



Departament de Projectes
d'Enginyeria

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
Laboratorio de Modelización Ambiental

Estimación del consumo energético y de la emisión de CO₂ asociados a la producción, uso y disposición final de ventanas de PVC, aluminio y madera

*Dr. José María Baldasano Recio
Dr. René Parra Narváez
Dr. Pedro Jiménez Guerrero*

Informe: PVC-Ven-200501-2

Versión 5 (Corrección reunión del 15 de abril 2005; versión final)

Barcelona, abril de 2005

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1 Resumen | 1 |
| 2 Antecedentes | 3 |
| 2.1 Objetivo y bases de cálculo | 4 |
| 2.2 Contenido del documento..... | 4 |
| 3 El ciclo de vida de una ventana | 5 |
| 4 Estimación del consumo de energía y de la emisión CO₂ atribuible a un ventana de 1.34 m x 1.34 m | 7 |
| 4.1 Bases de cálculo | 7 |
| 4.1.1 Dimensiones | 7 |
| 4.1.2 Materiales del marco estructural | 7 |
| 4.1.3 Acristalamiento | 7 |
| 4.2 Escenarios analizados | 7 |
| 4.3 La extracción y producción de materiales..... | 8 |
| 4.4 El montaje de la ventana..... | 9 |
| 4.5 El uso de la ventana..... | 9 |
| 4.5.1 Conductividad térmica del sistema pared/ventana..... | 11 |
| 4.5.2 Temperatura ambiental exterior | 12 |
| 4.5.3 Estimación de la demanda energética | 13 |
| 4.6 La desconstrucción | 19 |
| 4.7 El reciclaje | 20 |
| 4.8 La disposición final..... | 20 |
| 4.9 El transporte | 20 |
| 4.10 Factores de emisión | 20 |
| 5 Resultados y análisis comparativo | 22 |
| 5.1 Estimación de consumos energéticos y emisiones de CO ₂ para el sistema pared/ventana..... | 22 |
| 6 Conclusiones | 33 |
| 7 Referencias | 35 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 4.1: Consumos energéticos de la extracción de recursos naturales y de la producción de materiales..... | 9 |
| Tabla 4.2: Áreas del sistema pared/ventana | 11 |
| Tabla 4.3: Coeficientes de conductividad térmica (MFOM, 2004) | 11 |
| Tabla 4.4: Coeficientes de conductividad térmica del sistema pared/ventana | 12 |
| Tabla 4.5: Cálculo de la energía eléctrica anual requerida para calefacción y climatización con una ventana de PVC y acristalamiento doble (U _{pared/ventana} = 0,65 W m ⁻² °C ⁻¹) | 14 |
| Tabla 4.6: Cálculo de la energía eléctrica anual requerida para calefacción y climatización con una ventana de aluminio sin rotura y acristalamiento doble (U _{pared/ventana} = 0,89 W m ⁻² °C ⁻¹)..... | 15 |
| Tabla 4.7: Cálculo de la energía eléctrica anual requerida para calefacción y climatización con una ventana de aluminio con rotura y acristalamiento doble (U _{pared/ventana} = 0,77 W m ⁻² °C ⁻¹)..... | 16 |
| Tabla 4.8: Cálculo de la energía eléctrica anual requerida para calefacción y climatización con una ventana de madera y acristalamiento doble (U _{pared/ventana} = 0,68 W m ⁻² °C ⁻¹) | 17 |
| Tabla 4.9: Cálculo de la energía eléctrica anual requerida para calefacción y climatización con una ventana de madera y acristalamiento simple (U _{pared/ventana} = 1,14 W m ⁻² °C ⁻¹) | 18 |
| Tabla 4.10: Resumen de los consumos eléctricos anuales requeridos para calefacción y climatización de la habitación de análisis..... | 19 |
| Tabla 4.11: Factores de emisión de CO ₂ | 21 |
| Tabla 5.1: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ en la etapa de extracción y producción de materiales; porcentaje respecto al total. . | 22 |
| Tabla 5.2: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de PVC con acristalamiento doble (sin uso de PVC reciclado en el marco, U _{pared/ventana} = 0,65 W m ⁻² °C ⁻¹). Resumen | 23 |
| Tabla 5.3: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de PVC con acristalamiento doble (uso del 30% de PVC reciclado en el marco, U _{pared/ventana} = 0,65 W m ⁻² °C ⁻¹). Resumen | 23 |
| Tabla 5.4: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio sin rotura con acristalamiento doble (sin uso de aluminio reciclado, U _{pared/ventana} = 0,89 W m ⁻² °C ⁻¹). Resumen..... | 24 |
| Tabla 5.5: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio sin rotura con acristalamiento doble (con 30% de aluminio reciclado, U _{pared/ventana} = 0,89 W m ⁻² °C ⁻¹). Resumen..... | 24 |
| Tabla 5.6: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio con rotura con acristalamiento doble (sin uso de aluminio reciclado, U _{pared/ventana} = 0,77 W m ⁻² °C ⁻¹). Resumen..... | 25 |

| | |
|--|----|
| Tabla 5.7: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio con rotura con acristalamiento doble (con 30% de aluminio reciclado, $U_{pared/ventana} = 0,77 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Resumen..... | 25 |
| Tabla 5.8: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de madera con acristalamiento doble. ($U_{paredventana} = 0,68 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Resumen | 26 |
| Tabla 5.9: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de madera con acristalamiento simple. ($U_{pared/ventana} = 1,14 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Resumen | 26 |
| Tabla 5.10: Resumen de los consumos de energía, emisiones de CO ₂ y material reciclado atribuible a la producción, uso (50 años), reciclaje y disposición final de residuos de ventanas fabricadas con diferentes materiales. | 31 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 3.1: El ciclo de vida de una ventana | 6 |
| Figura 3.2: Etapas de confección y uso de perfil de PVC para ventanas | 6 |
| Figura 4.1: Dimensiones de la habitación de análisis | 10 |
| Figura 4.2: Variación mensual de la temperaturas ambiente media de tres zonas seleccionadas de España | 13 |
| Figura 5.1: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de PVC con acristalamiento doble (sin uso de PVC reciclado en el perfil de la ventana) | 27 |
| Figura 5.2: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de PVC con acristalamiento doble (uso de un 30% de PVC reciclado en el perfil de la ventana) | 27 |
| Figura 5.3: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio sin rotura con acristalamiento doble (sin uso de aluminio reciclado en el perfil de la ventana) | 28 |
| Figura 5.4: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio sin rotura con acristalamiento doble (con un 30% de aluminio reciclado en el perfil de la ventana) | 28 |
| Figura 5.5: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio con rotura con acristalamiento doble (sin uso de aluminio reciclado en el perfil de la ventana) | 29 |
| Figura 5.6: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio con rotura con acristalamiento doble (con un 30% de aluminio reciclado en el perfil de la ventana) | 29 |
| Figura 5.7: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de madera con acristalamiento doble | 30 |
| Figura 5.8: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO ₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de madera con acristalamiento simple | 30 |

1 Resumen

La ventana proporciona una serie de servicios en viviendas y edificios. Una de las más importantes es el aislamiento térmico para impedir los flujos de calor y frío y mantener los correspondientes niveles de calefacción y climatización.

El material del marco estructural influye en la capacidad de aislamiento de la ventana, y hay interés en conocer el impacto ambiental de la elección del material en todas las etapas del ciclo de vida de la ventana. En este trabajo se han considerado los siguientes materiales: PVC, aluminio y madera. Se asume que al final del período de uso de la ventana, los materiales se reciclan; es decir, se considera que no hay reutilización directa de los mismos. En este análisis se ha asignado un período de vida útil de 50 años para todas las ventanas, asumiendo que tanto los perfiles de PVC, aluminio y madera (con el respectivo mantenimiento), conservan sus propiedades funcionales.

La evaluación del impacto ambiental se ha realizado teniendo en cuenta dos indicadores fundamentales: (1) estimación del consumo energético; y (2) emisión de dióxido de carbono (CO₂) atribuibles a la fabricación, uso, reciclaje y disposición final de residuos, de ventanas cuyo marco estructural se fabrica principalmente con PVC, aluminio o madera.

El análisis se basa en una ventana batiente estándar de 1,34 m x 1,34 m, con doble acristalamiento, instalada en una habitación tipo, que se fabrica y se utiliza en el ámbito de la Península Ibérica. Debido a que en España hay un uso importante de la ventana de madera con acristalamiento simple, se ha incluido esta alternativa como un octavo caso de análisis complementario.

La metodología empleada se basa en un procedimiento de contabilidad ambiental de consumos energéticos y emisiones de CO₂ en el que se han estimado dichos indicadores en cada una de las etapas del ciclo de vida de una ventana fabricada con PVC, aluminio o madera (extracción y producción, transporte a montaje, montaje, transporte a edificio, uso, transporte a vertedero, disposición en vertedero, transporte a reciclaje y reciclaje). Los resultados finales suponen la suma de los consumos de energía y de las emisiones de CO₂ equivalente para cada una de estas etapas.

Los resultados obtenidos indican que en todos los casos analizados, los porcentajes más altos del consumo de energía (entre 42 - 97%) corresponden a la etapa de uso de la ventana. Este consumo se refiere a las pérdidas de energía a través de la ventana. Los consumos de energía en las etapas de extracción y producción de materiales son importantes para las ventanas de aluminio (hasta un 52% del valor total); este porcentaje es menor para las ventanas de PVC (14%) y madera (4%).

La ventana de PVC con un 30% de material reciclado presenta el menor consumo de energía (1.740 kWh) y emisiones de CO₂ (730 kg). La ventana de PVC sin material reciclado presenta un consumo de 1.780 kWh y emisiones de 742 kg CO₂.

A continuación, sería la ventana de madera con acristalamiento doble la que presenta un consumo de 2.045 kWh y emisiones de 886 kg CO₂; seguida de la ventana de madera con acristalamiento simple, con un consumo energético (2.549 kWh) y emisiones de CO₂ (1.129 kg CO₂).

Finalmente, los valores más altos de energía utilizada y de emisiones de CO₂ corresponden a las ventanas de aluminio. Las ventanas con un 30% de aluminio reciclado presentan un consumo energético de 3.244 kWh y 3.838 kWh para los casos de ventanas con rotura y sin rotura térmica. A estas ventanas corresponden unas emisiones de CO₂ de 1.418 kg CO₂ y 1.681 kg CO₂, respectivamente. Para los escenarios de ventanas sin uso de aluminio reciclado, los consumos energéticos representan 3.819 kWh y 4.413 kWh para las ventanas con rotura y sin rotura térmica; en ese orden, presentan unas emisiones de 1.672 kg CO₂ para la ventana con rotura térmica y 1.935 kg CO₂ para el caso de ventana de aluminio sin rotura térmica.

Respecto al reciclaje de los materiales de las ventanas, la ventana de madera con doble acristalamiento aporta en la etapa de reciclaje 21,4 kg de material reciclado, procedente del vidrio (62% del peso total de la ventana). Para la ventana de madera con simple acristalamiento, únicamente se puede reciclar el vidrio (10,7 kg; 45% del peso total). Por el contrario, las ventanas de PVC y aluminio aportan 49,2 kg y 62,2 kg, respectivamente, procedentes tanto del vidrio como del marco (93 y 94% de los materiales totales, respectivamente). Por lo tanto, hay una mayor disponibilidad de material reciclado para la construcción de una nueva ventana o para el uso de estos materiales en otros productos. En el caso de las ventanas de madera, al no poder reciclarse el marco, se debe proceder a la extracción y tratamiento de madera nueva.

2 Antecedentes

Las ventanas, como elementos arquitectónicos de viviendas y edificios, proporcionan una serie de funciones, entre las que se incluyen:

- ❑ Ser un elemento de unión entre el exterior e interior de la vivienda.
- ❑ Proporcionar tanto iluminación natural, como aislamiento térmico que favorece una adecuada climatización.
- ❑ Dar protección contra inclemencias climáticas.
- ❑ Protección contra otros factores externos como el ruido, contaminación atmosférica, insectos, etc.
- ❑ Seguridad.

Las ventanas cubren normalmente entre un 10 - 25% de la superficie de las paredes expuestas. El vidrio, como elemento transparente, permite el paso de la luz solar al interior de la vivienda, y se integra al edificio mediante un marco estructural.

En la selección de un determinado tipo de ventana normalmente se toma en cuenta los materiales más utilizados y conocidos, el uso de materiales, el diseño arquitectónico y los costes de construcción y mantenimiento.

El material del marco estructural, el tipo de vidrio, el diseño de la ventana y el uso de un acristalamiento simple (una luna de vidrio) o múltiple (dos o más lunas de vidrio), son elementos que influyen directamente en el nivel de aislamiento térmico de la ventana.

Esta última característica es relevante en países de latitud media o alta. En invierno son importantes los consumos de energía para mantener una temperatura de confort en el interior de las viviendas. En España, los sistemas de calefacción eléctricos de los hogares consumen en promedio, un 8% del total eléctrico utilizado por el sector residencial en un día típico de invierno (REE, 2004). Las mejores características de aislamiento térmico del sistema pared/ventana, implican un menor consumo de energía eléctrica para mantener un determinado nivel de climatización.

En los últimos años, con la implementación paulatina de legislación ambiental más restrictiva en materia de emisiones a la atmósfera (contaminantes primarios y gases de efecto invernadero), la promoción de la eficiencia energética, la producción limpia y el uso de las mejores técnicas disponibles, existe interés por analizar de manera objetiva el impacto ambiental debido a la fabricación, uso y disposición final de residuos, de las ventanas fabricadas con diferentes materiales.

Tradicionalmente, la madera ha sido, por muchos años, el material utilizado para la fabricación de los marcos estructurales. El aluminio, también es un material muy utilizado. En las últimas décadas, el uso de perfiles de PVC es importante, especialmente en países del norte de Europa. En Alemania, para el año 2003, el uso del PVC alcanzó el 49%, frente a un 28% de los marcos de madera, 20% de aluminio, y un 3% para marcos de aluminio/madera (EC,

2004). En España, durante los últimos años, el reparto de uso de materiales se sitúa: aluminio (73%), madera (13%), PVC (11%), y otros (3%).

Las implicaciones ambientales de la ventana son objeto de estudio en diferentes países. Sin embargo, debido a la complejidad del análisis, hay pocos estudios y la mayoría de ellos tienen enfoques diferentes (Chevalier *et al.*, 2002). Estas contribuciones se focalizan en países del norte de Europa y en los Estados Unidos.

