



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Departament d'Enginyeria de Projectes
i de la Construcció

Laboratorio de Modelización Ambiental

Análisis del consumo energético y la emisión de CO₂ asociados al ciclo de vida de ventanas de PVC, Aluminio y Madera mediante su ACV

*Dr. José María Baldasano Recio
y
Dra. Violeta Vargas*

Informe: PVC-Ventanas-201701
Versión 1.2

Barcelona, julio de 2017

Índice

1. Resumen.....	5
2. El actual Cambio Climático y el Acuerdo de París.....	9
3. Antecedentes y objetivos.....	12
3.1. Estudios previos en España.....	14
3.2. Objetivos y bases de cálculo.....	15
3.3. Contenido del documento.....	16
4. Metodología	17
5. El ciclo de vida de una ventana.....	21
6. Bases de cálculo para la estimación del consumo de energía y de la emisión de CO₂ atribuible a una ventana	23
6.1. Dimensiones.....	23
6.2. Materiales del marco estructural	23
6.3. Acristalamiento	23
6.4. Tipología de las ventanas analizadas	23
6.5. La extracción y producción de materiales	24
6.6. El montaje de la ventana	25
6.7. El uso de la ventana.....	25
6.8. Transmitancia térmica del sistema pared/ventana.....	27
6.9. Temperatura ambiental exterior	29
6.10. Estimación de las pérdidas por permeabilidad al aire	30
6.11. La desconstrucción.....	30
6.12. El reciclaje	31
6.13. La disposición final	32
6.14. El transporte	32
6.15. Factores de emisión de CO ₂	32
7. Resultados y análisis comparativo	35
7.1. Estimación del consumo de energía y emisión de CO ₂ en la etapa de uso.....	35
7.2. Estimación de consumos energéticos y emisiones de CO ₂ para el sistema pared/ventana.....	37
7.3. Análisis y discusión de los resultados del ACV utilizando la herramienta SimaPro.....	40
8. Conclusiones	47
9. Referencias	50
Anexo 1 Recopilación bibliográfica.....	52

Lista de Tablas

Tabla 6.1 Consumos energéticos de la extracción de recursos naturales y de la producción de materiales.....	25
Tabla 6.2 Áreas del sistema pared/ventana.....	27
Tabla 6.3 Coeficientes de transmitancia térmica ($Wm^{-2}C^{-1}$).....	28
Tabla 6.4 Coeficientes de transmitancia térmica ($U_{pared/ventana}$) del sistema pared/ventana ($Wm^{-2}C^{-1}$).....	28
Tabla 6.5 Factores de emisión de CO ₂	34
Tabla 7.1 Cálculo de la energía eléctrica anual requerida para calefacción y climatización y emisiones de CO ₂ asociadas.	35
Tabla 7.2 ACV consumo de energía de cada etapa y porcentaje respectivo (kWh/año).....	37
Tabla 7.3 ACV emisión de CO ₂ de cada etapa y porcentaje respectivo.....	38
Tabla 7.4 Contribución asociada a cada categoría de impacto ambiental y a cada tipo de material de ventana analizado.....	41

Lista de Figuras

Figura 2.1 Reducción de las emisiones de CO ₂ según sectores emisores y acciones potenciales de reducción (AIE, 2015)	10
Figura 3.1 Radiografía térmica de una casa	13
Figura 4.1 Gráfico que ilustra el concepto de Economía circular	20
Figura 5.1 El ciclo de vida de una ventana	21
Figura 6.1 Dimensiones de la ventana y habitación de análisis	26
Figura 6.2 Zonas climáticas seleccionadas de España	29
Figura 6.3 Variación mensual de la temperatura media del aire de las seis zonas seleccionadas de España y el promedio de España (azul suave)	30
Figura 6.4 Material acumulado para el reciclaje de perfiles de PVC (izquierda) y Aluminio (derecha)	31
Figura 6.5 Reciclaje de PVC en Europa (Fuente: 2017 VinylPlus Progress Report year 2016)	31
Figura 6.6 Evolución en el período 2007-2016 del factor de emisión de CO ₂ en España	33
Figura 6.7 Evolución en el período 2007-2016 del mix eléctrico español	34
Figura 7.1 Energía eléctrica anual requerida para calefacción y climatización	36
Figura 7.2 Emisiones en base anual de CO ₂ asociadas	36
Figura 7.3 Consumo de energía (kWh) asociada a cada etapa del ciclo de vida	39
Figura 7.4 Emisión de CO ₂ (kg CO ₂) asociada a cada etapa del ciclo de vida	40
Figura 7.5 Comparación de los tipos de ventanas según las categorías de impacto ambiental significativas	42
Figura 7.6 Resultados de ReCiPe para la categoría de impacto: cambio climático	43
Figura 7.7 Resultados de ReCiPe para la categoría de impacto: Agotamiento de combustibles fósiles	43
Figura 7.8 Resultados de ReCiPe para la categoría de impacto: toxicidad humana	44
Figura 7.9 Resultados de ReCiPe para la categoría de impacto: radiación ionizante	45
Figura 7.10 Resultados de ReCiPe para la categoría de impacto: ocupación de Suelo	46

1. Resumen

El Acuerdo de París sobre el Cambio Climático, firmado el 12 de diciembre de 2015 por 193 países, **constituye un hito clave en la lucha contra el calentamiento global y el actual cambio climático que el mismo provoca**. Su importancia radica en que establece claramente una política de mitigación, **es decir de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero**.

La ventana proporciona una serie de funciones y 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 confort de calefacción y climatización.

En este documento se presentan dos **Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de una ventana** batiente estándar de 1,34 m x 1,34 m, cuyos marcos estructurales se fabrican alternativamente con PVC, Aluminio (sin y con RPT -rotura de puente térmico-) y madera, **usando como principales categorías de impacto: el consumo energético y las emisiones de CO₂**.

Este estudio efectúa una revisión y actualización del realizado en el año 2005 por encargo del Foro Ibérico del PVC: "*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*", realizado por el Laboratorio de Modelización Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). Este nuevo estudio se ha realizado por encargo de ASOVEN.

Se ha seguido la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, que permite evaluar los impactos ambientales potenciales de un producto a través del conjunto de etapas de su ciclo de vida (extracción y producción, montaje en el edificio, uso, reciclaje, transporte y disposición en vertedero, además de las necesidades de transporte). **Los resultados son representativos de la Península Ibérica**, tanto en lo que se refiere a los consumos como a la configuración de las fuentes energéticas. Por lo tanto, se ha priorizado la información de esta zona geográfica.

Este tipo de análisis se enmarca en lo que se conoce como economía circular, que actualmente es la principal estrategia de Europa para generar crecimiento y empleo, destinada a apoyar el cambio a una economía eficiente en el uso de los recursos y de baja emisión de carbono.

Con el fin de estimar el impacto del consumo energético y emisiones de CO₂, pero también el debido a otras categorías de impacto, y a efectos comparativos. Se ha mantenido la metodología de contabilidad ambiental de dichos indicadores basada en el concepto de ACV, que consiste en estimar las correspondientes entradas y salidas de cada una de las etapas del ciclo de vida, de la ventana en este caso. **Los resultados finales suponen la suma de los consumos de energía y de las emisiones de CO₂ equivalente para cada una de las etapas**.

