha realizado mediante furgoneta hasta el edificio donde se realiza la instalación.

De la misma forma, al introducir los datos en el programa informático, se han considerado los elementos y procesos que nos aportan más información medioambiental. Otro punto a considerar es, que al final de la vida útil del sistema, se produce un desmontaje y reutilización de algunos elementos, siendo esta fase, opcional según diversos factores. Se ha considerado la recogida y recuperación del refrigerante y el aceite mineral, proceso obligatorio por la normativa española.

### 2.2.3. INVENTARIO

A continuación describimos las partes y los materiales más significativos de las que se compone el sistema estudiado, expresando las cantidades de cada elemento y la totalidad del conjunto, como podemos observar en la Figura 4. De ésta forma obtenemos todos los datos necesarios que nos harán falta para la posterior introducción en el software de cálculo.

### 2.2.4. CONSUMO ANUAL DE ENERGÍA

Para el cálculo del consumo anual de energía se han considerado los siguientes límites: la temperatura de funcionamiento seleccionada para el interior de los edificios terciarios es de 22ºC invierno y de 24ºC en verano, considerando la normativa española sobre diseño de máquinas térmicas [9]. El horario de trabajo (aulas de docencia), es de 09.00 h a 20.00 h. El

| INVENTARIO | | | | |
|---|---|---|---|---|
| CONCEPTO | EXTERIOR | INTERIOR | CONEXIONES | TOTAL |
| MATERIAS PRIMAS (kg) | FDCA224HKXE4 | FDT36KX | 4 ud | 1 ext. + 4 int. |
| Carcasa (plástico) | 86,89 | | | 86,89 |
| Hierro | 78,07 | 35 | | 112,93 |
| Aluminio | 40,17 | 38 | | 77,95 |
| Cobre | 17,11 | 9 | 16,35 | 42,79 |
| Níquel | 3,48 | | | 3,48 |
| Plomo | 3,48 | | | 3,49 |
| Cromo | 2,89 | | | 2,89 |
| Polietileno | 5,82 | 6 | | 11,36 |
| Cinc | 1,11 | | | 1,46 |
| Estaño | 0,02 | | | 0,04 |
| PVC | 0,09 | | | 0,19 |
| Goma | 0,82 | | | 0,82 |
| Total | 240,00 | 88,00 | 16,35 | 344,36 |
| | | | | |
| ENERGIA | | | | MJ |
| Petróleo (Caldera, 1 MW) | 1.538,81 | 618,57 | 154,64 | 2.312,03 |
| Gas natural industrial (>100 kW) | 1.538,81 | 618,57 | 154,64 | 2.312,03 |
| Electricidad de Medio Voltaje | 112,83 | 45,36 | 11,34 | 169,54 |
| | | | | |
| TRANSPORTE | | | | tKm* |
| Camión (40 t) | 23,91 | 8,80 | 1,63 | 34,35 |
| Furgoneta (<3,5 t) | 55,01 | 20,24 | 3,76 | 79,010 |
| Tren | 47,83 | 17,60 | 2,61 | 68,05 |
| | | | | |
| BASURA (incinerador público) | | | | kg |
| Polipropileno | 5,82 | 5,53 | | 11,36 |
| PVC (Policloruro de vinilo) | 0,09 | 0,09 | | 0,19 |
| Goma | 0,82 | 0,00 | | 0,82 |
| EMISIONES A LA ATMÓSFERA | | | | MJ |
| Calor residual | 112,84 | 45,36 | 21,12 | 179,32 |
| | | | | |
| tKm*. Esta unidad es el transporte de 1 tonelada de material en 1 km | | | | |
| Para el cálculo del transporte, se ha considerado la fábrica en Sevilla. | | | | |