Las condiciones de análisis pueden ser diversas, si se considera la variedad de tamaños, formas o configuraciones que las ventanas pueden tener, en una misma vivienda inclusive. Una forma pragmática de análisis es focalizar el estudio de una ventana de dimensiones establecidas (Asif *et al.*, 2002; Weir and Muneer, 1998)

2.1 Objetivo y bases de cálculo

En este documento se presenta una estimación del consumo energético y de la emisión de dióxido de carbono (CO₂) atribuibles a la fabricación, uso, reciclaje y disposición final de residuos, de ventanas cuyo marco estructural se fabrica con PVC, aluminio o madera.

Este enfoque se basa en la consideración de todas las etapas de un estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), aunque el alcance se focaliza en los dos factores ambientales (indicadores) antes mencionados.

Con el fin de hacer posible un análisis que permita obtener resultados comparativos, se utiliza como unidad de análisis (la unidad funcional en un estudio de ACV), una ventana practicable de 1,34 m x 1,34 m, con iguales características para los diferentes materiales considerados.

Los resultados pretenden ser representativos para la Península Ibérica, por lo que en el análisis que a continuación se detalla, se da prioridad a la información y condiciones de esta zona.

2.2 Contenido del documento

Se describen las etapas que conforman el ciclo de vida de la ventana, así como las hipótesis de cálculo y escenarios para el análisis comparativo. Se indican las magnitudes de los consumos energéticos más significativos, así como la conformación de las fuentes de energía que definen los factores de emisión de CO₂. Se presenta con especial detalle la estimación del consumo de energía en la etapa de uso de la ventana.

Se incluyen los resultados obtenidos en detalle y de manera resumida. Se analizan las estimaciones obtenidas identificando en orden ascendente, las alternativas con menores consumos energéticos y emisiones de CO₂.

3 El ciclo de vida de una ventana

La Figura 3.1 presenta el ciclo de vida típico de una ventana, focalizado al uso de energía y las correspondientes emisiones atmosféricas.

La metodología empleada se basa en un procedimiento de contabilidad ambiental de consumos energéticos y emisiones de CO₂ en el que se han estimado dichos indicadores en cada una de las etapas del ciclo de vida de una ventana (extracción y producción, transporte a montaje, montaje, transporte a edificio, uso, transporte a vertedero, disposición en vertedero, transporte a reciclaje y reciclaje) fabricada con PVC, aluminio o madera. Los resultados finales suponen la suma de los consumos de energía y de las emisiones de CO₂ equivalente para cada una de estas etapas.

La primera etapa comprende la fase de extracción de materias primas y la obtención de los elementos de la ventana. Estos componentes se ensamblan en una planta de montaje.

La etapa de uso de la ventana es la más duradera. Para las ventanas de PVC y de aluminio se suelen considerar vidas medias de 50 años, sin la necesidad de ningún consumo energético importante para su mantenimiento. Para las ventanas de madera se suele atribuir períodos de vida más cortos, siendo necesario la aplicación de capas protectoras (barniz, pintura) una vez cada 2 años. En este estudio, se asumirá que todas las ventanas tienen una vida útil de 50 años, y que dicho mantenimiento se ha efectuado sistemáticamente.

Una vez que termina el período de uso de la ventana, se procede a su desconstrucción y se traslada a un centro de reciclaje. La fracción no reciclable se envía a un centro de gestión final de residuos.

En función del material, la producción de los perfiles estructurales puede presentar etapas particulares. Por ejemplo, la Figura 3.2 presenta en detalle, las etapas de confección y uso de los perfiles de PVC. La resina de PVC, se mezcla con determinados aditivos para la obtención de la granza. Esta mezcla se somete a un proceso de extrusión en caliente por medio del cuál se elabora el perfil propiamente dicho. Este perfil se envía a la planta de montaje de la ventana, en donde se ensambla con los demás elementos (lunas de vidrio, acero de refuerzo, juntas de estanqueidad y cerrajería).

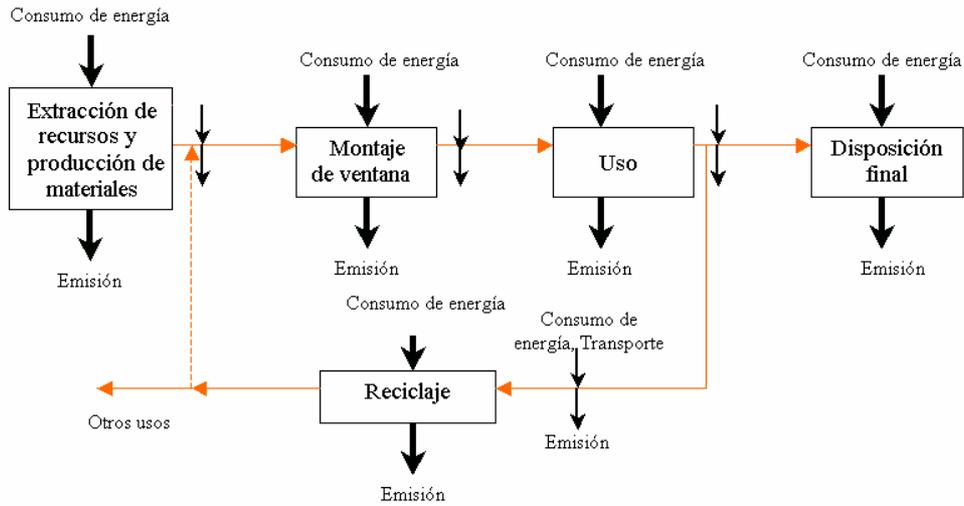


Figura 3.1: El ciclo de vida de una ventana

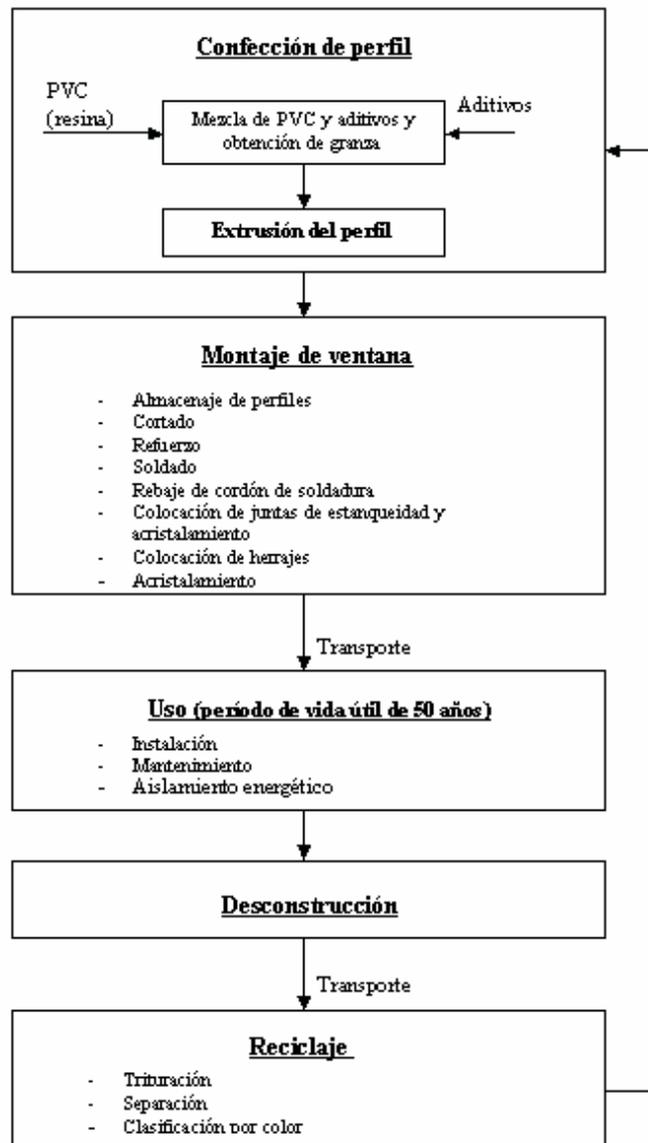


Figura 3.2: Etapas de confección y uso de perfil de PVC para ventanas

4 Estimación del consumo de energía y de la emisión CO₂ atribuible a una ventana de 1,34 m x 1,34 m

4.1 Bases de cálculo

4.1.1 Dimensiones

Con el fin de poder realizar un análisis que permita obtener resultados comparativos, se utiliza como unidad de análisis, una ventana de apertura practicable o batiente estándar de 1,34 m x 1,34 m.

4.1.2 Materiales del marco estructural

Básicamente el análisis se focaliza en la estimación del consumo de energía y las correspondientes emisiones de CO₂, para la ventana de dimensiones definidas, cuyo marco estructural se fabrica con tres materiales alternativos:

- PVC
- Aluminio
- Madera

4.1.3 Acristalamiento

Se considera que las ventanas tienen acristalamiento doble, conformadas con dos hojas de vidrio (lunas) normal de 4 mm de espesor, con una cámara de aire de 6 mm ó 12 mm, en función de la ventana.

4.2 Escenarios analizados

Se analizan los siguientes casos:

- 1) Ventana de PVC, con dos lunas 4/12/4, cuyo perfil estructural no incluye PVC reciclado
- 2) Ventana de PVC, con dos lunas 4/12/4, cuyo perfil estructural incluye un 30% de PVC reciclado
- 3) Ventana de aluminio sin rotura térmica, con dos lunas 4/6/4, cuyo perfil estructural no incluye aluminio reciclado
- 4) Ventana de aluminio sin rotura térmica, con dos lunas 4/6/4, cuyo perfil estructural incluye un 30% de aluminio reciclado
- 5) Ventana de aluminio con rotura térmica, con dos lunas 4/12/4, cuyo perfil estructural no incluye aluminio reciclado
- 6) Ventana de aluminio con rotura térmica, con dos lunas 4/12/4, cuyo perfil estructural incluye un 30% de aluminio reciclado
- 7) Ventana de madera, con dos lunas 4/6/4.
- 8) Ventana de madera, con una luna.

El octavo caso (ventana de madera con una luna) obedece a la realidad del uso de esta ventana en la zona de estudio. En España, el uso de ventanas de madera con dos lunas es minoritario.

4.3 La extracción y producción de materiales

Comprende la energía requerida debido a la extracción de recursos naturales, transporte hasta la fábrica y la producción de los materiales que se utilizan en la ventana, principalmente: perfil de PVC, aluminio, madera, vidrio, cerrajería y aditivos.

Para el perfil de PVC se utiliza el consumo energético y la emisión de CO₂ presentadas en el documento "*Estimación del consumo energético y de la emisión de CO₂ asociados a la producción unitaria de PVC*" (Baldasano y Parra, 2005). Se utilizan los valores del criterio de cálculo que considera la obtención conjunta de PVC y sosa cáustica. El consumo energético de la fabricación de PVC asciende a 7,19 kWh kg⁻¹; y el factor de emisión de CO₂ asociado es 2,04 t CO₂ t⁻¹PVC.

Los consumos energéticos de otros materiales corresponden a la producción de acero, vidrio, aluminio y madera.

Para el acero se asume un consumo energético de 6,70 kWh kg⁻¹, obtenido a partir del consumo energético de producción (5,03 kWh kg⁻¹) del documento europeo BREF del hierro y del acero (EPA, 2004), considerando que este último valor es un 75% del consumo energético de extracción, transporte y producción del acero. Se asume que la energía utilizada se compone en un 92% de hulla y 8% de electricidad.

Para el vidrio se utiliza un consumo energético de 2,70 kWh kg⁻¹, obtenido a partir del consumo energético de producción (2,03 kWh kg⁻¹) del documento europeo BREF del vidrio (EPA, 2004), considerando que este último valor es un 75% del consumo energético de extracción, transporte y producción del vidrio. Se asume que la energía utilizada se compone en un 89% de fuelóleo/gasóleo y 11% de electricidad.

Para el aluminio se asume un consumo eléctrico de 45,56 kWh kg⁻¹, que incluye tanto el consumo energético de extracción de los minerales, tratamiento de la alúmina y obtención final del aluminio (WBG, 2004).

Para la madera se utiliza un consumo energético de 0,58 kWh kg⁻¹, que incluye tanto la extracción, traslado (250 km) y secado. La información del consumo de extracción y secado de la madera proviene de la base de datos Simapro5. Se asume que un 92% de la energía proviene de gasóleo y que un 8% es energía eléctrica.

Los consumos energéticos de los materiales se resumen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Consumos energéticos de la extracción de recursos naturales y de la producción de materiales

| Material | Consumo de energía (kWh kg ⁻¹) | Fuente |
|----------|---|---------------------------|
| PVC | 7,19 | (Baldasano y Parra, 2005) |
| Acero | 6,70 | (EPA, 2004) |
| Vidrio | 2,70 | (EPA, 2004) |
| Aluminio | 45,56 | (WBG, 2004) |
| Madera | 0,58 | Base de datos Simapro5 |

4.4 El montaje de la ventana

Para las ventanas elaboradas con perfiles de PVC se asume un consumo energético de 0,22 kWh (kg PVC)⁻¹, dato proporcionado por la Asociación Ventanas PVC de España (Asoven); y que corresponde a un consumo energético de 4,8 kWh por ventana ensamblada.

Para los perfiles de aluminio y madera, se utilizó el mismo valor de 4,8 kWh por ventana ensamblada; se ha supuesto que el consumo energético para el montaje es similar para todas las ventanas. Para el montaje de todas las ventanas, se considera que la energía utilizada es eléctrica.

4.5 El uso de la ventana

Para la estimación del consumo energético en la etapa de uso, se considera una habitación de análisis con la ventana ubicada en una pared exterior. Sus dimensiones se indican en la Figura 4.1. El volumen del aire contenido en la habitación es de 32,4 m³ (3 m x 4 m x 2,7 m). El sistema pared/ventana tiene un área de 8,1 m² (3 m x 2,7 m), correspondiendo 1,80 m² a la ventana propiamente dicha (1,34 m x 1,34 m); es decir, un 22 %.

La cantidad de calor a suministrar o evacuar del volumen de aire de la habitación debe ser el necesario para:

- 1) Elevar (en invierno) o reducir (en verano) la temperatura del aire interior hasta un valor de confort, que se asume igual a 22°C, valor recomendado en el Código Técnico de la Edificación (MFOM, 2004).
- 2) Mantener la temperatura del aire interior a 22°C durante el tiempo medio de permanencia en la habitación. El mantenimiento de esta temperatura implica un suministro o evacuación continuo de calor del aire interior, para compensar el flujo calorífico a través del sistema pared/ventana exterior.