El ACV se ha efectuado siguiendo las siguientes normas: UNE-EN ISO 14040 Análisis del ciclo de vida; UNE-EN ISO 10077-1 Comportamiento térmico de

ventanas, puertas y persianas. Cálculo de la transmitancia térmica; y UNE-EN 12207 2000 Permeabilidad al aire.

Se han actualizado los datos climáticos, se han usado datos del período 1981-2010, que representa una base climática de 30 años siguiendo el criterio de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). **Se seleccionaron seis zonas con diferente comportamiento climático: Barcelona, Madrid, Alicante, Bilbao, A Coruña y Huelva.** Que representan adecuadamente el espectro climático peninsular; desde un clima mediterráneo más de levante o árido, a diferentes tipos de clima atlántico, y un clima continental extremo. La variación mensual promedio de la temperatura ambiente media para España se ha obtenido mediante el promedio de 70 estaciones meteorológicas con datos disponibles (se han excluido las estaciones insulares y extrapeninsulares). Para efectuar el ACV y con el objeto de no introducir un número elevado de resultados, que no presentan diferencias significativas, este se ha efectuado únicamente para los datos climáticos promedio de España.

Entre las magnitudes básicas utilizadas se incluye **el factor de emisión de CO₂ del mix eléctrico de España correspondiente al valor medio del período de diez años 2007-2016, con un valor de 0,301 kg CO₂/kWh**, inferior en un 32% al valor del año 2002. Este cambio es debido a la evolución que ha tenido el sistema de generación de energía eléctrica en España en los últimos años, donde el peso de las energías renovables es del orden del 33%, con un porcentaje del carbón del 15%.

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

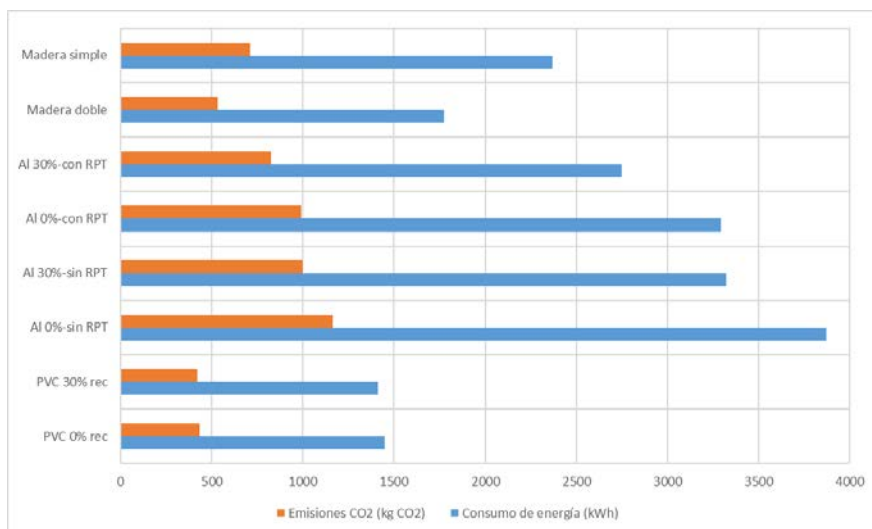
Las tipologías de ventanas analizadas, han sido los siguientes casos:

1. Ventana de PVC, con dos lunas 4/16/4, cuyo perfil no incluye PVC reciclado
2. Ventana de PVC, con dos lunas 4/16/4, cuyo perfil incluye un 30% de PVC reciclado
3. Ventana de Aluminio sin RPT, con dos lunas 4/12/4, cuyo perfil no incluye Aluminio reciclado
4. Ventana de Aluminio sin RPT, con dos lunas 4/12/4, cuyo perfil incluye un 30% de Aluminio reciclado
5. Ventana de Aluminio con RPT, con dos lunas 4/16/4, cuyo perfil no incluye Aluminio reciclado
6. Ventana de Aluminio con RPT, con dos lunas 4/16/4, cuyo perfil incluye un 30% de Aluminio reciclado
7. Ventana de madera, con dos lunas 4/12/4.

Su actualización, con respecto a las consideradas en el estudio de 2005, se debe a los nuevos requerimientos técnicos más exigentes y a la mejora que han tenido las ventanas que actualmente se están instalando, cuyos nuevos coeficientes de transmitancia térmica presentan una reducción del 14% (ventana madera 4/12/4), un 17% (ventana PVC 4/16/4) y un 26 % (ventana Aluminio 4/16/4 con RPT).

Debido a que en España hay todavía un importante parque instalado de ventana de madera con acristalamiento simple, se ha incluido esta alternativa como un octavo caso de análisis complementario.

La ventana que genera en el cómputo del ciclo de vida un menor consumo de energía y de emisión de CO₂ es la ventana de PVC con un 30% de material reciclado (1.410 kWh/año y 423 kg CO₂/año), o sin material reciclado también. Seguida de la ventana de madera con doble acristalamiento con un 26% más (1.775 kWh/año y 532 kg CO₂/año). A continuación se sitúa la ventana de Aluminio con material reciclado (30%) y con RPT con un 95% más (2.749 kWh/año y 825 kg CO₂/año), y finalmente los valores más altos corresponden a la ventana de Aluminio sin material reciclado y sin RPT con un 174% más.



Los resultados indican, que para las ventanas de PVC y madera el porcentaje más alto del consumo de energía corresponde a la etapa de uso, pero no en el caso de la ventana de Aluminio.

La etapa de extracción y producción de materiales penaliza particularmente a la ventana de Aluminio, debido a los consumos de energía necesarios para la fabricación del lingote de aluminio desde la bauxita (proceso Bayer). La ventana de madera, si bien en la fase de extracción y producción presenta los valores sustancialmente más bajos, se ve desfavorecida en la fase de uso, por sus mayores valores de permeabilidad y su necesidad de mayor mantenimiento. Los consumos de energía de esta etapa son hasta un 52% del valor total para las ventanas de Aluminio; este porcentaje es menor para las ventanas de PVC: 14% y mínimo en el caso de la ventana de madera: 4%.

Respecto al reciclaje de los materiales de las ventanas, un dato importante es la cantidad de material que se recicla, principalmente de los perfiles. En el estudio de 2005 se asumió un valor teórico potencial del 97%. El PVC ha presentado un aumento acelerado del reciclaje de distintos productos desde el año 2003 al 2016 en Europa; en 2015, se recicló del orden de 590.000 toneladas de residuos de PVC; los perfiles de ventanas y productos afines representaron alrededor del 45% del total. En el caso de Aluminio, los datos disponibles indicarían un porcentaje de reciclado del 15% en España. En el caso de las

ventanas de madera, debido a la dificultad de poder reciclar, se debe proceder a la extracción y tratamiento de madera nueva. **En el presente estudio, se ha utilizado un valor uniforme de reciclado del 30% para el PVC y el Aluminio -basado en un criterio de igualdad comparativa-**. Para los residuos de madera y restantes se ha considera su depósito en vertedero.