*Figura 4: Inventario de la bomba de calor. (Elaboración propia)*

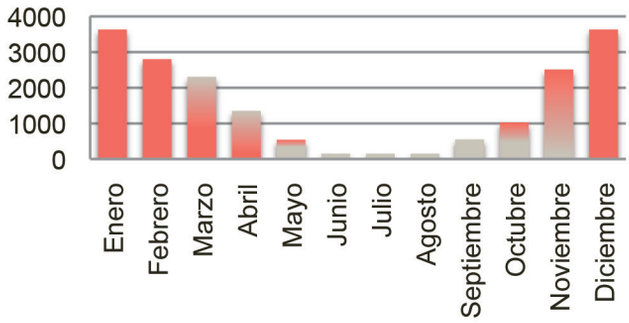


*Figura 5: Consumo de energía. Fuente: Elaboración propia*

cálculo de los días lectivos viene desarrollado de la siguiente manera: 2 cuatrimestres de 22 días/mes, obtenemos un uso de 176 días. Por lo que el total de horas de trabajo del sistema es de 3.036 horas/año. Considerando una expectativa de vida de la bomba de calor de 10 años, obtenemos un total de 19.360 horas. Por lo tanto el consumo de energía en este período, sería de 115.772,80 kW, o lo que es lo mismo 0,4167 TJ. En la figura 5, podemos analizar la estacionalidad significativa en el consumo, debido a la actividad a la que está destinado el edificio, edificio terciario con uso docente.

### 2.2.5 ANÁLISIS DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

Con los datos anteriormente aportados, realizamos una evaluación de los impactos medioambientales que el sistema de bomba de calor provoca. Para ello utilizaremos un software, llamado Simapro, en el que dentro de las distintas bases de datos disponibles, utilizaremos la EPS 2000 (*Environmental Priority Strategies*) [10]. Esta metodología evalúa los daños provocados en cuatro categorías de impacto, cuyas características describimos en la Tabla 6.

| CATEGORIA DE IMPACTO | INDICADOR DE CATEGORIA | UNIDADES |
|---|---|---|
| Calidad del ecosistema | FDP* | FDP x $m^2$ x año |
| | | |
| Salud humana | DALY** | Persona x año |
| | | |
| Recursos naturales | Daño a los recursos | MJ/kg |
| | | |
| Recursos abióticos*** | Agotamiento | kg |

* Fracción de desaparición potencial del ecosistema por $m^2$ y año.
** Disability-adjusted life year: Reducción de los años de vida por persona/año.
*** Recursos climáticos, geológicos y geográficos. (Biodiversidad)