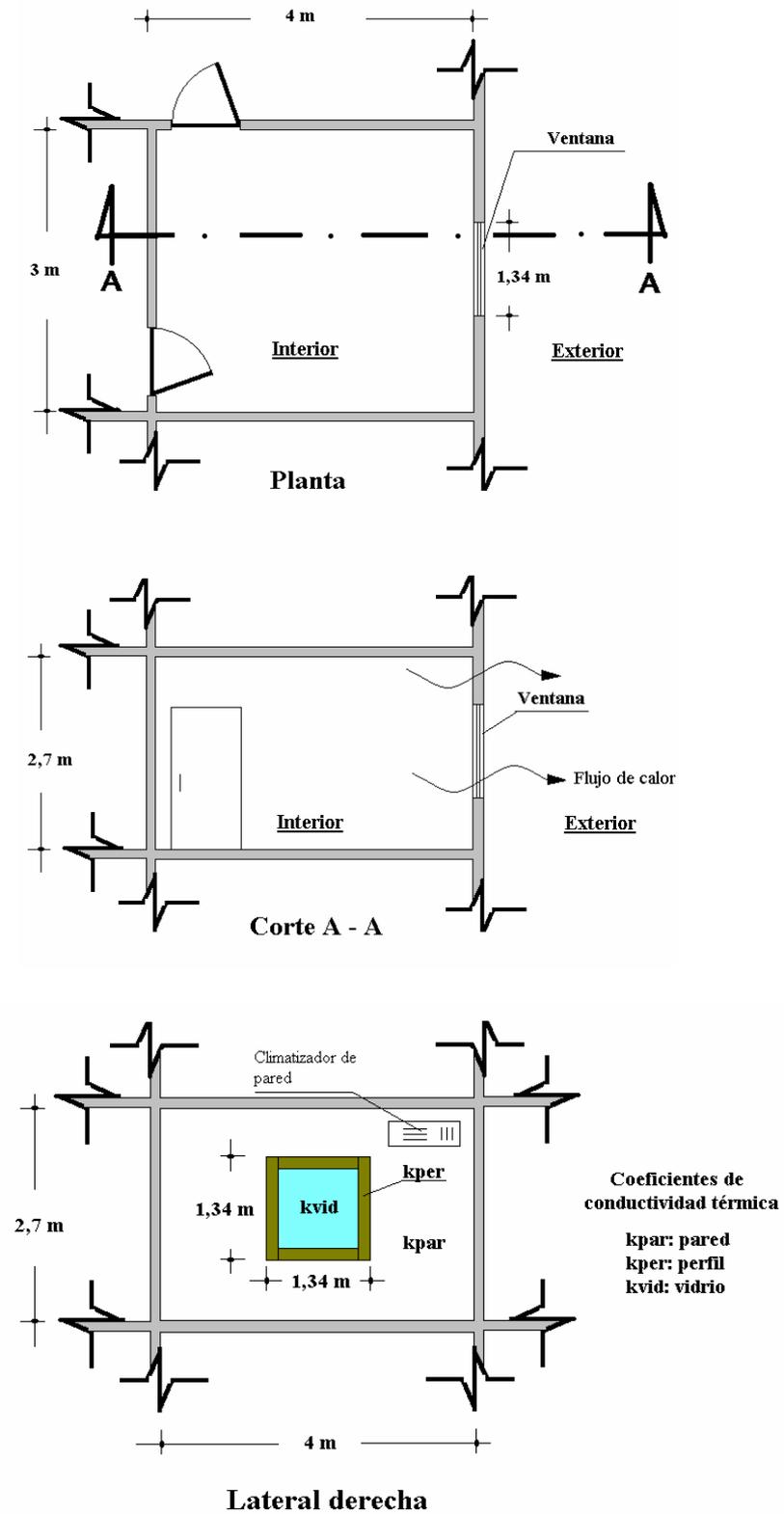


Figura 4.1: Dimensiones de la habitación de análisis

Para simplificar el análisis, se considera que solamente la pared exterior que contiene la ventana, es la única ruta de pérdida o ganancia de calor; es decir, se asume que no hay flujo de energía por medio de las paredes interiores, piso o techo.

Se asume que en la calefacción o la refrigeración se utiliza un sistema de aire acondicionado de ventana. Estos dispositivos suelen ser capaces de proporcionar o reducir el calor, en niveles entre 2-3,5 veces la energía eléctrica que consumen (Morrison, 2004). En este estudio se asume un valor 2,6.

4.5.1 Conductividad térmica del sistema pared/ventana

Para la definición de los coeficientes de conductividad térmica, según los diferentes materiales del marco estructural de la ventana, se considera la contribución en superficie de la pared, del perfil de marco estructural propiamente dicho y del vidrio, de acuerdo a la información de la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Áreas del sistema pared/ventana

| Componente | m ² | % |
|------------------------------|----------------|------|
| Área de pared (A_{par}) | 6,3 | 77,8 |
| Área de perfil (A_{per}) | 0,5 | 6,2 |
| Área de vidrio (A_{vid}) | 1,3 | 16,0 |
| Total: | 8,1 | 100 |

Los coeficientes de conductividad térmica se obtuvieron del Código Técnico de la Edificación (MFOM; 2004) (Tabla 4.3). El valor de los coeficientes integrados del sistema pared/ventana ($U_{pared/ventana}$) que se indican en la Tabla 4.4, se deducen mediante la ecuación 1.

$$U_{pared/ventana} = \frac{A_{par} \cdot U_{par} + A_{per} \cdot U_{per} + A_{vid} \cdot U_{vid}}{A_{par} + A_{per} + A_{vid}} \quad (1)$$

Tabla 4.3: Coeficientes de conductividad térmica (MFOM, 2004)

| Componente | W m ⁻² °C ⁻¹ |
|---|------------------------------------|
| Pared (U_{par}), mampostería | 1,63 |
| Perfil de PVC (U_{per}) | 2,00 |
| Perfil de aluminio sin rotura (U_{per}) | 5,88 |
| Perfil de aluminio con rotura (U_{per}) | 4,00 |
| Perfil de madera (U_{per}) | 2,50 |
| Vidrio acristalamiento simple (U_{vid}) | 5,90 |
| Vidrio acristalamiento doble (U_{vid}) | 3,30 |

Tabla 4.4: Coeficientes de conductividad térmica del sistema pared/ventana

| Tipo de ventana | W m ⁻² °C ⁻¹ |
|---|------------------------------------|
| PVC con acristalamiento doble | 0,65 |
| Aluminio sin rotura con acristalamiento doble | 0,89 |
| Aluminio con rotura con acristalamiento doble | 0,77 |
| Madera con acristalamiento doble | 0,68 |
| Madera con acristalamiento simple | 1,14 |

Igualmente, se han considerado los resultados suponiendo que la conductividad térmica de la pared toma un valor de U_{pared} igual a cero, es decir, suponiendo que no hay pérdidas de calor a través de la pared, con el fin de resaltar en el análisis los consumos energéticos y emisiones de CO₂ asociados exclusivamente a la ventana.

4.5.2 Temperatura ambiental exterior

A fin de estimar la demanda energética en diferentes zonas de España, se seleccionaron tres zonas con diferentes rangos de temperaturas climatológicas. En la Figura 4.2 se han representado las temperaturas medias mensuales en el Prat de Llobregat (Barcelona), Madrid y Alicante; que se obtuvieron a partir de los registros mensuales de los años 1997 a 2002 del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2004).

La curva de temperaturas del Prat de Llobregat presenta los valores más atenuados de temperatura (rango entre 10 - 23°C). La curva de temperaturas de Madrid presenta los valores de invierno más bajos, aunque las temperaturas de verano son relativamente altas (rango entre 7 - 25°C). En Alicante, la zona con la latitud más baja de las regiones seleccionadas, presenta las temperaturas más altas tanto en invierno como en verano (rango entre 13 - 26°C).

4.5.3 Estimación de las pérdidas por permeabilidad al aire

La permeabilidad al aire tiene una gran importancia porque de ella depende la pérdida de calor de las habitaciones y, por tanto, el nivel de confort. Para las tres zonas de estudio se estiman las pérdidas por permeabilidad al aire de ventanas. La permeabilidad al aire es la propiedad de una ventana de dejar pasar el aire cuando se encuentra sometida a una presión diferencial. La permeabilidad al aire se caracteriza por la capacidad de paso del aire expresada en m³/h en función de la diferencia de presiones. Esta capacidad de paso se ha referido a la superficie total de la ventana (capacidad de paso por unidad de superficie, m³/h m²).

La permeabilidad al aire de cada una de las ventanas se ha estimado según la clasificación de ventanas en cuatro tipos que establece la norma UNE-EN 12207:2000 (UNE, 2000) para una presión diferencial de referencia de 100 hPa. Se ha considerado que, sin ningún tratamiento adicional para mejorar las

propiedades de permeabilidad, las ventanas de PVC y aluminio con rotura térmica se clasifican como Clase 4, mientras que las ventanas de madera y las de aluminio sin rotura se englobarían dentro de la Clase 3. Ello supone unos coeficientes de permeabilidad de 1,5 m³/h m² para las ventanas de PVC y aluminio con rotura, mientras que dicho coeficiente se incrementa hasta 7,0 m³/h m² en los escenarios que implican ventanas de madera y de aluminio sin rotura.

4.5.4 Estimación de la demanda energética

Para las tres zonas seleccionadas, se calculan las diferencias entre la temperatura de confort en el interior de la habitación (22 °C) y las temperaturas mensuales medias. Diferencias positivas indican necesidad de calefacción, en tanto que diferencias negativas implican la necesidad de climatización.

Los consumos eléctricos mensuales para elevar o reducir la temperatura interior del aire (32,4 m³) hasta 22 °C, se estiman asumiendo que el sistema de aire acondicionado se enciende 24 veces al mes, y un valor de 1.004,67 J kg⁻¹ °C⁻¹ para el calor específico del aire. Los consumos eléctricos se determinan para 5 horas de uso continuo por encendido.

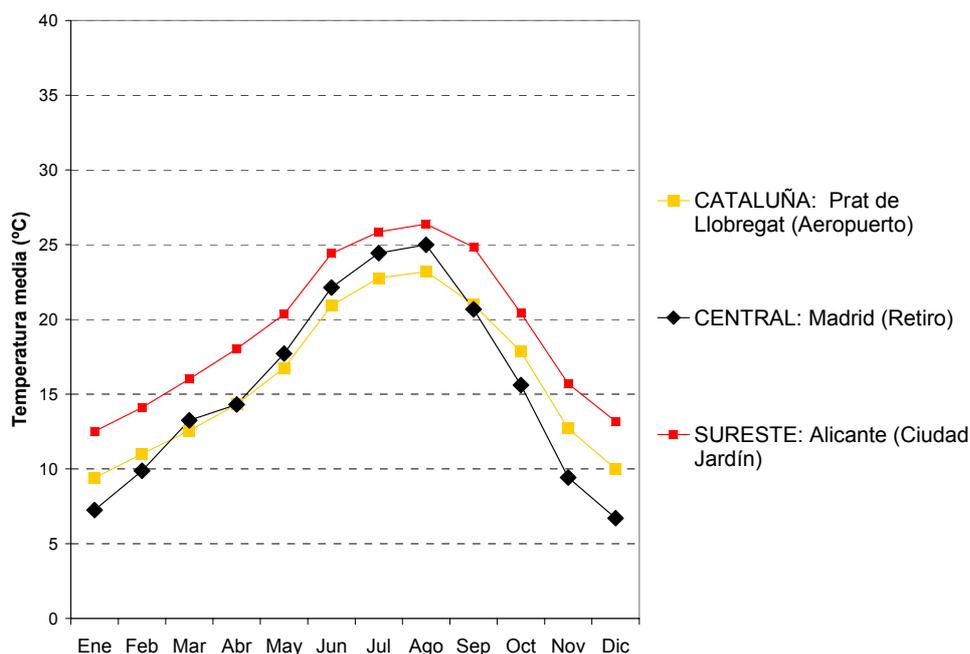


Figura 4.2: Variación mensual de la temperaturas ambiente media de tres zonas seleccionadas de España

Los valores obtenidos por escenario se indican en detalle en las Tablas 4.5-4.9. En la Tabla 4.10 se resumen los consumos eléctricos anuales requeridos para calefacción y climatización para cada zona seleccionada y por tipo de ventana.

Tabla 4.5: Cálculo de la energía eléctrica anual requerida para calefacción y climatización con una ventana de PVC y acristalamiento doble ($U_{\text{pared/ventana}} = 0,65 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