Las diferentes etapas de transporte favorecen a la ventana de madera frente a los otros materiales, pero su peso en el ACV no es significativo.

Se indican a continuación los cambios y ajustes principales que se han introducido respecto al informe anterior:

- Actualización en la tipología de las ventanas
- Actualización de los valores de las transmitancias térmicas
- Actualización del factor de emisión de CO₂
- Actualización en el porcentaje de reciclado de PVC y Aluminio desde un teórico 97% (2005) a un 30% (2017) mucho más real.
- Ajuste del peso de las ventanas
- Se han actualizado los datos climáticos.
- Se ha efectuado un ajuste de la terminología utilizada.
- Se han ajustado parámetros y factores menores de detalle

Se ha efectuado un segundo ACV usando la herramienta informática SimaPro (versión 8.3) y considerando todas las categorías de impacto ambiental (dieciocho), y usando la siguiente metodología de impacto: ReCiPe.

Los dos impactos más significativos han sido: cambio climático (emisión de GEI –gases de efecto invernadero-), y el agotamiento de los combustibles fósiles (consumo energético). Los resultados obtenidos con las dos metodologías ACV utilizadas han sido totalmente equivalentes.

Seguidos de toxicidad humana y radiación ionizante. Su impacto está asociado, tanto a la etapa de uso como a la obtención de las materias primas desde los recursos naturales y al consumo de electricidad desde combustibles fósiles.

La quinta categoría significativa ha sido la ocupación de suelo, especialmente de bosques, que se da únicamente en el caso de la madera. Por lo que es fundamental que la madera que se usa este asociada a una gestión sostenible de los bosques. La madera debe tener una procedencia legal y controlada.

Una consideración final importante es que es necesario realizar el análisis sobre todo el ciclo de vida, y no limitarse en exclusiva a una sola de las fases, pues los resultados deben ser analizados desde una perspectiva integrada. Esto permite valorar comparativamente el peso de cada una de las etapas en el balance completo dentro del marco de una economía circular.

De estos resultados, se hace absolutamente necesaria una actuación de información activa a los sectores involucrados, pero especialmente un plan “renove” de ventanas en España, que ayudaría a conseguir los objetivos de reducción de emisiones de GEI que la UE ha decidido con el objeto de conseguir los objetivos marcados por el Acuerdo de París.

2. El actual Cambio Climático y el Acuerdo de París

El *Acuerdo de París sobre el Cambio Climático*, firmado el 12 de diciembre de 2015 por 193 países (lo que viene a ser prácticamente todos los países del mundo) dentro de la *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (CMNUCC/UNFCCC; <http://unfccc.int>), constituye un hito en la lucha contra el actual cambio climático y es un enorme paso contra el calentamiento global. Tras más de 25 años de infructuosas negociaciones, este tratado internacional representa la voluntad de actuar de todos los países para atajar uno de los principales desafíos globales a los que se enfrenta actualmente la humanidad. El *Acuerdo de París* constituye la principal herramienta política para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y limitar así el aumento de las temperaturas globales a un máximo de 1.5-2 °C, lo que debería permitir limitar los efectos y consecuencias que el actual cambio climático implica.

Un acuerdo que contra todo pronóstico salió adelante en diciembre de 2015 y que entró en vigor el pasado 4 de noviembre de 2016, tras ser ratificado por más de 55 países representando más del 55% de las emisiones globales. Una rápida entrada en vigor que no se esperaba hasta el año 2018 como pronto, demostrando el interés y preocupación de todos los países.

La importancia de establecer una política de mitigación, es decir de reducción de las emisiones de GEI, está relacionada con el nivel de riesgo que se asume debido al actual calentamiento global:

- por la aparición de eventos meteorológicos extremos (olas de calor, cambio de los patrones de precipitación, unido a precipitaciones intensas, aumento de la intensidad de los huracanes, etc.) que causan pérdidas de vidas y graves daños en las infraestructuras y en la actividad económica.
- por la gravedad de los impactos globales y su distribución espacial y temporal, que desafía el suministro mundial de agua y de alimentos, los movimientos de migración y potencia los conflictos sociales.
- por los cambios drásticos a gran escala que pueden dispararse en un momento determinado con consecuencias totalmente imprevisibles e irreversibles (como por ejemplo la desaparición del hielo de Groenlandia, que haría subir el nivel del mar 7 metros); lo que implica la inundación de zonas costeras altamente pobladas.
- por la amenaza y afectación de sistemas y la extinción de especies (de los ecosistemas de montaña, insulares, mediterráneos, polares, etc.) incapaces de adaptarse a las nuevas condiciones climáticas, especialmente por la velocidad del cambio.
- ...

Desde el inicio de mediciones precisas y continuas de CO₂ en la atmósfera en 1958, su concentración no ha parado de crecer, a pesar de los esfuerzos y negociaciones internacionales para acordar compromisos globales de reducción dentro de la UNFCCC. En 2016 la concentración media en la atmósfera fue de 400 partes por millón (ppm), y sube a razón de más de 2 ppm al año.

El año 2016 se batieron récords muy significativos (OMM, 2017). Fue el año más cálido desde que se disponen registros, con una anomalía de 1,1°C por encima del periodo preindustrial (1850).

De acuerdo con el último informe AR5 (Fifth Assessment Report) del IPCC (Panel Intergubernamental para el Cambio Climático) (IPCC, 2013), para permanecer por debajo de los 2°C con una probabilidad del 66% deberíamos reducir las emisiones entre un 40 y un 70% a nivel mundial entre 2010 y 2050, y disminuirlas hasta un nivel nulo o negativo en 2100. Esto equivale a un escenario de 450 ppm de concentración de CO₂ a finales del siglo XXI.

Ello implica una transición energética, que es absolutamente necesaria e ineludible, que requiere una descarbonización rápida y sostenida de alrededor el 6.3% cada año, que se apoya en dos ejes fundamentales: energías renovables y eficiencia energética.

El papel de estos dos ejes de actuación no es equivalente, las energías renovables deberán jugar un papel cardinal en la producción de electricidad y la eficiencia energética en todos los procesos, pero principalmente en los que afectan a los consumos energéticos en los sectores residencial, transporte, etc. (véase la Figura 2.1).

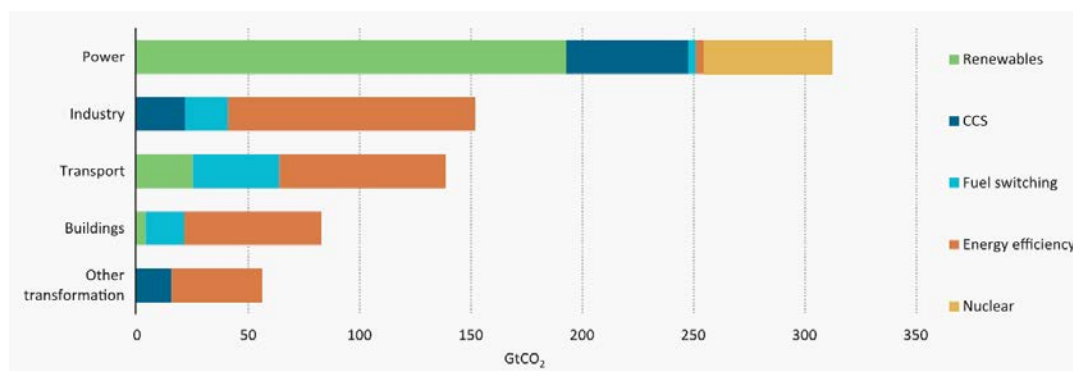


Figura 2.1 Reducción de las emisiones de CO₂ según sectores emisores y acciones potenciales de reducción (AIE, 2015)

Todos los países y todos los sectores económicos deben compartir el compromiso de la reducción de emisiones y el esfuerzo para conseguirlo, ya que se trata de un problema global. La reacción social es un elemento clave y fundamental en todo este tema. Por ello es esencial disponer de información y datos objetivos que soporten correctamente la toma de decisiones.