*Figura 6: Indicadores de los impactos*

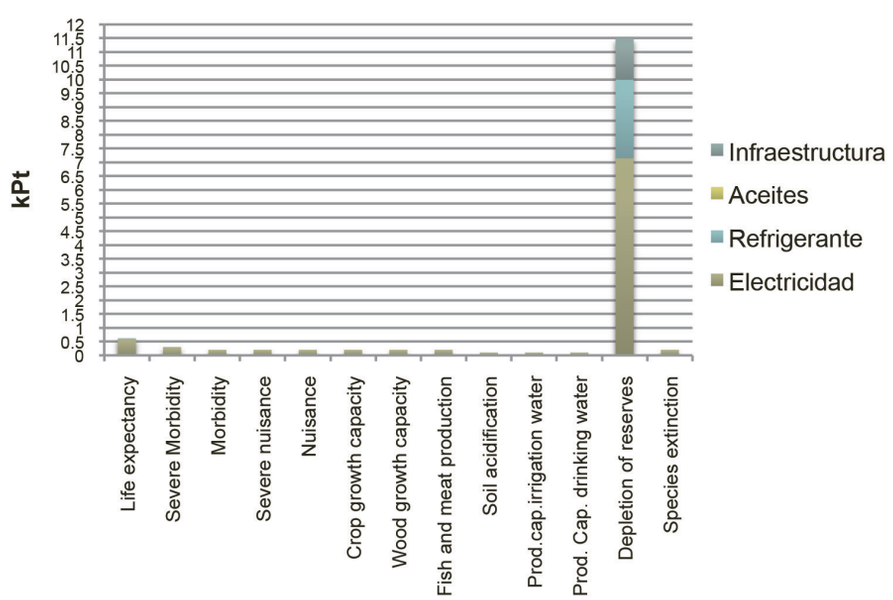


*Figura 7: Indicadores de impacto de la bomba de calor según EPS 2000*

## 3. RESULTADOS

Una vez introducidos los datos del inventario, el programa nos facilita los resultados con los recursos utilizados y las emisiones generadas al medioambiente (ver apartado material complementario) y, donde podemos analizar los porcentajes de contribución que aportan las diferentes partes del sistema de bomba de calor a cada categoría de impacto. Estos datos nos han sido facilitados por el programa, a partir del cálculo del consumo de energía anual que produce el sistema a lo largo de la vida útil estimada del sistema.

De las gráficas obtenidas, podemos analizar los impactos que producen cada parte del sistema de bomba de calor, que vienen recogidos en la Figura 7.

En esta gráfica podemos observar como el impacto más importante se produce sobre el agotamiento de los recursos, motivado por la generación de la electricidad necesaria para la fabricación y uso del sistema. Seguidos a estos impactos se encuentran el impacto del refrigerante y de la infraestructura, sobre el agotamiento de los recursos.

Haciendo un estudio en función de las categorías, la metodología EPS 2000 nos marca que durante la fabricación y uso de la bomba de calor, el agotamiento de recursos es el 65% del total de la contribución. Así mismo, es también importante el impacto sobre la expectativa de vida (Salud humana), que viene a ser el 28%, generadas principalmente por las emisiones de CO2 durante la etapa de generación de electricidad, mientras que el porcentaje restante 7% corresponde con el impacto sobre los ecosistemas.

### 3.1. CONTRIBUCIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE DE UNA BOMBA DE CALOR AIRE/AIRE

De acuerdo la decisión de la Comisión de 1 de marzo de 2013, de cara al cumplimiento de la Directiva 2009/28/CE de 23 de abril de 2009, y aplicando los criterios marcados en el anexo VII, consideramos que las bombas de calor utilizan una parte de su consumo total de energía como

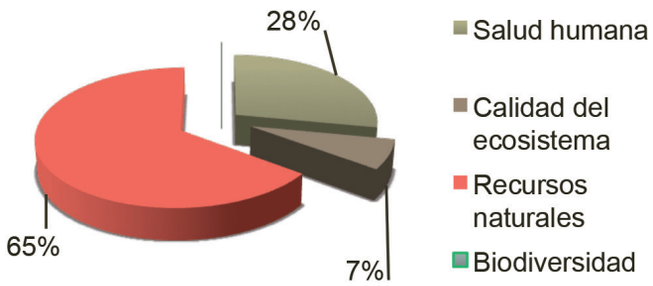


*Figura 8: Importancia del daño según la categoría de impacto. Resultados del software Simapro*

energía renovable. Para ello hacemos el cálculo de cuánto supone la parte de energía renovable consumida por nuestra bomba de calor.

Para que una bomba de calor pueda ser considerada de origen renovable deben cumplir dos requisitos que podemos resumirlo en: que la bomba de calor sea utilizada como sistema calefacción y que adicionalmente su SPF (factor de rendimiento medio estacional) sea superior a 2,5. Para el análisis de la contribución de nuestra sistema en energía renovable vemos que el primer criterio se cumple, pues hemos considerado que el sistema sólo funciona aportando calor, para poder realizar un comparativo con otros sistemas en el futuro, tal y como se describe en el punto 2.2.1 del presente estudio. Con respecto al segundo punto estimamos que se cumple al no afectar al desarrollo de nuestro estudio.