| Mes | Vivienda | Exterior | Diferencia | Necesidad | Consumo de electricidad kWh mes ⁻¹ | Flujo de calor W | Pérdida de calor kWh mes ⁻¹ | Consumo eléctrico kWh mes ⁻¹ | Pérdida por permeabilidad kWh mes ⁻¹ |
|--|----------|----------|------------|-------------------|--|---------------------|---|--|--|
| Cataluña – Prat de Llobregat (Aeropuerto) | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 9,4 | 12,6 | Calefacción | 1,31 | 66,6 | 8,0 | 3,1 | 0,4 |
| Feb | 22 | 11,0 | 11,0 | Calefacción | 1,14 | 58,0 | 7,0 | 2,7 | 0,3 |
| Mar | 22 | 12,6 | 9,4 | Calefacción | 0,98 | 49,8 | 6,0 | 2,3 | 0,3 |
| Abr | 22 | 14,3 | 7,7 | Calefacción | 0,79 | 40,6 | 4,9 | 1,9 | 0,2 |
| May | 22 | 16,8 | 5,2 | Calefacción | 0,54 | 27,7 | 3,3 | 1,3 | 0,2 |
| Jun | 22 | 20,9 | 1,1 | Calefacción | 0,11 | 5,6 | 0,7 | 0,3 | 0,0 |
| Jul | 22 | 22,8 | -0,8 | Climatización | 0,08 | 4,1 | 0,5 | 0,2 | 0,0 |
| Ago | 22 | 23,2 | -1,2 | Climatización | 0,13 | 6,4 | 0,8 | 0,3 | 0,0 |
| Sep | 22 | 21,0 | 1,0 | Calefacción | 0,10 | 5,2 | 0,6 | 0,2 | 0,0 |
| Oct | 22 | 17,9 | 4,2 | Calefacción | 0,43 | 21,9 | 2,6 | 1,0 | 0,1 |
| Nov | 22 | 12,7 | 9,3 | Calefacción | 0,96 | 49,0 | 5,9 | 2,3 | 0,3 |
| Dic | 22 | 10,0 | 12,0 | Calefacción | 1,24 | 63,3 | 7,6 | 2,9 | 0,4 |
| | | | | Subtotales | 7,8 | | | 18,4 | 2,4 |
| | | | | | | | Total (kWh a⁻¹) | | 28,5 |
| Madrid – Retiro | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 7,3 | 14,8 | Calefacción | 1,53 | 77,9 | 9,3 | 3,6 | 0,5 |
| Feb | 22 | 9,9 | 12,1 | Calefacción | 1,25 | 64,0 | 7,7 | 3,0 | 0,4 |
| Mar | 22 | 13,3 | 8,8 | Calefacción | 0,91 | 46,2 | 5,5 | 2,1 | 0,3 |
| Abr | 22 | 14,3 | 7,7 | Calefacción | 0,80 | 40,6 | 4,9 | 1,9 | 0,2 |
| May | 22 | 17,7 | 4,3 | Calefacción | 0,44 | 22,6 | 2,7 | 1,0 | 0,1 |
| Jun | 22 | 22,1 | -0,1 | Climatización | 0,01 | 0,7 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| Jul | 22 | 24,4 | -2,4 | Climatización | 0,25 | 12,9 | 1,5 | 0,6 | 0,1 |
| Ago | 22 | 25,0 | -3,0 | Climatización | 0,31 | 15,8 | 1,9 | 0,7 | 0,1 |
| Sep | 22 | 20,7 | 1,3 | Calefacción | 0,14 | 7,0 | 0,8 | 0,3 | 0,0 |
| Oct | 22 | 15,6 | 6,4 | Calefacción | 0,66 | 33,7 | 4,0 | 1,6 | 0,2 |
| Nov | 22 | 9,4 | 12,6 | Calefacción | 1,30 | 66,4 | 8,0 | 3,1 | 0,4 |
| Dic | 22 | 6,7 | 15,3 | Calefacción | 1,58 | 80,7 | 9,7 | 3,7 | 0,5 |
| | | | | Subtotales | 9,2 | | | 21,6 | 2,8 |
| | | | | | | | Total (kWh a⁻¹) | | 33,6 |
| Alicante – Ciudad Jardín | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 12,5 | 9,5 | Calefacción | 0,98 | 50,1 | 6,0 | 2,3 | 0,3 |
| Feb | 22 | 14,1 | 7,9 | Calefacción | 0,82 | 41,7 | 5,0 | 1,9 | 0,2 |
| Mar | 22 | 16,0 | 6,0 | Calefacción | 0,62 | 31,6 | 3,8 | 1,5 | 0,2 |
| Abr | 22 | 18,0 | 4,0 | Calefacción | 0,41 | 20,9 | 2,5 | 1,0 | 0,1 |
| May | 22 | 20,4 | 1,7 | Calefacción | 0,17 | 8,7 | 1,0 | 0,4 | 0,1 |
| Jun | 22 | 24,4 | -0,4 | Climatización | 0,04 | 2,2 | 0,3 | 0,1 | 0,0 |
| Jul | 22 | 25,9 | -1,9 | Climatización | 0,19 | 9,8 | 1,2 | 0,5 | 0,1 |
| Ago | 22 | 26,4 | -2,4 | Climatización | 0,25 | 12,6 | 1,5 | 0,6 | 0,1 |
| Sep | 22 | 24,8 | -2,8 | Climatización | 0,29 | 15,0 | 1,8 | 0,7 | 0,1 |
| Oct | 22 | 20,4 | 1,6 | Calefacción | 0,16 | 8,3 | 1,0 | 0,4 | 0,0 |
| Nov | 22 | 15,7 | 6,3 | Calefacción | 0,65 | 33,2 | 4,0 | 1,5 | 0,2 |
| Dic | 22 | 13,2 | 8,8 | Calefacción | 0,91 | 46,6 | 5,6 | 2,2 | 0,3 |
| | | | | Subtotales | 5,5 | | | 13,0 | 1,7 |
| | | | | | | | Total (kWh a⁻¹) | | 20,1 |

Tabla 4.6: Cálculo de la energía eléctrica anual requerida para calefacción y climatización con una ventana de aluminio sin rotura y acristalamiento doble
($U_{\text{pared/ventana}} = 0,89 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

| Mes | Vivienda | Exterior | Diferencia | Necesidad | Consumo de electricidad kWh mes ⁻¹ | Flujo de calor W | Pérdida de calor kWh mes ⁻¹ | Consumo eléctrico kWh mes ⁻¹ | Pérdida por permeabilidad kWh mes ⁻¹ |
|--|----------|----------|------------|-------------------|---|------------------|--|---|---|
| Cataluña – Prat de Llobregat (Aeropuerto) | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 9,4 | 12,6 | Calefacción | 1,31 | 90,9 | 10,9 | 4,2 | 1,8 |
| Feb | 22 | 11,0 | 11,0 | Calefacción | 1,14 | 79,2 | 9,5 | 3,7 | 1,6 |
| Mar | 22 | 12,6 | 9,4 | Calefacción | 0,98 | 68,0 | 8,2 | 3,1 | 1,4 |
| Abr | 22 | 14,3 | 7,7 | Calefacción | 0,79 | 55,3 | 6,6 | 2,6 | 1,1 |
| May | 22 | 16,8 | 5,2 | Calefacción | 0,54 | 37,8 | 4,5 | 1,7 | 0,8 |
| Jun | 22 | 20,9 | 1,1 | Calefacción | 0,11 | 7,7 | 0,9 | 0,4 | 0,2 |
| Jul | 22 | 22,8 | -0,8 | Climatización | 0,08 | 5,6 | 0,7 | 0,3 | 0,1 |
| Ago | 22 | 23,2 | -1,2 | Climatización | 0,13 | 8,7 | 1,0 | 0,4 | 0,2 |
| Sep | 22 | 21,0 | 1,0 | Calefacción | 0,10 | 7,1 | 0,9 | 0,3 | 0,1 |
| Oct | 22 | 17,9 | 4,2 | Calefacción | 0,43 | 29,9 | 3,6 | 1,4 | 0,6 |
| Nov | 22 | 12,7 | 9,3 | Calefacción | 0,96 | 66,9 | 8,0 | 3,1 | 1,4 |
| Dic | 22 | 10,0 | 12,0 | Calefacción | 1,24 | 86,4 | 10,4 | 4,0 | 1,7 |
| | | | | Subtotales | 7,8 | | | 25,1 | 11,0 |
| | | | | | Total (kWh a⁻¹) | | | | 43,9 |
| Madrid – Retiro | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 7,3 | 14,8 | Calefacción | 1,53 | 106,3 | 12,8 | 4,9 | 2,2 |
| Feb | 22 | 9,9 | 12,1 | Calefacción | 1,25 | 87,4 | 10,5 | 4,0 | 1,8 |
| Mar | 22 | 13,3 | 8,8 | Calefacción | 0,91 | 63,0 | 7,6 | 2,9 | 1,3 |
| Abr | 22 | 14,3 | 7,7 | Calefacción | 0,80 | 55,4 | 6,6 | 2,6 | 1,1 |
| May | 22 | 17,7 | 4,3 | Calefacción | 0,44 | 30,9 | 3,7 | 1,4 | 0,6 |
| Jun | 22 | 22,1 | -0,1 | Climatización | 0,01 | 1,0 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| Jul | 22 | 24,4 | -2,4 | Climatización | 0,25 | 17,6 | 2,1 | 0,8 | 0,4 |
| Ago | 22 | 25,0 | -3,0 | Climatización | 0,31 | 21,6 | 2,6 | 1,0 | 0,4 |
| Sep | 22 | 20,7 | 1,3 | Calefacción | 0,14 | 9,5 | 1,1 | 0,4 | 0,2 |
| Oct | 22 | 15,6 | 6,4 | Calefacción | 0,66 | 46,0 | 5,5 | 2,1 | 0,9 |
| Nov | 22 | 9,4 | 12,6 | Calefacción | 1,30 | 90,5 | 10,9 | 4,2 | 1,8 |
| Dic | 22 | 6,7 | 15,3 | Calefacción | 1,58 | 110,1 | 13,2 | 5,1 | 2,2 |
| | | | | Subtotales | 9,2 | | | 29,5 | 12,9 |
| | | | | | Total (kWh a⁻¹) | | | | 51,6 |
| Alicante – Ciudad Jardín | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 12,5 | 9,5 | Calefacción | 0,98 | 68,4 | 8,2 | 3,2 | 1,4 |
| Feb | 22 | 14,1 | 7,9 | Calefacción | 0,82 | 56,9 | 6,8 | 2,6 | 1,2 |
| Mar | 22 | 16,0 | 6,0 | Calefacción | 0,62 | 43,1 | 5,2 | 2,0 | 0,9 |
| Abr | 22 | 18,0 | 4,0 | Calefacción | 0,41 | 28,6 | 3,4 | 1,3 | 0,6 |
| May | 22 | 20,4 | 1,7 | Calefacción | 0,17 | 11,9 | 1,4 | 0,5 | 0,2 |
| Jun | 22 | 24,4 | -0,4 | Climatización | 0,04 | 2,9 | 0,4 | 0,1 | 0,1 |
| Jul | 22 | 25,9 | -1,9 | Climatización | 0,19 | 13,4 | 1,6 | 0,6 | 0,3 |
| Ago | 22 | 26,4 | -2,4 | Climatización | 0,25 | 17,2 | 2,1 | 0,8 | 0,3 |
| Sep | 22 | 24,8 | -2,8 | Climatización | 0,29 | 20,5 | 2,5 | 0,9 | 0,4 |
| Oct | 22 | 20,4 | 1,6 | Calefacción | 0,16 | 11,3 | 1,4 | 0,5 | 0,2 |
| Nov | 22 | 15,7 | 6,3 | Calefacción | 0,65 | 45,3 | 5,4 | 2,1 | 0,9 |
| Dic | 22 | 13,2 | 8,8 | Calefacción | 0,91 | 63,6 | 7,6 | 2,9 | 1,3 |
| | | | | Subtotales | 5,5 | | | 17,7 | 7,8 |
| | | | | | Total (kWh a⁻¹) | | | | 30,9 |

Tabla 4.7: Cálculo de la energía eléctrica anual requerida para calefacción y climatización con una ventana de aluminio con rotura y acristalamiento doble
($U_{\text{pared/ventana}} = 0,77 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

| Mes | Vivienda | Exterior | Diferencia | Necesidad | Consumo de electricidad kWh mes ⁻¹ | Flujo de calor W | Pérdida de calor kWh mes ⁻¹ | Consumo eléctrico kWh mes ⁻¹ | Pérdida por permeabilidad kWh mes ⁻¹ |
|--|----------|----------|------------|---------------|--|---------------------|---|--|--|
| Cataluña – Prat de Llobregat (Aeropuerto) | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 9,4 | 12,6 | Calefacción | 1,31 | 79,1 | 9,5 | 3,7 | 0,4 |
| Feb | 22 | 11,0 | 11,0 | Calefacción | 1,14 | 68,9 | 8,3 | 3,2 | 0,3 |
| Mar | 22 | 12,6 | 9,4 | Calefacción | 0,98 | 59,2 | 7,1 | 2,7 | 0,3 |
| Abr | 22 | 14,3 | 7,7 | Calefacción | 0,79 | 48,2 | 5,8 | 2,2 | 0,2 |
| May | 22 | 16,8 | 5,2 | Calefacción | 0,54 | 32,9 | 3,9 | 1,5 | 0,2 |
| Jun | 22 | 20,9 | 1,1 | Calefacción | 0,11 | 6,7 | 0,8 | 0,3 | 0,0 |
| Jul | 22 | 22,8 | -0,8 | Climatización | 0,08 | 4,9 | 0,6 | 0,2 | 0,0 |
| Ago | 22 | 23,2 | -1,2 | Climatización | 0,13 | 7,6 | 0,9 | 0,4 | 0,0 |
| Sep | 22 | 21,0 | 1,0 | Calefacción | 0,10 | 6,2 | 0,7 | 0,3 | 0,0 |
| Oct | 22 | 17,9 | 4,2 | Calefacción | 0,43 | 26,0 | 3,1 | 1,2 | 0,1 |
| Nov | 22 | 12,7 | 9,3 | Calefacción | 0,96 | 58,2 | 7,0 | 2,7 | 0,3 |
| Dic | 22 | 10,0 | 12,0 | Calefacción | 1,24 | 75,2 | 9,0 | 3,5 | 0,4 |
| Subtotales | | | | | 7,8 | | | 21,8 | 2,4 |
| Total (kWh a⁻¹) | | | | | | | | 32,0 | |
| Madrid – Retiro | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 7,3 | 14,8 | Calefacción | 1,53 | 92,5 | 11,1 | 4,3 | 0,5 |
| Feb | 22 | 9,9 | 12,1 | Calefacción | 1,25 | 76,1 | 9,1 | 3,5 | 0,4 |
| Mar | 22 | 13,3 | 8,8 | Calefacción | 0,91 | 54,9 | 6,6 | 2,5 | 0,3 |
| Abr | 22 | 14,3 | 7,7 | Calefacción | 0,80 | 48,2 | 5,8 | 2,2 | 0,2 |
| May | 22 | 17,7 | 4,3 | Calefacción | 0,44 | 26,9 | 3,2 | 1,2 | 0,1 |
| Jun | 22 | 22,1 | -0,1 | Climatización | 0,01 | 0,8 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| Jul | 22 | 24,4 | -2,4 | Climatización | 0,25 | 15,3 | 1,8 | 0,7 | 0,1 |
| Ago | 22 | 25,0 | -3,0 | Climatización | 0,31 | 18,8 | 2,3 | 0,9 | 0,1 |
| Sep | 22 | 20,7 | 1,3 | Calefacción | 0,14 | 8,3 | 1,0 | 0,4 | 0,0 |
| Oct | 22 | 15,6 | 6,4 | Calefacción | 0,66 | 40,0 | 4,8 | 1,8 | 0,2 |
| Nov | 22 | 9,4 | 12,6 | Calefacción | 1,30 | 78,8 | 9,5 | 3,6 | 0,4 |
| Dic | 22 | 6,7 | 15,3 | Calefacción | 1,58 | 95,9 | 11,5 | 4,4 | 0,5 |
| Subtotales | | | | | 9,2 | | | 25,7 | 2,8 |
| Total (kWh a⁻¹) | | | | | | | | 37,6 | |
| Alicante – Ciudad Jardín | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 12,5 | 9,5 | Calefacción | 0,98 | 59,5 | 7,1 | 2,7 | 0,3 |
| Feb | 22 | 14,1 | 7,9 | Calefacción | 0,82 | 49,5 | 5,9 | 2,3 | 0,2 |
| Mar | 22 | 16,0 | 6,0 | Calefacción | 0,62 | 37,5 | 4,5 | 1,7 | 0,2 |
| Abr | 22 | 18,0 | 4,0 | Calefacción | 0,41 | 24,9 | 3,0 | 1,1 | 0,1 |
| May | 22 | 20,4 | 1,7 | Calefacción | 0,17 | 10,3 | 1,2 | 0,5 | 0,1 |
| Jun | 22 | 24,4 | -0,4 | Climatización | 0,04 | 2,6 | 0,3 | 0,1 | 0,0 |
| Jul | 22 | 25,9 | -1,9 | Climatización | 0,19 | 11,7 | 1,4 | 0,5 | 0,1 |
| Ago | 22 | 26,4 | -2,4 | Climatización | 0,25 | 14,9 | 1,8 | 0,7 | 0,1 |
| Sep | 22 | 24,8 | -2,8 | Climatización | 0,29 | 17,8 | 2,1 | 0,8 | 0,1 |
| Oct | 22 | 20,4 | 1,6 | Calefacción | 0,16 | 9,9 | 1,2 | 0,5 | 0,0 |
| Nov | 22 | 15,7 | 6,3 | Calefacción | 0,65 | 39,5 | 4,7 | 1,8 | 0,2 |
| Dic | 22 | 13,2 | 8,8 | Calefacción | 0,91 | 55,4 | 6,6 | 2,6 | 0,3 |
| Subtotales | | | | | 5,5 | | | 15,4 | 1,7 |
| Total (kWh a⁻¹) | | | | | | | | 22,6 | |