Las ciudades representan el 71-76 % de las emisiones de carbono de las actividades energéticas en el mundo y, por lo tanto, son un objetivo fundamental de los esfuerzos de reducción de carbono (IPCC, 2014). La reducción de la energía para calentar y refrigerar los edificios, la luz que utilizan son factores esenciales de los objetivos climáticos y del propio ciudadano. El uso de energía en las edificaciones es relevante y debe ser utilizado para desarrollar estrategias y líneas específicas al objeto de reducir el gasto energético y obtener unos mayores ahorros en todas sus vertientes.

3. Antecedentes y objetivos

La ventana, desde el punto de vista arquitectónico, es la parte de la fachada que permite la relación entre el interior y el exterior del edificio, controlando el paso de aire, ruido, luz, energía y la visión en ambos sentidos. Básicamente está formada por vidrio soportado por unos bastidores de distintos materiales, siendo los más utilizados: la madera, el PVC y el Aluminio, junto con eventuales protecciones solares. El conjunto puede permitir la apertura y el cierre de la ventana protegiendo el interior de las condiciones meteorológicas externas y de la radiación.

Las ventanas realizan una serie de funciones, entre las que se incluyen:

- ❑ Ser un elemento de unión entre el exterior y el interior de la vivienda.
- ❑ Proporcionar tanto iluminación natural, como aislamiento térmico que favorece una adecuada climatización.
- ❑ Permitir un grado adecuado de ventilación a la habitación o estancia correspondiente.
- ❑ Dar protección contra inclemencias climáticas.
- ❑ Protección contra otros factores externos como el ruido, contaminación atmosférica, insectos, etc.
- ❑ Seguridad.

Las ventanas y las puertas son el punto focal de los diseños arquitectónicos, pero también son un elemento clave del aislamiento en la superficie exterior del edificio. Aunque la eficiencia de las ventanas ha mejorado mucho, todavía representan uno de los factores energéticos clave en la construcción. Uno de los principales impactos medioambientales de las ventanas son los relacionados con su eficiencia térmica, medida en términos de intercambio energético entre el interior del edificio, donde prevalece una temperatura controlada, y el ambiente exterior.

El tipo, el tamaño, y la ubicación de las ventanas afectan enormemente los costos de calefacción y de climatización. Las ventanas presentan un grado de acristalamiento 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 en el edificio mediante un marco estructural.

En la selección de un determinado tipo de ventana normalmente se toma en consideración el material a utilizar, 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 y confort posterior.

En una casa se pierde calor:

- a través del techo

- a través de ventanas
- a través de huecos alrededor de la puerta
- a través de las paredes
- a través del piso

La mayoría del calor se pierde a través de las ventanas y el techo (véase la Figura 3.1), sin olvidar las pérdidas por ventilación. Vía las ventanas, las pérdidas de calor pueden representar entre un 15-35%.

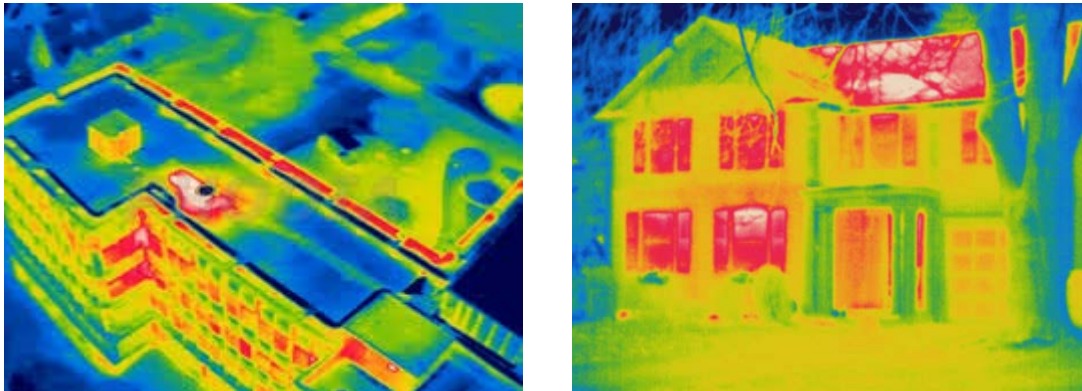


Figura 3.1 Radiografía térmica de una casa

Esta última característica es relevante en países de latitud media o alta. Donde en invierno son importantes los consumos de energía para mantener una temperatura de confort para calentar 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).

Además, el actual cambio climático, tiene entre sus múltiples consecuencias, el aumento del número y duración de las olas de calor (episodios en los que se rebasan determinados umbrales de temperaturas), las cuales afectan a la salud de las personas y provocan un aumento de la mortalidad (ISC Carlos III, 2017). Su intensidad no es uniforme, sino que depende de cada localización geográfica. España es una de las zonas geográficas donde más se observan este tipo de fenómenos. Los datos estadísticos del INE (Instituto Nacional de Estadística) indican que los equipos de aire acondicionado después del 2003 (año con una gran episodio de ola de calor) han crecido exponencialmente en España, una encuesta del año 2008 indica que el 35% de las viviendas disponen de este tipo de equipamiento. Lo que implica un aumento del gasto energético en climatización. Por lo que la mejora de los aislamientos térmicos y de los materiales utilizados deviene una cuestión capital.

Las mejores características de aislamiento térmico del sistema pared/ventana, implican un menor consumo de energía eléctrica/gas para mantener un determinado nivel de calefacción/climatización durante todo el año.

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

En cuanto a los materiales, las opciones más usadas en la actualidad son:

- **Madera**, con la ayuda de pinturas y barnices para mejorar su vida útil.
- **Aluminio**, junto a perfiles aislantes para mejorar su capacidad térmica.
- **PVC (policloruro de vinilo)**, aplicado usualmente por sí solo.

También se ha utilizado el hierro y el acero laminado, pero requieren tratamientos y un elevado mantenimiento para prevenir la corrosión, especialmente en las zonas costeras.