$$E_{RES} = Q_{USABLE} (1-1/SPF)$$

Cálculo del SPF;

$$SPF = COP * FP * FC$$

COP = 5,45 obtenido del catálogo del fabricante,
FP = 0,62 Tabla 4.1 [11]
FC = 1 Tabla 4.2, obteniendo:

$$SPF = 3,378$$

$$E_{RES} = Q_{USABLE} (1-1/SPF)$$

Del punto 2.2.4 del presente estudio obtenemos el cálculo del consumo es de 115.772,80 kW, por lo que:

$E_{RES}$ = 115.772,80 (1-1/3,378) = 81.500,21 kW como energía renovable

## 4. CONCLUSIONES

Podemos concluir, que el uso del ACV como metodología para determinar los impactos producidos durante el ciclo de vida de los productos, procesos o sistemas analizados, es satisfactoria y nos aporta una información necesaria para la toma de decisiones. De los resultados obtenidos del cálculo de la energía renovable que consume nuestra bomba de calor, podemos destacar la gran eficiencia de la bomba de calor estudiada.

De forma específica, del análisis de los resultados obtenidos, podemos determinar varios resultados importantes. Uno de ellos, es que el principal impacto de un sistema de bomba de calor, situado en un edificio terciario, se produce durante su etapa de fabricación y uso, y que afecta al agotamiento de los recursos. Estos resultados, coinciden en un tanto por ciento muy elevado con los obtenidos en otros trabajos similares [12] [13]. Esto nos indica, que la elección de los materiales con los que se fabrican los componentes y la eficiencia energética del edificio, son imprescindibles si pretendemos reducir el impacto que producen estos sobre el medioambiente. Así mismo, en el presente estudio, la decisión sobre la elección sobre la expectativa de vida de la bomba de calor y la elección del refrigerante del sistema son extremadamente importantes.

Además hay que enfatizar que con el nuevo criterio medioambiental que nos aporta el ACV en general, y específicamente el presente estudio con este tipo de sistemas ubicados edificios terciarios, nos suponen una innovación importante, y que progresivamente, con nuevas investigaciones, nos aportarán datos que nos permitan fundamentar y justificar la elección de un sistema de producción de energía u otro, con mayor criterio.

Es por ello recomendable, que para completar y aumentar el aporte científico que hemos obtenido con estos resultados, el realizar estudios similares sobre otros sistemas que puedan ser alternativas directas a la bomba de calor analizada, así como el realizar un comparativo con otras metodologías existentes, en este tipo de edificios terciarios.

## PARA SABER MÁS

[1] IDAE. Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía. Estudios, informes y estadísticas. Balances de energía final (1990-2015)
[2] Alavedra, P., Domínguez, J., Gonzalo, E., & Serra, J. (1997). La construcción sostenible: el estado de la cuestión. Informes de la Construcción, 49(451), 41- 47
[3] Huedo, P., & López-Mesa, B. (2013). Revisión de herramientas de asistencia en la selección de soluciones constructivas sostenibles de edificación. Informes de la Construcción, 65(529), 77-88.
[4] Vázquez Espí, M. (2001). Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales. Informes de la Construcción, 52(471), 29-43.
[5] Ramesh, T., Prakash, R., & Shukla, K. (2010). Life cycle energy analysis of buildings: An overview. Energy and Buildings, 42(10), 1592-1600.
[6] Manual Técnico de la empresa Mitsubishi Heavy industries, Ltd. Lumelco. Pág 14. Coeficiente COP para calefacción 5,45 minorizado.
[7] AENOR. Agencia para la Normalización. www.aenor.es. Madrid: AENOR, 1996.
[8] Manual Técnico de la empresa Mitsubishi Heavy industries, Ltd. Lumelco.
[9] RITE, 1988. Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios.
[10] Categorías de impacto de la metodología EPS 2000 (Environmental Priority Strategies).
[11] Prestaciones medias estacionales de equipos y sistemas de producción de frío y calor en edificios de viviendas. Documento reconocido de la Calificación energética. IDAE. Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía. Estudios, informes y estadísticas. Balances de energía final (1990-2015).
[12] Rey F.J., Martin-Gil J., Velasco E., Pérez D., Varela F., Palomar J.M., & Dorado, M.P. (2004). Life Cycle Assessment Environmental Cost Analysis of Heat Pumps. Volumen 21, Number 5. [12]
[13] (Steen B. 1999a,1999b). Steen, B. (1999a). A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000. General system characteristics. Gothenburg. Chalmers University of Technology, p. 67. Disponible en http://pre.nl/simapro/impact_assessment.metods.htm