Tabla 4.8: Cálculo de la energía eléctrica anual requerida para calefacción y climatización con una ventana de madera y acristalamiento doble
($U_{\text{pared/ventana}} = 0,68 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

| Mes | Vivienda | Exterior | Diferencia | Necesidad | Consumo de electricidad kWh mes ⁻¹ | Flujo de calor W | Pérdida de calor kWh mes ⁻¹ | Consumo eléctrico kWh mes ⁻¹ | Pérdida por permeabilidad kWh mes ⁻¹ |
|--|----------|----------|------------|---------------|--|---------------------|---|--|--|
| Cataluña – Prat de Llobregat (Aeropuerto) | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 9,4 | 12,6 | Calefacción | 1,31 | 69,7 | 8,4 | 3,2 | 1,8 |
| Feb | 22 | 11,0 | 11,0 | Calefacción | 1,14 | 60,8 | 7,3 | 2,8 | 1,6 |
| Mar | 22 | 12,6 | 9,4 | Calefacción | 0,98 | 52,2 | 6,3 | 2,4 | 1,4 |
| Abr | 22 | 14,3 | 7,7 | Calefacción | 0,79 | 42,5 | 5,1 | 2,0 | 1,1 |
| May | 22 | 16,8 | 5,2 | Calefacción | 0,54 | 29,0 | 3,5 | 1,3 | 0,8 |
| Jun | 22 | 20,9 | 1,1 | Calefacción | 0,11 | 5,9 | 0,7 | 0,3 | 0,2 |
| Jul | 22 | 22,8 | -0,8 | Climatización | 0,08 | 4,3 | 0,5 | 0,2 | 0,1 |
| Ago | 22 | 23,2 | -1,2 | Climatización | 0,13 | 6,7 | 0,8 | 0,3 | 0,2 |
| Sep | 22 | 21,0 | 1,0 | Calefacción | 0,10 | 5,5 | 0,7 | 0,3 | 0,1 |
| Oct | 22 | 17,9 | 4,2 | Calefacción | 0,43 | 22,9 | 2,8 | 1,1 | 0,6 |
| Nov | 22 | 12,7 | 9,3 | Calefacción | 0,96 | 51,3 | 6,2 | 2,4 | 1,4 |
| Dic | 22 | 10,0 | 12,0 | Calefacción | 1,24 | 66,3 | 8,0 | 3,1 | 1,7 |
| Subtotales | | | | | 7,8 | | | 19,2 | 11,0 |
| Total (kWh a⁻¹) | | | | | | | | 38,1 | |
| Madrid – Retiro | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 7,3 | 14,8 | Calefacción | 1,53 | 81,5 | 9,8 | 3,8 | 2,2 |
| Feb | 22 | 9,9 | 12,1 | Calefacción | 1,25 | 67,0 | 8,0 | 3,1 | 1,8 |
| Mar | 22 | 13,3 | 8,8 | Calefacción | 0,91 | 48,4 | 5,8 | 2,2 | 1,3 |
| Abr | 22 | 14,3 | 7,7 | Calefacción | 0,80 | 42,5 | 5,1 | 2,0 | 1,1 |
| May | 22 | 17,7 | 4,3 | Calefacción | 0,44 | 23,7 | 2,8 | 1,1 | 0,6 |
| Jun | 22 | 22,1 | -0,1 | Climatización | 0,01 | 0,7 | 0,1 | 0,0 | 0,0 |
| Jul | 22 | 24,4 | -2,4 | Climatización | 0,25 | 13,5 | 1,6 | 0,6 | 0,4 |
| Ago | 22 | 25,0 | -3,0 | Climatización | 0,31 | 16,5 | 2,0 | 0,8 | 0,4 |
| Sep | 22 | 20,7 | 1,3 | Calefacción | 0,14 | 7,3 | 0,9 | 0,3 | 0,2 |
| Oct | 22 | 15,6 | 6,4 | Calefacción | 0,66 | 35,3 | 4,2 | 1,6 | 0,9 |
| Nov | 22 | 9,4 | 12,6 | Calefacción | 1,30 | 69,5 | 8,3 | 3,2 | 1,8 |
| Dic | 22 | 6,7 | 15,3 | Calefacción | 1,58 | 84,5 | 10,1 | 3,9 | 2,2 |
| Subtotales | | | | | 9,2 | | | 22,6 | 12,9 |
| Total (kWh a⁻¹) | | | | | | | | 44,8 | |
| Alicante – Ciudad Jardín | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 12,5 | 9,5 | Calefacción | 0,98 | 52,5 | 6,3 | 2,4 | 1,4 |
| Feb | 22 | 14,1 | 7,9 | Calefacción | 0,82 | 43,6 | 5,2 | 2,0 | 1,2 |
| Mar | 22 | 16,0 | 6,0 | Calefacción | 0,62 | 33,1 | 4,0 | 1,5 | 0,9 |
| Abr | 22 | 18,0 | 4,0 | Calefacción | 0,41 | 21,9 | 2,6 | 1,0 | 0,6 |
| May | 22 | 20,4 | 1,7 | Calefacción | 0,17 | 9,1 | 1,1 | 0,4 | 0,2 |
| Jun | 22 | 24,4 | -0,4 | Climatización | 0,04 | 2,3 | 0,3 | 0,1 | 0,1 |
| Jul | 22 | 25,9 | -1,9 | Climatización | 0,19 | 10,3 | 1,2 | 0,5 | 0,3 |
| Ago | 22 | 26,4 | -2,4 | Climatización | 0,25 | 13,2 | 1,6 | 0,6 | 0,3 |
| Sep | 22 | 24,8 | -2,8 | Climatización | 0,29 | 15,7 | 1,9 | 0,7 | 0,4 |
| Oct | 22 | 20,4 | 1,6 | Calefacción | 0,16 | 8,7 | 1,0 | 0,4 | 0,2 |
| Nov | 22 | 15,7 | 6,3 | Calefacción | 0,65 | 34,8 | 4,2 | 1,6 | 0,9 |
| Dic | 22 | 13,2 | 8,8 | Calefacción | 0,91 | 48,8 | 5,9 | 2,3 | 1,3 |
| Subtotales | | | | | 5,5 | | | 13,6 | 7,8 |
| Total (kWh a⁻¹) | | | | | | | | 26,8 | |

Tabla 4.9: Cálculo de la energía eléctrica anual requerida para calefacción y climatización con una ventana de madera y acristalamiento simple
($U_{\text{pared/ventana}} = 1,14 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)

| Mes | Vivienda | Exterior | Diferencia | Necesidad | Consumo de electricidad kWh mes ⁻¹ | Flujo de calor W | Pérdida de calor kWh mes ⁻¹ | Consumo eléctrico kWh mes ⁻¹ | Pérdida por permeabilidad kWh mes ⁻¹ |
|--|----------|----------|------------|-------------------|--|---------------------|---|--|--|
| Cataluña – Prat de Llobregat (Aeropuerto) | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 9,4 | 12,6 | Calefacción | 1,31 | 116,2 | 13,9 | 5,4 | 1,8 |
| Feb | 22 | 11,0 | 11,0 | Calefacción | 1,14 | 101,3 | 12,2 | 4,7 | 1,6 |
| Mar | 22 | 12,6 | 9,4 | Calefacción | 0,98 | 87,0 | 10,4 | 4,0 | 1,4 |
| Abr | 22 | 14,3 | 7,7 | Calefacción | 0,79 | 70,8 | 8,5 | 3,3 | 1,1 |
| May | 22 | 16,8 | 5,2 | Calefacción | 0,54 | 48,3 | 5,8 | 2,2 | 0,8 |
| Jun | 22 | 20,9 | 1,1 | Calefacción | 0,11 | 9,8 | 1,2 | 0,5 | 0,2 |
| Jul | 22 | 22,8 | -0,8 | Climatización | 0,08 | 7,1 | 0,9 | 0,3 | 0,1 |
| Ago | 22 | 23,2 | -1,2 | Climatización | 0,13 | 11,2 | 1,3 | 0,5 | 0,2 |
| Sep | 22 | 21,0 | 1,0 | Calefacción | 0,10 | 9,1 | 1,1 | 0,4 | 0,1 |
| Oct | 22 | 17,9 | 4,2 | Calefacción | 0,43 | 38,3 | 4,6 | 1,8 | 0,6 |
| Nov | 22 | 12,7 | 9,3 | Calefacción | 0,96 | 85,6 | 10,3 | 3,9 | 1,4 |
| Dic | 22 | 10,0 | 12,0 | Calefacción | 1,24 | 110,5 | 13,3 | 5,1 | 1,7 |
| | | | | Subtotales | 7,8 | | | 32,1 | 11,0 |
| | | | | | | | Total (kWh a⁻¹) | 50,9 | |
| Madrid – Retiro | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 7,3 | 14,8 | Calefacción | 1,53 | 136,0 | 16,3 | 6,3 | 2,2 |
| Feb | 22 | 9,9 | 12,1 | Calefacción | 1,25 | 111,8 | 13,4 | 5,2 | 1,8 |
| Mar | 22 | 13,3 | 8,8 | Calefacción | 0,91 | 80,7 | 9,7 | 3,7 | 1,3 |
| Abr | 22 | 14,3 | 7,7 | Calefacción | 0,80 | 70,8 | 8,5 | 3,3 | 1,1 |
| May | 22 | 17,7 | 4,3 | Calefacción | 0,44 | 39,5 | 4,7 | 1,8 | 0,6 |
| Jun | 22 | 22,1 | -0,1 | Climatización | 0,01 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,0 |
| Jul | 22 | 24,4 | -2,4 | Climatización | 0,25 | 22,5 | 2,7 | 1,0 | 0,4 |
| Ago | 22 | 25,0 | -3,0 | Climatización | 0,31 | 27,6 | 3,3 | 1,3 | 0,4 |
| Sep | 22 | 20,7 | 1,3 | Calefacción | 0,14 | 12,1 | 1,5 | 0,6 | 0,2 |
| Oct | 22 | 15,6 | 6,4 | Calefacción | 0,66 | 58,8 | 7,1 | 2,7 | 0,9 |
| Nov | 22 | 9,4 | 12,6 | Calefacción | 1,30 | 115,8 | 13,9 | 5,3 | 1,8 |
| Dic | 22 | 6,7 | 15,3 | Calefacción | 1,58 | 140,9 | 16,9 | 6,5 | 2,2 |
| | | | | Subtotales | 9,2 | | | 37,7 | 12,9 |
| | | | | | | | Total (kWh a⁻¹) | 59,9 | |
| Alicante – Ciudad Jardín | | | | | | | | | |
| Ene | 22 | 12,5 | 9,5 | Calefacción | 0,98 | 87,5 | 10,5 | 4,0 | 1,4 |
| Feb | 22 | 14,1 | 7,9 | Calefacción | 0,82 | 72,7 | 8,7 | 3,4 | 1,2 |
| Mar | 22 | 16,0 | 6,0 | Calefacción | 0,62 | 55,2 | 6,6 | 2,5 | 0,9 |
| Abr | 22 | 18,0 | 4,0 | Calefacción | 0,41 | 36,6 | 4,4 | 1,7 | 0,6 |
| May | 22 | 20,4 | 1,7 | Calefacción | 0,17 | 15,2 | 1,8 | 0,7 | 0,2 |
| Jun | 22 | 24,4 | -0,4 | Climatización | 0,04 | 3,8 | 0,5 | 0,2 | 0,1 |
| Jul | 22 | 25,9 | -1,9 | Climatización | 0,19 | 17,1 | 2,1 | 0,8 | 0,3 |
| Ago | 22 | 26,4 | -2,4 | Climatización | 0,25 | 22,0 | 2,6 | 1,0 | 0,3 |
| Sep | 22 | 24,8 | -2,8 | Climatización | 0,29 | 26,2 | 3,1 | 1,2 | 0,4 |
| Oct | 22 | 20,4 | 1,6 | Calefacción | 0,16 | 14,5 | 1,7 | 0,7 | 0,2 |
| Nov | 22 | 15,7 | 6,3 | Calefacción | 0,65 | 58,0 | 7,0 | 2,7 | 0,9 |
| Dic | 22 | 13,2 | 8,8 | Calefacción | 0,91 | 81,3 | 9,8 | 3,8 | 1,3 |
| | | | | Subtotales | 5,5 | | | 22,6 | 7,8 |
| | | | | | | | Total (kWh a⁻¹) | 35,9 | |

Los menores consumos eléctricos anuales se presentan para la zona de Alicante (20,1 kWh a⁻¹, ventana de PVC); en tanto que los valores más altos ocurren en Madrid (33,6 kWh a⁻¹, ventana de PVC). Valores intermedios se presentan para la zona del Prat de Llobregat (28,5 kWh a⁻¹, ventana de PVC).