Tradicionalmente, la madera ha sido, por muchos años, el material utilizado para la fabricación de los marcos estructurales. El Aluminio, también es un material utilizado, llega a su punto álgido entre los 50 y los 70 del siglo XX, hasta los años 90 no aparecen los perfiles con rotura de puente térmico (RPT) que no se generalizan hasta los años 2000. En la década de 1970 aparece la ventana de PVC, su uso ha sido progresivo e importante, especialmente en países del norte de Europa. En España, durante el año 2016, el reparto de uso de materiales se sitúa: Aluminio (53%), madera (7%), PVC (37%), y otros (3%). En diferentes países europeos, el PVC tiene un uso mayoritario, como es el caso de Alemania, Francia, Reino Unido, etc.

Las implicaciones ambientales de la ventana son objeto de estudio en diferentes países. Sin embargo, debido a la complejidad del análisis, los estudios son limitados y la mayoría de ellos tienen enfoques diferenciados (Chevalier *et al.*, 2002). Estas contribuciones se focalizan principalmente 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 en una ventana de dimensiones establecidas (Asif *et al.*, 2002; Weir and Muneer, 1998)

3.1. Estudios previos en España

En abril del año 2005 se hizo público el siguiente estudio: "*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*", realizado por el Laboratorio de Modelización Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), por encargo del Foro Ibérico del PVC. Para su realización se utilizó la metodología del análisis del ciclo de vida (ACV) típico de una ventana. Referenciado también como:

Recio, J., Narvaez, R., and Gerrero, P. 2005, "Estimate of energy consumption and CO₂ emission associated with the production ,use and final disposal of PVC, aluminium and wooden windows ". Barcelona.

Desde entonces, el mismo se ha convertido en un referente internacional sobre el tema, dando lugar a otros estudios posteriores, en España se pueden mencionar, dedicados exclusivamente a las ventanas de madera:

- Enero 2009: "Madera y Cambio climático; Análisis del ciclo de vida de la madera como material alternativo", del Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco (2009). Este estudio se basa en las normas UNE-EN ISO 14044 y UNE-EN ISO 14040 para comparar las emisiones en los procesos de fabricación de una ventana utilizando madera, Aluminio o PVC.

En el mismo se indica que la ventana hecha con madera permite un ahorro del 44% en relación al PVC y del 50% comparado con el Aluminio. Y se señala que los procesos de inventario difieren notablemente en las necesidades de materia y energía. Con importantes variaciones en el peso relativo de cada una de las fases del ciclo de transformación de la madera en función del producto final y diferencias considerables en la cantidad de energía primaria y las emisiones asociadas a la producción de los diferentes productos.

- Abril 2011: "Análisis del ciclo de vida de la ventana de madera", realizado en la Universidad Politécnica de Madrid (Llorente 2011). Realiza un ACV (Análisis del ciclo de vida) de una ventana, tomando como material únicamente la madera con doble acristalamiento; basado en la norma UNE-EN ISO 14044: 2006. De los resultados se puede resaltar que, la mayor cantidad de emisiones se producen en la fase de uso y mantenimiento; así como la importancia de los distintos criterios y parámetros utilizados.

De estos estudios se puede indicar que los resultados pueden diferir sustancialmente, de acuerdo a los criterios considerados, a los factores y parámetros considerados en la realización de los mismos, aunque un patrón general de los resultados es claro.

En anexo, se incluye una recopilación de 24 estudios (incluidos los aquí comentados) sobre el ACV de una ventana, o relacionado fuertemente con este tema, que cubre el período: 1994-2017. Las características de los mismos son tanto estudios e informes como trabajos publicados en revistas técnicas y científicas

3.2. Objetivos y bases de cálculo

El objetivo básico del presente estudio es efectuar una actualización del estudio hecho en el año 2005: "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".

Se pretende actualizar los resultados obtenidos en el año 2005, así como las consecuencias que se derivan del Acuerdo de París sobre el Cambio Climático, y por las políticas de la UE al 2020 y 2030, que ya están totalmente definidas. Analizando la evolución de datos y parámetros claves, como es el mix eléctrico de generación de electricidad, su incidencia en el factor de emisión de CO₂ eq., actualización de los datos climáticos, mejora de los valores de las transmitancias térmicas de la ventanas, etc.

En este documento se realiza un análisis del consumo energético y la emisión de CO₂ atribuibles a la obtención de las materias primas, fabricación, uso, reciclaje y disposición final de ventanas cuyo marco estructural se fabrica con PVC, Aluminio o madera, es decir de su ciclo de vida.

La metodología usada ha sido el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), aunque el alcance se focaliza principalmente, pero no únicamente, en los dos factores ambientales (indicadores) señalados.

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

Los resultados pretenden ser representativos de la Península Ibérica, por lo que en el análisis efectuado se ha dado prioridad a la información y condiciones de la misma.

3.3. Contenido del documento

Se efectúa una concisa introducción a las necesidades de mitigación, de reducción de emisiones, frente al actual cambio climático, y a las actuaciones que se derivan del Acuerdo de París.

Se describen las etapas que conforman el ciclo de vida de una ventana y la metodología de trabajo utilizada, así como las hipótesis de cálculo y escenarios para el análisis comparativo. Se indican las magnitudes de los consumos energéticos, 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 analizan los resultados obtenidos identificando en orden ascendente, las alternativas con menores consumos energéticos y emisiones de CO₂.

4. Metodología

Existe un interés creciente en conocer cuál es la contribución de determinados productos en la generación y valoración de sus impactos ambientales, especialmente en el uso de recursos energéticos, y particularmente a consecuencia del actual cambio climático. Su conocimiento es fundamental, pues sirven de guía para usar dichos productos durante todas las etapas de su ciclo de vida, no centrándose únicamente en la fase de uso (aunque esta sea muy importante), que permita tener una visión integrada de las implicaciones que se derivan de todas las etapas y con una visión “*de la cuna a la cuna*”, y en consecuencia mejorar el proceso de toma de decisiones y el desempeño ambiental de nuestras actividades.

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una metodología empleada en el estudio del ciclo de vida de un producto, y puede definirse como un proceso que permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando el uso de la materia y de la energía utilizadas: “entradas”, así como las emisiones o los vertidos al entorno: “salidas”; para determinar el impacto del uso de dichos recursos y de las emisiones o vertidos, con el fin de evaluar sus impactos en las diferentes categorías de impacto ambiental, y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental asociados con el sistema que es evaluado.

El ACV aborda los aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, lo cual comprende las actividades de extracción y adquisición de la materia prima, la producción, transporte y distribución, utilización, reciclado y por último la disposición final.

Los impactos asociados con los productos, ya sean manufacturados o consumidos, son de gran relevancia, pues algunos contribuyen al cambio climático, a la contaminación de los ecosistemas, a la sobre-explotación de recursos renovables y no renovables, y al mal uso de los recursos disponibles.

La sostenibilidad de los recursos naturales y un desarrollo económico ajustado a la realidad, dependen de las acciones que se tomen para disminuir el impacto de los procesos productivos y de la optimización de los mismos.

El uso de una metodología de tipo ACV permite evaluar los impactos ambientales potenciales de un producto a través de su ciclo de vida. Las normas que dictan los requisitos y directrices del estudio son la ISO 14040 y la ISO 14044 (Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices.).