# MATERIAL SUPLEMENTARIO

Características técnicas del sistema en estudio:

| Funcionamiento en modo refrigeración o calefacción | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Modelo | | | FDCA224HKXE4 | FDT36KX |
| Capacidad | Frio | kW | 22,4 | 3,6 |
| | | kcal/h | 22.400 | 3.150 |
| | Calor | kW | 25 | 4 |
| | | kcal/h | 25.000 | 3.500 |
| Consumo eléctrico | Frio | kW | 5,7 | |
| | Calor | | 5,98 | |
| Nivel sonoro | | dB (A) | 57 | 31 |
| Dimensiones externas | | mm | 1.690 x 1.350 x 720 | 246 x 840 x 840 |
| Peso | | kg | 240 | 22 |
| Caudal de aire (estándar) | | $m^3$/min | 220 | 18 |
| Tipo de compresor | | | GT-C5150ND71 x 1 | |
| Motor del compresor | | kW/ud | 5,6 x 1 | |
| Motor del ventilador | | W x ud | 120 x 2 | 50 x 1 |
| Aceite refrigerante | | L | 1,75 (M-MA32R) | |
| Refrigerante | | | R410A | |
| Cantidad de refrigerante | | kg | 11,5 | |
| Tipo de ventilador y cantidad | | | Ventiladores axiales x 2 | |
| Unidades conectadas | | Ud | 1 | 4 |

*Figura 9: Especificaciones técnicas de la bomba de calor*

Datos obtenidos del programa Simapro:

| Recursos no energéticos | | | Recursos energéticos | |
|---|---|---|---|---|
| Barita (kg) | 30,95 | | Madera (kg) | 17,56 |
| Bauxita (kg) | 251,49 | | Energía del agua (MJ) | 88,36 |
| Calcita (kg) | 17,38 | | Lignita (kg) | 3,32 |
| Cr (kg) | 5,74 | | Gas Natural (MJ) | 446,25 |
| Mn (g) | 6,19 | | Petróleo (kg) | 12,29 |
| Ni (g) | 8,27 | | Uranio (kg) | 8,6006 |
| Zinc (kg) | 309,14 | | | |
| Sn (g) | 2,23 | | | |
| Emisiones al agua | | | Emisiones a la atmósfera | |
| Sulfatos (kg) | 122,91 | | $CO_2$ (kg) | 106,93 |
| $NH_3$ (kg) | 13,17 | | $SO_x$ (kg) | 10,09 |
| Grasas y aceites (kg) | 0,3003 | | $CH_4$ (kg) | 10,75 |
| Al (g) | 83,62 | | CFC (g) | 5,011 |
| Ba (g) | 193,33 | | Partículas (kg) | 391,65 |
| Pb (g) | 714,11 | | Cd (kg) | 1,44 |
| Ca (g) | 5,058 | | Pb (kg) | 189,40 |
| Cr(III) (kg) | 1,070 | | Otros metales (kg) | 44,54 |
| K (mg) | 593,91 | | Calor residual (MJ) | 2.344,04 |
| Na (kg) | 19,64 | | | |
| Calor residual (MJ) | 56.468,59 | | | |

*Figura 10: Listado de los recursos y emisiones más importantes producidos por el sistema*