La Tabla 4.10 también incluye las estimaciones de las emisiones anuales de CO₂, calculadas mediante la aplicación del factor de emisión del mix de generación eléctrico español (0,443 kg CO₂ kWh⁻¹). En orden creciente, y para el caso de la ventana de PVC, las emisiones estimadas ascienden a 9 kg CO₂ a⁻¹ para Alicante, 13 kg CO₂ a⁻¹ para el Prat de Llobregat, y 15 kg CO₂ a⁻¹ para Madrid.

Para la estimación del consumo total en la etapa de uso de las ventanas, se utiliza un período general de 50 años.

Tabla 4.10: Resumen de los consumos eléctricos anuales requeridos para calefacción y climatización de la habitación de análisis

| Zona | Tipo de perfil / ventana | Consumo eléctrico anual (kWh a ⁻¹) | Emisión de CO ₂ (kg a ⁻¹) |
|---------------------------------|---|--|--|
| El Prat de Llobregat, Barcelona | PVC con acristalamiento doble | 28,5 | 13 |
| | Aluminio con acristalamiento doble (sin rotura) | 43,9 | 19 |
| | Aluminio con acristalamiento doble (con rotura) | 32,0 | 14 |
| | Madera con acristalamiento doble | 38,1 | 17 |
| | Madera con acristalamiento simple | 50,9 | 23 |
| Madrid | PVC con acristalamiento doble | 33,6 | 15 |
| | Aluminio con acristalamiento doble (sin rotura) | 51,6 | 23 |
| | Aluminio con acristalamiento doble (con rotura) | 37,6 | 17 |
| | Madera con acristalamiento doble | 44,8 | 20 |
| | Madera con acristalamiento simple | 59,9 | 27 |
| Alicante | PVC con acristalamiento doble | 20,1 | 9 |
| | Aluminio con acristalamiento doble (sin rotura) | 30,9 | 14 |
| | Aluminio con acristalamiento doble (con rotura) | 22,6 | 10 |
| | Madera con acristalamiento doble | 26,8 | 12 |
| | Madera con acristalamiento simple | 35,9 | 16 |

4.6 La desconstrucción

Esta actividad, que se entiende como el desmantelamiento de la ventana con la intención de aprovechar al máximo los materiales mediante reciclaje, podría demandar solamente mano de obra y tal vez un bajo consumo energético. Se asume que el consumo energético de esta fase no es relevante.

4.7 El reciclaje

Se asume que un 97% del PVC, aluminio, y vidrio contenidos en la ventana son reciclables. El restante 3% constituyen residuos que se depositan en vertedero. Para la madera, se considera que en su totalidad se dispone en vertedero.

Para el reciclaje de los perfiles de PVC, se utiliza un consumo eléctrico de 0,25 kWh kg⁻¹ (comunicación de Asoven).

Para el reciclaje de aluminio, vidrio y acero, se utilizan consumos eléctricos de 4,17 kWh kg⁻¹ (WBG, 2004), 2,03 kWh kg⁻¹ (EPA, 2004) y 5,03 kWh kg⁻¹ (EPA, 2004), respectivamente. Los valores del vidrio y del acero corresponden al consumo energético para la fundición de vidrio primario y acero, que indican los respectivo documentos BREF europeos.

4.8 La disposición final

Se asume un consumo energético de 0,155 kWh por cada kg de residuo depositado en vertedero (Choate and Ferland, 2004). Se considera que la energía proviene en un 100% de gasóleo.

4.9 El transporte

Se asume que el transporte en la conexión de las diferentes etapas del ciclo de vida, se realiza con camiones de carga que consumen gasóleo, y que tienen una demanda energética de 0,00073 kWh km⁻¹ kg⁻¹ (WEC, 1998). Este valor es aplicable a Europa Occidental.

Se consideró un recorrido medio de 100 km para el transporte de materiales hasta la planta de ensamblaje; y de 100 km tanto para el transporte de la ventana hasta el sitio de instalación, como para la disposición de los residuos en vertedero.

4.10 Factores de emisión

La Tabla 4.11 presenta los factores de emisión de CO₂ base que se utilizan en cada etapa, según la composición o tipo del suministro energético ya indicados para cada caso.

Tabla 4.11: Factores de emisión de CO₂

| Fuente de energía / combustible | Factor de emisión | | |
|---|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| | † C TJ ⁻¹ (IPCC, 1996) | † CO ₂ TJ ⁻¹ | † CO ₂ MWh ⁻¹ |
| Mix eléctrico español | | | 0,443* |
| Producción de PVC en Hispavic - Vinilis (Martorell) | | | 0,284*¶ |
| Gasóleo / fuelóleo | 20,2 | 74,1 | 0,267 |
| Gas natural | 15,3 | 56,1 | 0,202 |
| Carbón (hulla) | 26,2 | 96,1 | 0,346 |

* Deducidos en el documento: "Estimación del consumo energético y de la emisión de CO₂ asociados a la producción unitaria de PVC, JM Baldasano y R. Parra. Enero de 2005".

¶ Corresponde al criterio de cálculo que considera como objetivo la obtención conjunta de PVC y sosa cáustica.

5 Resultados y análisis comparativo

5.1 Estimación de consumos energéticos y emisiones de CO₂ para el sistema pared/ventana

En el análisis de los resultados que aquí se presentan, se incluyen los consumos de energía y de emisiones de CO₂, que se obtuvieron para la zona del Prat de Llobregat (Barcelona), que se consideran como magnitudes representativas para España.

Los mayores gastos de energía en la etapa de extracción y producción de materiales, en orden decreciente, corresponden a la ventana de aluminio (1.407 kWh para ventanas con 30% de aluminio reciclado y 1.981 kWh para el caso de no incluir material reciclado); la ventana de PVC (214 kWh y 254 kWh en los casos de incluir un 30% de PVC reciclado y para ventanas sin PVC reciclado, respectivamente); la ventana de madera con cristal doble (76 kWh) y la ventana de madera con acristalamiento simple (45 kWh), la cual presenta el menor consumo de energía en la etapa de extracción y producción debido al uso de una sola luna de vidrio. Esta información se encuentra resumida en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ en la etapa de extracción y producción de materiales; porcentaje respecto al total.

| | Consumo de energía | | Emisión de CO ₂ | |
|--|--------------------|------|----------------------------|------|
| | kWh | % | kg | % |
| Ventana madera, acristalamiento simple | 44,7 | 1,7 | 13,7 | 1,2 |
| Ventana madera, acristalamiento doble | 74,5 | 3,6 | 22,2 | 2,5 |
| Ventana PVC, 30% PVC Reciclado | 214,0 | 12,3 | 66,3 | 9,1 |
| Ventana PVC, 0% PVC Reciclado | 253,6 | 14,2 | 77,6 | 10,5 |
| Ventana aluminio, sin rotura, 30% Al reciclado | 1.406,5 | 36,6 | 613,5 | 36,5 |
| Ventana aluminio, con rotura, 30% Al reciclado | 1.406,5 | 43,4 | 613,5 | 43,3 |
| Ventana aluminio, sin rotura, 0% Al reciclado | 1.981,1 | 44,9 | 867,9 | 44,8 |
| Ventana aluminio, con rotura, 0% Al reciclado | 1.981,1 | 51,9 | 867,9 | 51,9 |

En las Tablas 5.2-5.9 se resume la información obtenida para los diferentes escenarios analizados. Los consumos energéticos de la fase de uso se refieren a las pérdidas de energía a través de la ventana. En todos los casos se observa que esta es la etapa que presenta los porcentajes más altos. Para las ventanas de PVC, aluminio y madera, corresponden porcentajes del 82%, 58% y 97%, respectivamente.

Para las ventanas de PVC, los otros componentes con mayor demanda de energía corresponden a la etapa de extracción y producción de materiales (14%) y la etapa de reciclaje (5%). El uso del 30% de PVC reciclado en la fabricación de los perfiles de PVC, implica una reducción de demanda energética en la etapa de extracción y producción, de 254 kWh a 214 kWh (reducción de un 16%).

Para las ventanas de aluminio, el consumo energético debido a la extracción y producción de materiales representa entre el 42 y el 57% de la energía total consumida. El uso del 30% de aluminio reciclado, implica un reducción de demanda energética en la etapa de extracción y producción, de 1.981 kWh a 1.407 kWh (reducción de un 29%). El consumo para el reciclaje de materiales representa aproximadamente un 7% del consumo total de energía.

Tabla 5.2: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de PVC con acristalamiento doble (sin uso de PVC reciclado en el marco, $U_{\text{pared/ventana}} = 0,65 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Resumen

| | Consumo de energía | | Emisión de CO ₂ | |
|--------------------------|--------------------|------|----------------------------|------|
| | kWh | % | kg | % |
| Extracción y producción | 253,6 | 14,2 | 77,6 | 10,5 |
| Transporte a montaje | 3,9 | 0,2 | 1,0 | 0,1 |
| Montaje | 4,8 | 0,3 | 2,1 | 0,3 |
| Transporte a edificio | 3,9 | 0,2 | 1,0 | 0,1 |
| Uso (50 años) | 1.427,4 | 80,2 | 632,1 | 85,2 |
| Transporte a vertedero | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Disposición en vertedero | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| Transporte a reciclaje | 3,9 | 0,2 | 1,0 | 0,1 |
| Reciclaje | 82,2 | 4,6 | 26,6 | 3,6 |
| Total: | 1.780 | 100 | 742 | 100 |

Tabla 5.3: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de PVC con acristalamiento doble (uso del 30% de PVC reciclado en el marco, $U_{\text{pared/ventana}} = 0,65 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Resumen

| | Consumo de energía | | Emisión de CO ₂ | |
|--------------------------|--------------------|------|----------------------------|------|
| | kWh | % | kg | % |
| Extracción y producción | 214,0 | 12,3 | 66,3 | 9,1 |
| Transporte a montaje | 3,9 | 0,2 | 1,0 | 0,1 |
| Montaje | 4,8 | 0,3 | 2,1 | 0,3 |
| Transporte a edificio | 3,9 | 0,2 | 1,0 | 0,1 |
| Uso (50 años) | 1.427,4 | 82,0 | 632,1 | 86,6 |
| Transporte a vertedero | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Disposición en vertedero | 0,2 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| Transporte a reciclaje | 3,9 | 0,2 | 1,0 | 0,1 |
| Reciclaje | 82,2 | 4,7 | 26,6 | 3,6 |
| Total: | 1.740 | 100 | 730 | 100 |

Tabla 5.4: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio sin rotura con acristalamiento doble (sin uso de aluminio reciclado, $U_{\text{pared/ventana}} = 0,89 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Resumen

| | Consumo de energía | | Emisión de CO ₂ | |
|--------------------------|--------------------|------|----------------------------|------|
| | kWh | % | kg | % |
| Extracción y producción | 1.981,1 | 44,9 | 867,9 | 44,8 |
| Transporte a montaje | 4,8 | 0,1 | 1,3 | 0,1 |
| Montaje | 4,8 | 0,1 | 2,1 | 0,1 |
| Transporte a edificio | 4,8 | 0,1 | 1,3 | 0,1 |
| Uso (50 años) | 2.194,5 | 49,7 | 971,8 | 50,2 |
| Transporte a vertedero | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Disposición en vertedero | 0,3 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| Transporte a reciclaje | 4,8 | 0,1 | 1,3 | 0,1 |
| Reciclaje | 217,8 | 4,9 | 89,6 | 4,6 |
| Total: | 4.413 | 100 | 1.935 | 100 |

Tabla 5.5: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio sin rotura con acristalamiento doble (con 30% de aluminio reciclado, $U_{\text{pared/ventana}} = 0,89 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Resumen

| | Consumo de energía | | Emisión de CO ₂ | |
|--------------------------|--------------------|------|----------------------------|------|
| | KWh | % | kg | % |
| Extracción y producción | 1.406,5 | 36,6 | 613,5 | 36,5 |
| Transporte a montaje | 4,8 | 0,1 | 1,3 | 0,1 |
| Montaje | 4,8 | 0,1 | 2,1 | 0,1 |
| Transporte a edificio | 4,8 | 0,1 | 1,3 | 0,1 |
| Uso (50 años) | 2.194,5 | 57,2 | 971,8 | 57,8 |
| Transporte a vertedero | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Disposición en vertedero | 0,3 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| Transporte a reciclaje | 4,8 | 0,1 | 1,3 | 0,1 |
| Reciclaje | 217,8 | 5,7 | 89,6 | 5,3 |
| Total: | 3.838 | 100 | 1.681 | 100 |

Tabla 5.6: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio con rotura con acristalamiento doble (sin uso de aluminio reciclado, $U_{\text{pared/ventana}} = 0,77 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Resumen

| | Consumo de energía | | Emisión de CO ₂ | |
|--------------------------|--------------------|------|----------------------------|------|
| | kWh | % | kg | % |
| Extracción y producción | 1.981,1 | 51,9 | 867,9 | 51,9 |
| Transporte a montaje | 4,8 | 0,1 | 1,3 | 0,1 |
| Montaje | 4,8 | 0,1 | 2,1 | 0,1 |
| Transporte a edificio | 4,8 | 0,1 | 1,3 | 0,1 |
| Uso (50 años) | 1.600,0 | 41,9 | 708,6 | 42,4 |
| Transporte a vertedero | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Disposición en vertedero | 0,3 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| Transporte a reciclaje | 4,8 | 0,1 | 1,3 | 0,1 |
| Reciclaje | 217,8 | 5,7 | 89,6 | 5,4 |
| Total: | 3.819 | 100 | 1.672 | 100 |

Tabla 5.7: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio con rotura con acristalamiento doble (con 30% de aluminio reciclado, $U_{\text{pared/ventana}} = 0,77 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Resumen

| | Consumo de energía | | Emisión de CO ₂ | |
|--------------------------|--------------------|------|----------------------------|------|
| | kWh | % | kg | % |
| Extracción y producción | 1.406,5 | 43,4 | 613,5 | 43,3 |
| Transporte a montaje | 4,8 | 0,1 | 1,3 | 0,1 |
| Montaje | 4,8 | 0,1 | 2,1 | 0,1 |
| Transporte a edificio | 4,8 | 0,1 | 1,3 | 0,1 |
| Uso (50 años) | 1.600,0 | 49,3 | 708,6 | 50,0 |
| Transporte a vertedero | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Disposición en vertedero | 0,3 | 0,0 | 0,1 | 0,0 |
| Transporte a reciclaje | 4,8 | 0,1 | 1,3 | 0,1 |
| Reciclaje | 217,8 | 6,7 | 89,6 | 6,3 |
| Total: | 3.244 | 100 | 1.418 | 100 |