En un ACV se evalúa el impacto potencial de cada proceso y etapa productiva realizando las siguientes actividades:

- Recopilar un inventario de las entradas y salidas más importantes del sistema de un producto,
- Evaluar el impacto ambiental potencial asociado a esas entradas y salidas,

- Interpretar los resultados del análisis del inventario y las etapas evaluadas en conformidad con los objetivos del estudio.

La norma ISO 14044 es utilizada para evaluar el ciclo de vida de los productos, generando los requisitos y directrices para llevar a cabo la evaluación, en las cuáles se incluyen:

- La definición del objetivo.
- La definición del alcance del ciclo de vida.
- El análisis del inventario del ciclo de vida.
- La interpretación de la información y examen crítico del ciclo de vida.
- Las posibles limitaciones en el ciclo.
- Las fases del ciclo de vida que están relacionadas.
- Las opciones de valor y elementos que son opcionales.

Se debe conocer que la norma ISO14044 define los objetivos y el alcance que debe tener la aplicación prevista en los resultados del ACV.

Un ACV se realiza en 4 fases que generalmente están interrelacionadas.

1. *Definición del objetivo y el alcance*: comienza con la declaración del objetivo y el alcance del estudio, que incluye el modo en que los resultados se pretenden comunicar. El objetivo y el alcance deben ser coherentes e incluir información técnica, siendo básica la definición de la unidad funcional, es decir el desempeño cuantificado del sistema de producto para su uso como unidad de referencia. Es necesario definir también otros elementos como los límites del sistema y las hipótesis empleadas.
2. *Inventario del ciclo de vida (ICV)*: En el análisis del inventario se recopilan y cuantifican las entradas y salidas (flujos) y los resultados de un sistema del producto durante su ciclo de vida. Los datos se refieren a la unidad funcional definida anteriormente.
3. *Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)*: La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida busca evaluar la importancia potencial de los impactos. Esta fase contiene habitualmente los siguientes elementos obligatorios:
 - selección de las categorías de impacto, los indicadores de categoría y los modelos de caracterización;
 - clasificación: asignación de resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas; y

- medición del impacto (caracterización): cálculo de los resultados de indicadores de categoría.

Además de los elementos básicos, es posible incluir algunos adicionales como: normalización; agrupación; ponderación; y análisis de la calidad de los datos.

4. *Interpretación del ciclo de vida*: la interpretación del ciclo de vida es una técnica sistemática para identificar, cuantificar, comprobar y evaluar la información de los resultados del ICV y/o de la EICV. Esta fase incluye los siguientes elementos:

- identificación de los asuntos significativos basados en los resultados del ICV y la EICV;
- una evaluación del estudio que considere su integridad, sensibilidad y coherencia;
- conclusiones, limitaciones y recomendaciones.

Este tipo de análisis es complejo, ya que los impactos pueden ser presentados en muchas categorías de impacto a nivel midpoint, lo cual da más robustez a los resultados o en endpoint, lo cual simplifica los resultados en menos categorías pero con menor robustez. Los nombres y número de las categorías de impacto pueden variar dependiendo del método seleccionado. Entre las categorías de impacto midpoint más comunes están: Cambio Climático, Agotamiento de Ozono, Acidificación, Eutrofización, Formación de Foto-oxidantes, Toxicidad humana, Ecotoxicidad, agotamiento de recursos abióticos y uso de suelo entre otras. Esta complejidad es la que ha provocado el desarrollo de herramientas informáticas que facilitan el análisis a la hora de realizar los cálculos, utilizar bases de datos extensas, siguiendo una metodología estricta.

En este estudio se ha utilizado la herramienta informática **SimaPro** (www.simapro.es), que presenta completas y variadas bases de datos, y métodos, con los que compara y analiza complejos productos a partir del inventario de materiales y procesos.

Este tipo de análisis se enmarca en lo que actualmente se conoce como **economía circular** (véase la Figura 4.1). Que es un concepto económico que se interrelaciona con el desarrollo sostenible, y cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos (materias primas, energía, etc.) se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y que se reduzca al mínimo el consumo de recursos y la generación de residuos. Se trata de implementar una nueva economía, de tipo circular -no lineal-, basada en el principio de «cerrar el ciclo de vida» de los productos, los servicios, los residuos, los materiales, la energía, el agua, etc.

En la Unión Europea, la economía circular es la base de «*Una Europa que utilice eficazmente los recursos*», así mismo, es actualmente la principal estrategia de Europa para generar crecimiento y empleo. Esta iniciativa pretende crear un

marco político destinado a apoyar el cambio a una economía eficiente en el uso de los recursos y de baja emisión de carbono que nos ayude a:

- mejorar los resultados económicos al tiempo que se reduce el uso de los recursos;
- identificar y crear nuevas oportunidades de crecimiento económico e impulsar la innovación y la competitividad de la UE;
- garantizar la seguridad del suministro de recursos esenciales;
- luchar contra el cambio climático y limitar los impactos medioambientales del uso de los recursos.



Figura 4.1 Gráfico que ilustra el concepto de Economía circular

5. El ciclo de vida de una ventana

La metodología empleada de ACV se basa en un procedimiento de contabilidad ambiental de consumos y emisiones en el que se han estimado las entradas y salidas en cada una de las etapas del ciclo de vida de una ventana fabricada con PVC, Aluminio o madera. Los resultados finales suponen la suma de los consumos y las emisiones de para cada una de las etapas, la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta el ciclo de vida típico de una ventana, y que responde al concepto de economía circular:

1. Extracción de recursos y producción de las materias primas
2. Transporte a construcción de la ventana
3. Obtención de los elementos y construcción de la ventana
4. Transporte a edificio
5. Montaje de la ventana
6. Uso de la ventana (es la etapa más larga)
7. Desconstrucción: la ventana ya no está en uso y se traslada al centro de reciclaje
8. Transporte al centro de reciclaje
9. Centro de reciclaje
10. Transporte a reutilización
11. Transporte a vertedero
12. Disposición en vertedero

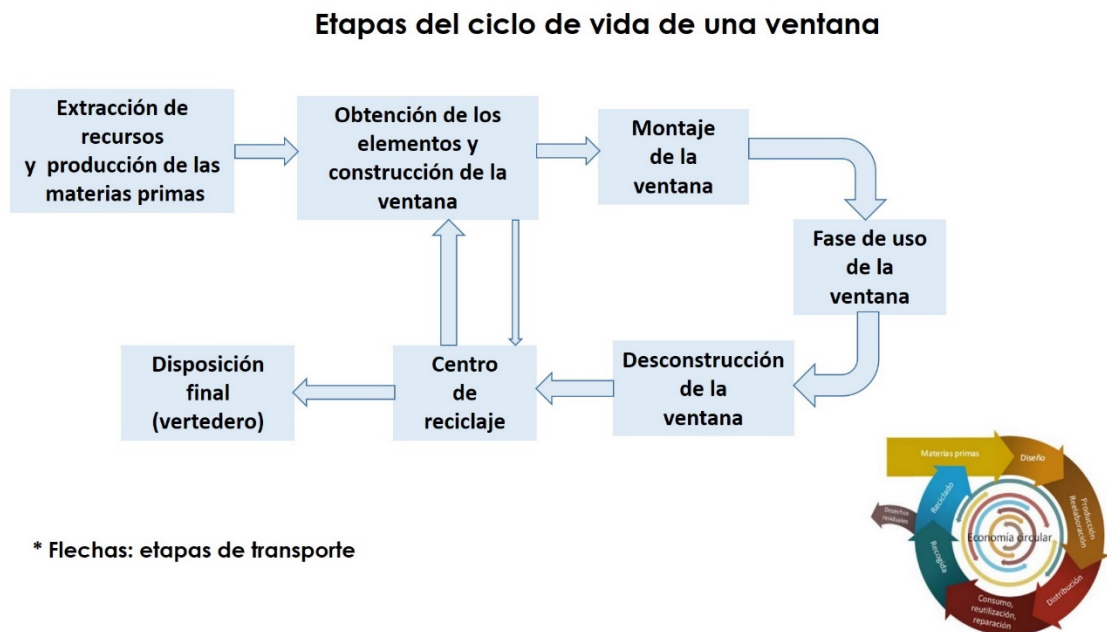


Figura 5.1 El ciclo de vida de una ventana

La primera etapa comprende la fase de extracción de materias primas:

- bauxita como mineral básico, más sosa, cal y criolita en el caso del Aluminio para la obtención de Aluminio metálico
- cloro que deriva de sal (57%)-electricidad y de etileno (43%) que deriva del petróleo para la obtención de la gresca de polímero de PVC (cloruro de polivinilo), más aditivos: plastificantes y estabilizantes.
- extracción de la madera de los bosques, como materia prima, hasta la obtención de tablones, como material para ser trabajado (tala, poda, transporte, descortezado, tronzado, secado y cepillado)

La segunda etapa se divide, primero en la obtención de los correspondientes perfiles, con su composición y forma; y segundo la construcción específica de la ventana: corte y mecanización de los perfiles, ensamble, soldadura y armado. En función del material, la producción de los perfiles estructurales de la ventana puede presentar etapas particulares. La materia prima se somete a un proceso de extrusión por medio del cual se elabora el perfil propiamente dicho; que se envía a la zona de montaje, en donde se ensambla con los demás elementos (lunas de vidrio, acero de refuerzo, juntas de estanqueidad, herrajes y cerrajería).

La tercera etapa se corresponde con su montaje en la obra del edificio.

La cuarta etapa es el uso de la ventana, siendo su duración temporal la más larga. 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 periodos de vida más cortos, siendo necesario la aplicación de capas protectoras (barniz, pintura) una vez cada 5 años. En este estudio, se asumirá que todas las ventanas tienen una vida útil de 50 años (al objeto de mantener los factores comparativos uniformes), y que su mantenimiento se ha efectuado sistemáticamente.

Una vez que termina el período de uso de la ventana, se debe proceder a su desconstrucción y el correspondiente traslado a un centro de reciclaje. La fracción no reciclable se envía a un centro de gestión final de residuos. La opción escogida ha sido la de vertedero controlado (aunque otras opciones en el caso de la madera serían también factibles), dado que es la opción más utilizada.

6. Bases de cálculo para la estimación del consumo de energía y de la emisión de CO₂ atribuible a una ventana

6.1. 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.

6.2. 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

6.3. 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 12 mm ó 16 mm (de 6 mm ó 12 mm; estudio de 2005), en función de la ventana. Que conforman la evolución en la tipología de ventanas que se están actualmente instalando.

6.4. Tipología de las ventanas analizadas

En los últimos años ha habido un proceso de mejora importante de la tipología y materiales utilizados, referente a las ventanas a instalar nuevas o a renovar. La siguiente lista con los casos considerados responde a dicho cambio.

Se analizan los siguientes casos:

- 1) Ventana de PVC, con dos lunas 4/16/4, cuyo perfil estructural no incluye PVC reciclado
- 2) Ventana de PVC, con dos lunas 4/16/4, cuyo perfil estructural incluye un 30% de PVC reciclado
- 3) Ventana de Aluminio sin rotura térmica, con dos lunas 4/12/4, cuyo perfil estructural no incluye Aluminio reciclado
- 4) Ventana de Aluminio sin rotura térmica, con dos lunas 4/12/4, cuyo perfil estructural incluye un 30% de Aluminio reciclado
- 5) Ventana de Aluminio con rotura térmica, con dos lunas 4/16/4, cuyo perfil estructural no incluye Aluminio reciclado
- 6) Ventana de Aluminio con rotura térmica, con dos lunas 4/16/4, cuyo perfil estructural incluye un 30% de Aluminio reciclado
- 7) Ventana de madera, con dos lunas 4/12/4.

El mantener un octavo caso: ventana de madera con una simple luna; responde a la realidad del parque instalado de este tipo ventana todavía en uso en la zona de estudio. En España, el uso de ventanas de madera con dos lunas es limitado en el parque instalado. Su conocimiento es básico para evaluar las consecuencias de no promover la renovación del actual parque instalado.

6.5. La extracción y producción de materiales

Comprende la extracción de los recursos naturales básicos y la energía requerida para ello, transporte hasta la fábrica y la producción de los materiales que se utilizan en la ventana: primero el lingote de Aluminio, la grana de PVC y los tabloncillos de madera; para posteriormente obtener los correspondientes perfiles 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 para 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 los otros materiales corresponden a la producción de acero, vidrio, Aluminio y madera.

Para el acero se ha asumido 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, el 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 (100 km) y secado. La información del consumo de extracción y secado de la madera proviene de la base de datos Ecoinvent. 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 6.1.

Tabla 6.1 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

6.6. El montaje de la ventana

Para las ventanas elaboradas con perfiles de PVC se ha asumido 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 todos los tipos de ventanas. Para el montaje de todas las ventanas, se considera que la energía utilizada es eléctrica.

6.7. El uso de la ventana

Para la estimación del consumo energético en la etapa de uso, se considera una habitación de análisis con una ventana ubicada en una pared exterior. Sus dimensiones se indican en la Figura 6.1. 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 10,8 m² (4 m x 2,7 m), correspondiendo 1,80 m² a la ventana propiamente dicha (1,34 m x 1,34 m); es decir un 17 %.

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

- 1) Aumentar (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.