Tabla 5.8: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de madera con acristalamiento doble. ($U_{\text{paredventana}} = 0,68 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Resumen

| | Consumo de energía | | Emisión de CO ₂ | |
|--------------------------|--------------------|------|----------------------------|------|
| | kWh | % | kg | % |
| Extracción y producción | 74,5 | 3,6 | 22,2 | 2,5 |
| Transporte a montaje | 2,5 | 0,1 | 0,7 | 0,1 |
| Montaje | 4,8 | 0,2 | 2,1 | 0,2 |
| Transporte a edificio | 2,5 | 0,1 | 0,7 | 0,1 |
| Uso (50 años) | 1.906,8 | 93,2 | 844,4 | 95,3 |
| Transporte a vertedero | 1,0 | 0,1 | 0,3 | 0,0 |
| Disposición en vertedero | 2,2 | 0,1 | 0,6 | 0,1 |
| Transporte a reciclaje | 2,5 | 0,1 | 0,7 | 0,1 |
| Reciclaje | 47,9 | 2,3 | 14,4 | 1,6 |
| Total: | 2.045 | 100 | 886 | 100 |

Tabla 5.9: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de madera con acristalamiento simple. ($U_{\text{pared/ventana}} = 1,14 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Resumen

| | Consumo de energía | | Emisión de CO ₂ | |
|--------------------------|--------------------|------|----------------------------|------|
| | kWh | % | kg | % |
| Extracción y producción | 44,7 | 1,7 | 13,7 | 1,2 |
| Transporte a montaje | 1,7 | 0,1 | 0,5 | 0,0 |
| Montaje | 4,8 | 0,2 | 2,1 | 0,2 |
| Transporte a edificio | 1,7 | 0,1 | 0,5 | 0,0 |
| Uso (50 años) | 2.548,9 | 96,8 | 1.128,8 | 97,7 |
| Transporte a vertedero | 1,0 | 0,0 | 0,3 | 0,0 |
| Disposición en vertedero | 2,1 | 0,1 | 0,6 | 0,0 |
| Transporte a reciclaje | 1,7 | 0,1 | 0,5 | 0,0 |
| Reciclaje | 26,2 | 1,0 | 8,2 | 0,7 |
| Total: | 2.633 | 100 | 1.155 | 100 |

Las Figuras 5.1-5.6 presentan por etapas y en forma gráfica, las estimaciones del consumo de energía y de las emisiones de CO₂ para cada tipo de ventana analizada.

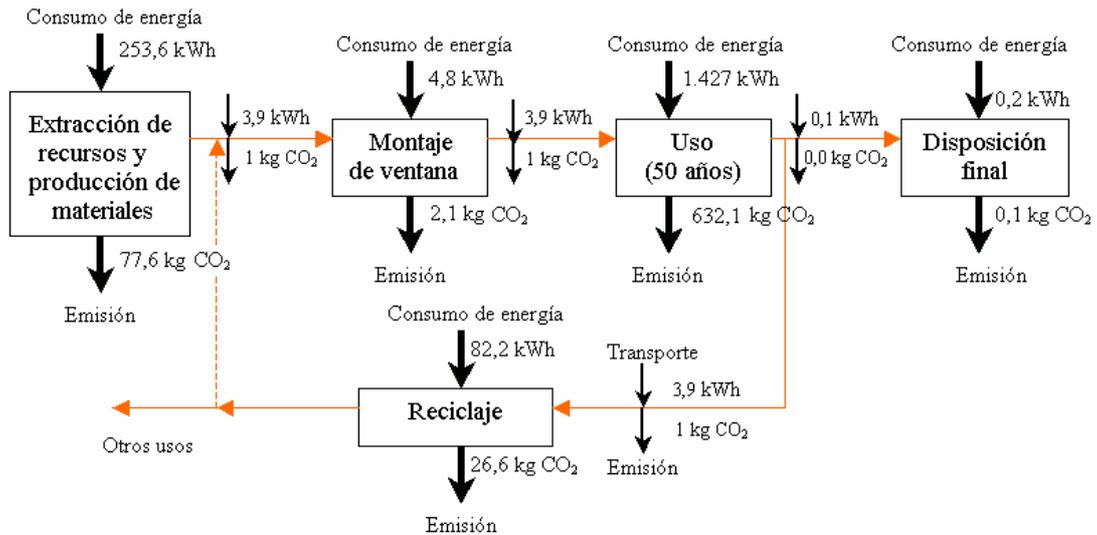


Figura 5.1: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de PVC con acristalamiento doble (sin uso de PVC reciclado en el perfil de la ventana)

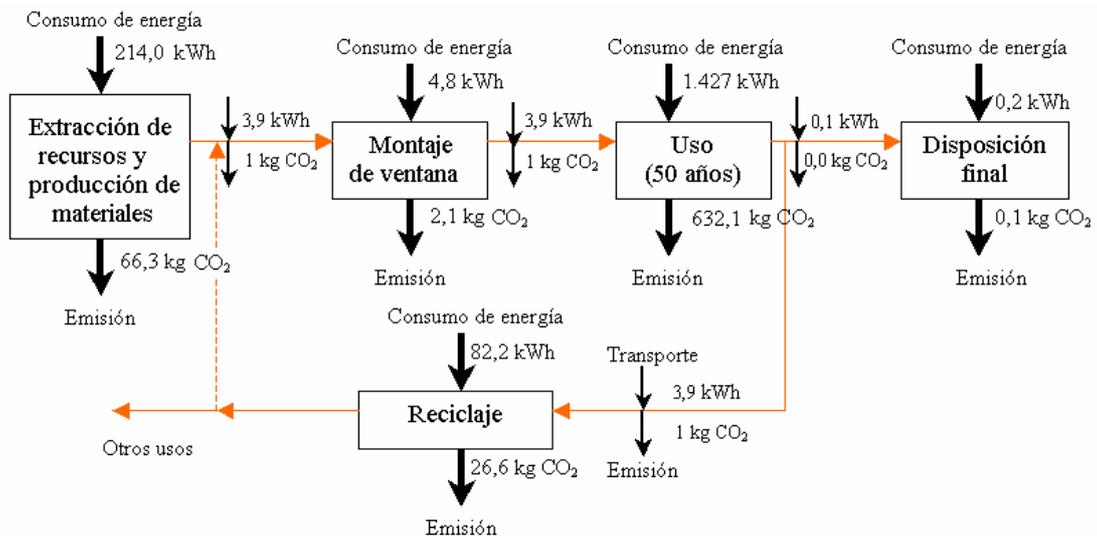


Figura 5.2: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de PVC con acristalamiento doble (uso de un 30% de PVC reciclado en el perfil de la ventana)

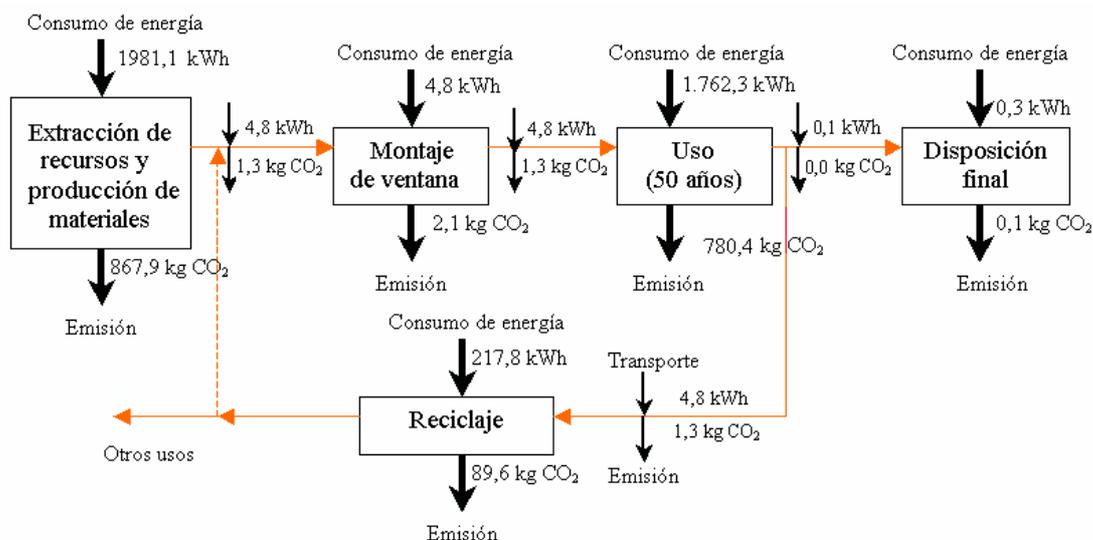


Figura 5.3: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio sin rotura con acristalamiento doble (sin uso de aluminio reciclado en el perfil de la ventana)

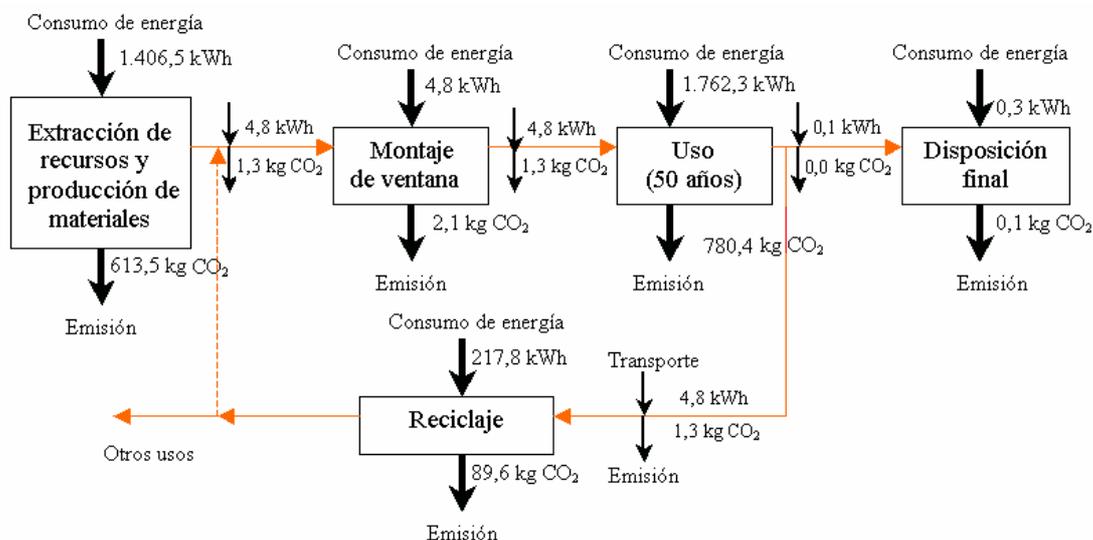


Figura 5.4: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio sin rotura con acristalamiento doble (con un 30% de aluminio reciclado en el perfil de la ventana)

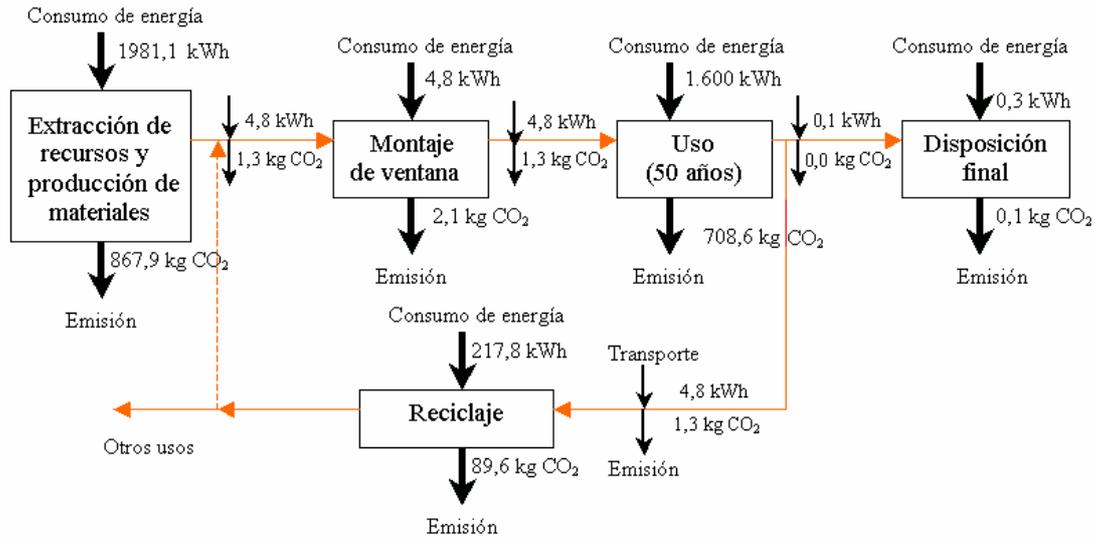


Figura 5.5: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio con rotura con acristalamiento doble (sin uso de aluminio reciclado en el perfil de la ventana)

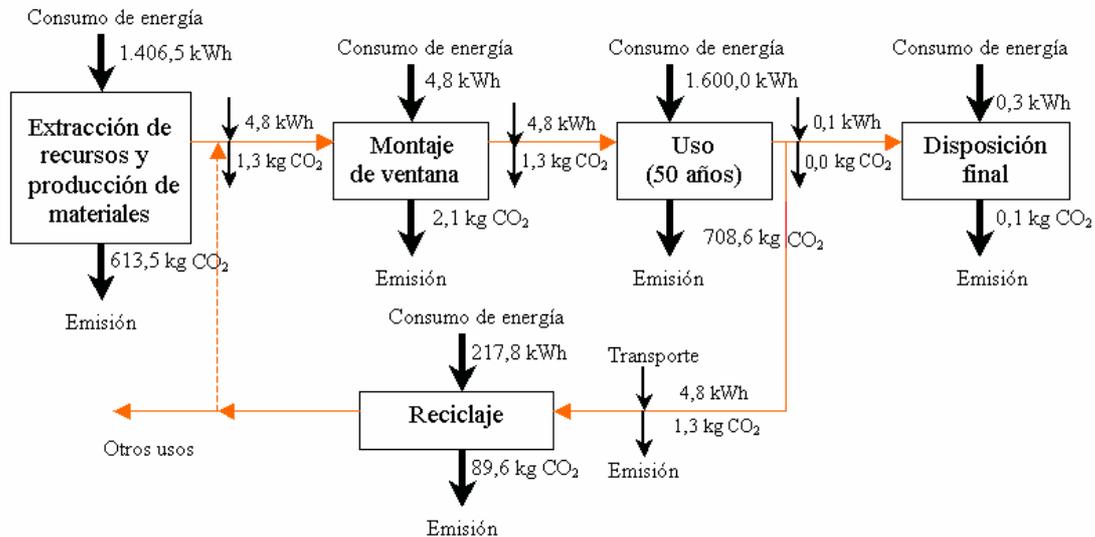


Figura 5.6: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de aluminio con rotura con acristalamiento doble (con un 30% de aluminio reciclado en el perfil de la ventana)

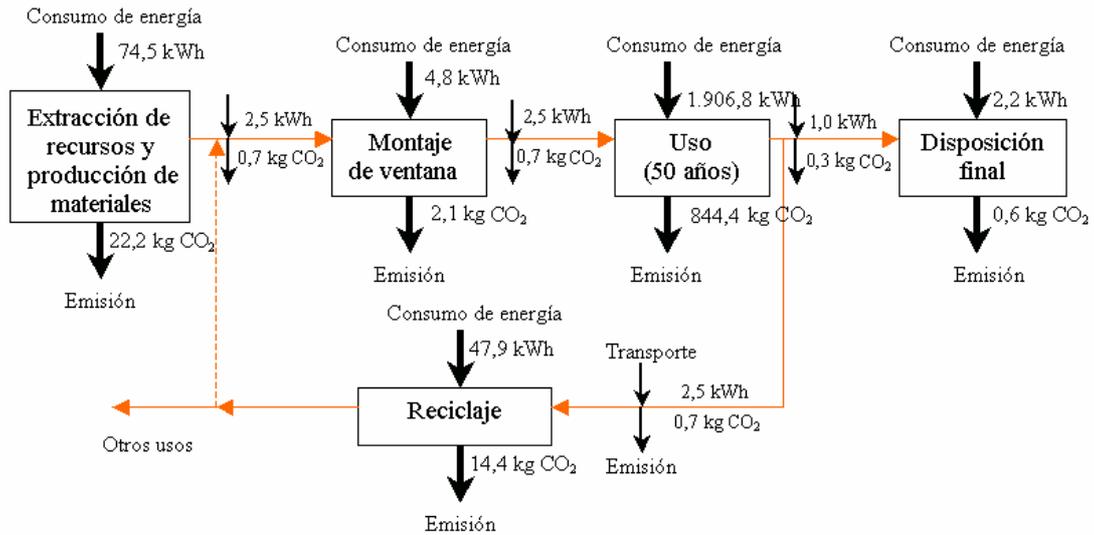


Figura 5.7: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de madera con acristalamiento doble

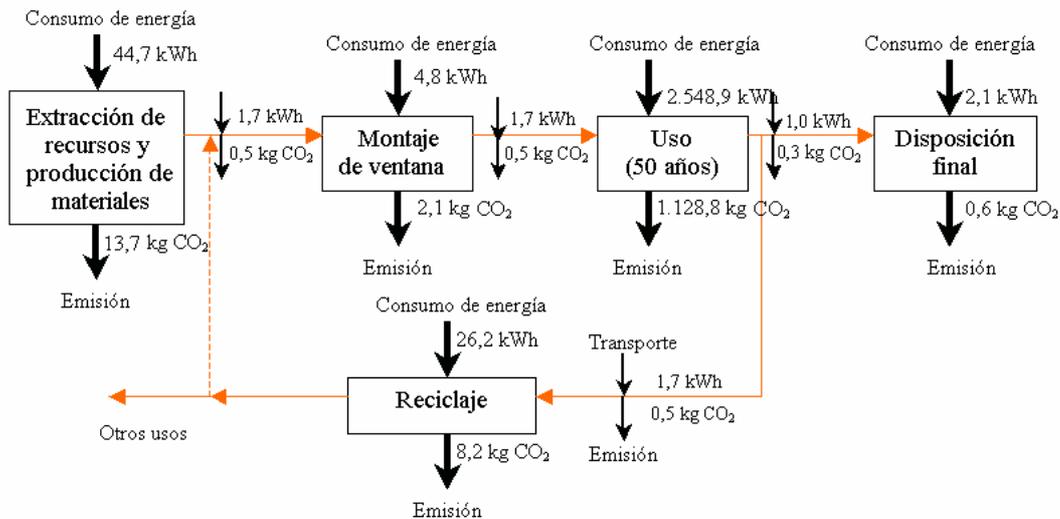


Figura 5.8: Estimación del consumo de energía y emisiones de CO₂ debido a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos de una ventana de madera con acristalamiento simple

La Tabla 5.10 presenta un resumen de los consumos de energía totales y de las respectivas emisiones de CO₂, para los 8 casos analizados. También incluye el peso de material reciclado.

Tabla 5.10: Resumen de los consumos de energía, emisiones de CO₂ y material reciclado atribuible a la producción, uso (50 años), reciclaje y disposición final de residuos de ventanas fabricadas con diferentes materiales.

| Ventana | Consumo eléctrico (kWh) | Emisiones de CO ₂ (kg) | Material reciclado (kg) | | | | | |
|--|-------------------------|-----------------------------------|-------------------------|------|-------|----------|--------------------------|----------------------|
| | | | Vidrio | PVC | Acero | Aluminio | Total material reciclado | % del material total |
| PVC 30% reciclado doble acristalamiento | 1.740 | 730 | 21,4 | 21,1 | 6,7 | | 49,2 | 93,4% |
| PVC 0% reciclado doble acristalamiento | 1.780 | 742 | 21,4 | 21,1 | 6,7 | | 49,2 | 93,4% |
| Madera doble acristalamiento | 2.045 | 886 | 21,4 | | | | 21,4 | 61,5% |
| Madera simple acristalamiento | 2.633 | 1.155 | 10,7 | | | | 10,7 | 45,0% |
| Aluminio 30% reciclado <i>con rotura</i> doble acristalamiento | 3.244 | 1.418 | 21,4 | | | 40,8 | 62,2 | 94,1% |
| Aluminio 0% reciclado <i>con rotura</i> doble acristalamiento | 3.819 | 1.672 | 21,4 | | | 40,8 | 62,2 | 94,1% |
| Aluminio 30% reciclado <i>sin rotura</i> doble acristalamiento | 3.838 | 1.681 | 21,4 | | | 40,8 | 62,2 | 94,1% |
| Aluminio 0% reciclado <i>sin rotura</i> doble acristalamiento | 4.413 | 1.935 | 21,4 | | | 40,8 | 62,2 | 94,1% |

La ventana de PVC con un 30% de material reciclado presenta el menor consumo de energía (1.740 kWh) y emisiones de CO₂ (730 kg). Al final de la etapa de reciclado, se obtienen 21,4 kg de vidrio secundario, 21,1 kg de PVC y 6,7 de acero, totalizando 49,2 kg de material reciclado (93,4% del material total de la ventana). La ventana de PVC sin material reciclado presenta un consumo de 1.780 kWh y emisiones de 742 kg CO₂. La cantidad total de materiales reciclados es también igual a 49,2 kg (93,4%).

La ventana de madera con acristalamiento doble presenta un consumo de 2.045 kWh y emisiones de 886 kg CO₂. En la etapa de reciclado se aprovechan los 21,4 kg de vidrio (61,5% del material de la ventana). A continuación, aparece la ventana de madera con acristalamiento simple. Esta ventana presenta el mayor coeficiente de conductividad térmica ($U_{\text{pared/ventana}} 1,14 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), aunque menor consumo energético en la etapa de extracción y producción de materiales implica que en los resultados globales, esta ventana presente un consumo energético (2.549 kWh) y emisiones de CO₂ (1.129 kg CO₂) más bajos que las obtenidas para las ventanas de aluminio, pero más altos que para la ventana de PVC. Esta ventana proporciona la menor cantidad de material reciclado (10,7 kg de vidrio; 45,0%).

Los valores más altos de energía utilizada y de emisiones de CO₂ corresponden a las ventanas de aluminio. Las ventanas con un 30% de aluminio reciclado presentan un consumo energético de 3.244 kWh y 3.838 kWh para los casos de ventanas con rotura y sin rotura térmica. A estas ventanas corresponden unas emisiones de CO₂ de 1.418 kg CO₂ y 1.681 kg CO₂, respectivamente. Para los escenarios de ventanas sin uso de aluminio reciclado, los consumos energéticos representan 3.819 kWh y 4.413 kWh para las ventanas con rotura y sin rotura térmica, en ese orden (emisiones de 1.672 kg CO₂ para la ventana con rotura térmica y 1.935 kg CO₂ para el caso de ventana de aluminio sin rotura térmica). Todas las ventanas de aluminio aportan 62,2 kg de material reciclado (94,1% del material total de la ventana).

6 Conclusiones

En este documento se presentan las estimaciones del consumo energético y de las emisiones de CO₂ asociadas a la producción, uso, reciclaje y disposición final de residuos atribuibles a una ventana batiente estándar de 1,34 m x 1,34 m, con doble acristalamiento, cuyos marcos estructurales se fabrican alternativamente con PVC, aluminio (sin y con rotura térmica) y madera. Debido a que en España hay un uso importante de la ventana de madera con acristalamiento simple, se ha incluido esta alternativa como un octavo caso de análisis complementario.

El enfoque abarca todas las etapas de un Análisis de Ciclo de Vida, aunque analiza solamente los dos factores ambientales antes indicados; y busca que los resultados sean representativos para la Península Ibérica, tanto en lo que se refiere a los consumos y configuración de las fuentes energéticas. Por lo tanto, se ha priorizado la información de esta zona; sin embargo, el análisis se complementa con información del ámbito europeo o internacional.

Entre las magnitudes básicas utilizadas en este documentos se incluye al factor de emisión de CO₂ del mix eléctrico de España del año 2002, así como los respectivos valores del consumo de energía y de las emisiones de CO₂ asociadas a la producción del PVC, tomado como referencia la planta de PVC situada en Martorell.

Con el fin de estimar el impacto del consumo energético y emisiones de dióxido de carbono, se ha desarrollado una metodología de contabilidad ambiental de dichos indicadores, que consiste en estimar su valor en cada una de las etapas del ciclo de vida de la ventana (extracción y producción, transporte a montaje, montaje, transporte a edificio, uso, transporte a vertedero, disposición en vertedero, transporte a reciclaje y reciclaje). Los resultados finales suponen la suma de los consumos de energía y de las emisiones de CO₂ equivalente para cada una de estas etapas.

Los valores del consumo de energía en el montaje de las ventanas de PVC y del reciclaje corresponden a información fiable, que han sido proporcionadas por los propios productores. En este sentido, se resalta la menor fiabilidad de los consumos energéticos que se han utilizado para otros materiales como el aluminio, el vidrio y la madera, para los cuales se ha utilizado información a nivel europeo o internacional. La variabilidad de los resultados no afecta a la fase de uso, que como se ha visto constituye la etapa de mayor demanda de energía y por tanto de las mayores emisiones de CO₂.

La ventana a la que se le atribuye el menor consumo de energía y de emisión de CO₂ es la ventana de PVC con un 30% de material reciclado, seguida por la ventana de PVC sin material reciclado. Los valores más altos de energía utilizada y de emisiones de CO₂ corresponden a la ventanas de aluminio sin material reciclado y sin rotura térmica.

Los resultados obtenidos indican que en todos los casos analizados, los porcentajes mas altos del consumo de energía corresponden a la etapa de

uso de la ventana. Los consumos de energía en las etapas de extracción y producción de materiales son importantes (hasta un 52% del valor total) para las ventanas de aluminio. Este porcentaje es menor para las ventanas de PVC (14%) y madera (4%).

El menor peso del PVC beneficia los costes del transporte de este material frente a otros materiales más pesados como el aluminio.

Respecto al reciclaje de los materiales de las ventanas, en los casos del PVC y el aluminio hay una mayor disponibilidad de material reciclado para la construcción de una nueva ventana o para el uso de estos materiales en otros productos. En el caso de las ventanas de madera, al no poder reciclarse el material, se debe proceder a la extracción y tratamiento de madera nueva.

7 Referencias

- 1 Asif, M., Davidson, A., Muneer, T. (2002). Life cycle analysis of window materials - a comparative assessment, CIBSE National Technical Conference, London.
- 2 Baldasano, J.M., Parra, R. (2005). Estimación del consumo energético y de la emisión de CO₂ asociados a la producción unitaria de PVC. Estudio de la planta de Hispavic - Vinilis en Martorell (España). Informe: PVC-Fab-200501-1, Enero, 28 pp.
- 3 Environmental performance assessment of glazing and window: context, overview, main concerns. IEA-SHC Task 27 (<http://www.iea-shc-task27.org/>, diciembre de 2004)
- 4 Chevalier, L. , Krogh , H., Tarantini, M. (2002). Environmental performance assessment of glazing and window: context, overview, main concerns. IEA-SHC Task 27 (<http://www.iea-shc-task27.org/>, diciembre de 2004)
- 5 Choate, A. , Ferland, H. Waste Management and Energy Savings: Benefits by the Numbers. U.S. EPA. (<http://yosemite.epa.gov>, diciembre de 2004)
- 6 EC (2004). Life Cycle Assessment of PVC and of principal competing materials. European Comission. Final Report.
- 7 EPA (2004). About Brefs. Environmental Protection Agency. (<http://www.epa.ie/Licensing/IPPC/Licensing/BREFDocuments/>, diciembre de 2004)
- 8 INE (2004). Instituto Nacional de Estadística. (<http://www.ine.es>, diciembre 2004).
- 9 IPCC (1996). *Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventor*.
- 10 MFOM (2004). Código Técnico de la Edificación. Propuesta de real decreto de aprobación. Ministerio de Fomento. (<http://www.mfom.es>, diciembre 2004)
- 11 Morrison, G. (2004). Air conditioner performance rating. University of New South Wales. Sidney. (<http://solar1.mech.unsw.edu.au/>, diciembre de 2004)
- 12 REE (2004). Proyecto Indel: Atlas de la demanda eléctrica española. Red Eléctrica de España. (<http://www.ree.es>, diciembre 2004)
- 13 UNE (2000). UNE-EN 12207:2000. Ventanas y puertas - Permeabilidad al aire – Clasificación.
- 14 WBG (2004). Aluminum Manufacturing. The World Bank Group. (<http://www.wbg.org/>, diciembre de 2004)

- 15 WEC (2004). Total Energy Use Characteristics, del Global Transport and Energy Development: The Scope for Change, WEC. (<http://www.worldenergy.org>, diciembre de 2004)
- 16 Weir, G., Muneer, T. (1998). Energy and environmental impact analysis of double-glazed windows. *Energy Convers.* 39, 243 - 256.