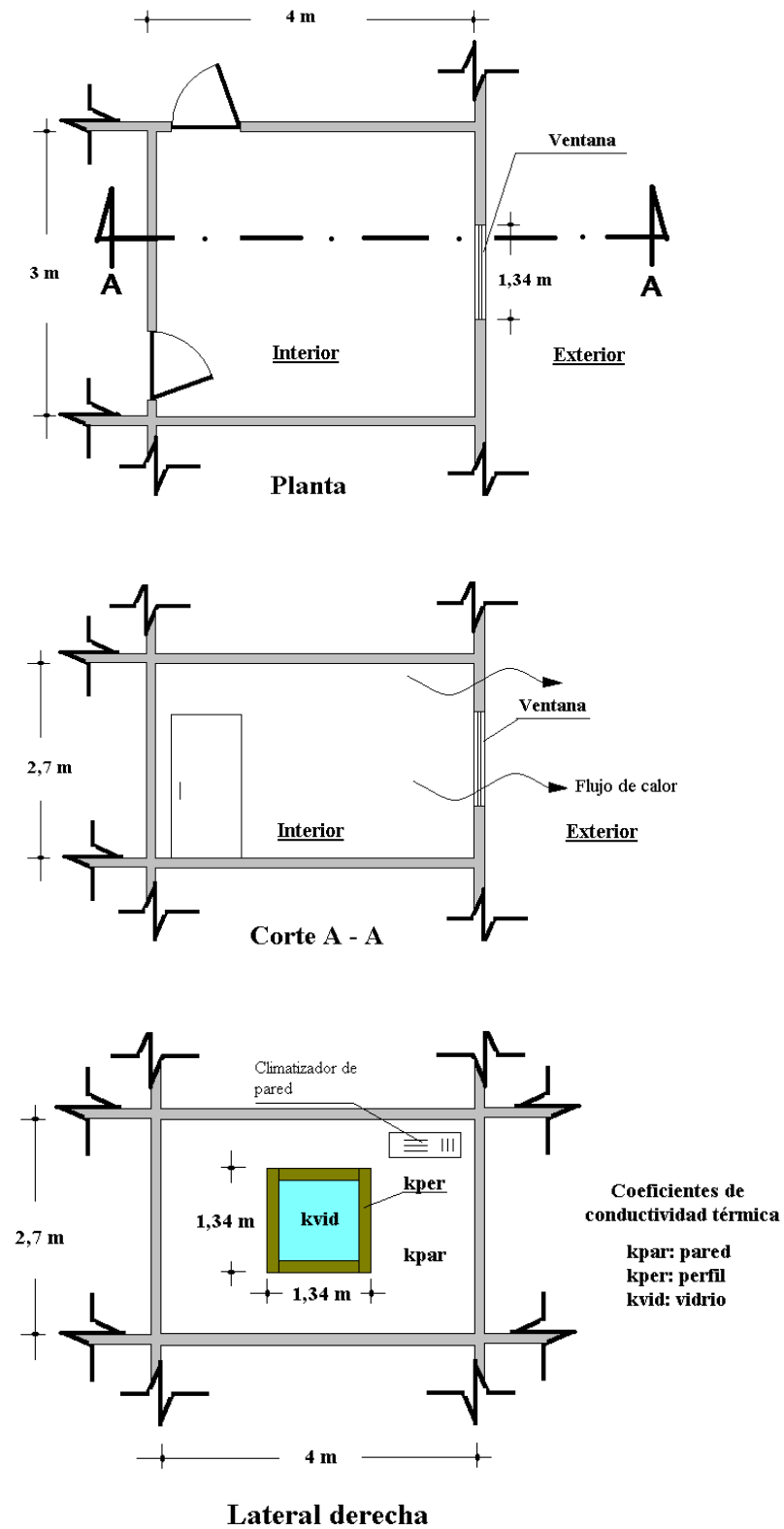


Figura 6.1 Dimensiones de la ventana y habitación de análisis

Para simplificar el análisis, se ha considerado que 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.

Los consumos eléctricos mensuales para elevar o reducir la temperatura interior del volumen aire de la habitación (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.

Para la estimación del consumo total en la etapa de uso de las ventanas, se utiliza un período general de 50 años. Aunque, no hay un acuerdo unánime sobre los años de duración de uso de una ventana, y además, variando en función del material; este valor es ampliamente aceptado. En el caso de la ventana de madera, para su conservación se recomienda un barnizado típicamente cada 5 años.

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 ha asumido un valor de 3 (2,6 en el estudio del 2005).

6.8. Transmitancia térmica del sistema pared/ventana

Para la definición de los coeficientes de transmitancia/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 6.2.

Tabla 6.2 Áreas del sistema pared/ventana

Componente	m ²	%
Área de pared (A_{par})	9,0	88,3
Área de perfil (A_{per})	0,5	4,6
Área de vidrio (A_{vid})	1,3	12,0
Total:	10,8	100

Se ha efectuado una revisión de los coeficientes de transmitancia térmica. Los valores se obtuvieron del Código Técnico de la Edificación (MFOM; 2004) (véase la Tabla 6.3), mediante lo indicado en la norma UNE-EN ISO 10077 (Comportamiento térmico de ventanas, puertas y persianas. Cálculo de la transmitancia térmica) de acuerdo a la tipología y características de las ventanas consideradas, puede observarse, que los nuevos coeficientes representan una reducción de su capacidad de transmisión térmica, que hay que valorarlo en positivo, entre un 12 % (ventana madera con doble vidrio) y un 50 % (ventana Aluminio con RPT).

Además, se ha efectuado una amplia revisión de valores de transmitancia térmica de diferentes fuentes documentales. Con el objeto de revisar este parámetro, que es clave en el funcionamiento de la ventana.

El valor de los coeficientes integrados del sistema pared/ventana ($U_{\text{pared/ventana}}$) que se indican en la Tabla 6.3 se deducen mediante la ecuación 1.

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

Tabla 6.3 Coeficientes de transmitancia térmica ($\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$)

Estudio 2005, CTE 2003		Estudio 2017, UNE-EN ISO 10077		% reducción
PVC 4-12-4 (Kpvc):	2,0	PVC 4-16-4 (Kpvc):	1,5	-25%
Aluminio sin RPT 4-6-4 (Kal):	5,9	Aluminio sin RPT 4-12-4 (Kal):	3,5	-40%
Aluminio con RPT 4-12-4 (Kal):	4	Aluminio con RPT 4-16-4 (Kal):	2	-50%
Madera simple (Kmad):	3,1	Madera simple (Kmad):	3,1	0%
Madera doble 4-6-4 (Kmad):	2,5	Madera doble 4-12-4 (Kmad):	2	-20%
Vidrio simple (Kvid):	5,9	Vidrio simple (Kvid):	5,7	-3%
Vidrio doble (Kvid):	3,3	Vidrio doble 4-12-4 (Kvid):	2,9	-12%

Señalar, que se ha considerado que la transmitancia 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 y emisiones asociados exclusivamente a la ventana.

Los nuevos coeficientes representan una reducción de transmisión térmica entre un 14% (ventana madera doble) y un 26 % (ventana Aluminio con RPT) (véase la Tabla 6.4).

Tabla 6.4 Coeficientes de transmitancia térmica ($U_{\text{pared/ventana}}$) del sistema pared/ventana ($\text{Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$)

	2005	2017	% reducción
PVC 4-16-4	0,65	0,54	-17%
Aluminio sin RPT 4-12-4	0,89	0,68	-24%
Aluminio con RPT 4-16-4	0,77	0,57	-26%
Madera doble-claro 4-12-4	0,68	0,59	-14%
Madera simple-claro 4	1,14	1,10	-3%

6.9. Temperatura ambiental exterior

A fin de estimar la demanda energética en diferentes zonas de España, se han utilizado datos meteorológicos de España para un período climatológico de 30 años, que es lo que tiene definido la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para definir el clima de un determinado período de tiempo.

Para ello se han utilizado datos de la Guía resumida del clima (AEMET, Agencia Estatal de Meteorología) para el período de 1981-2010. Se seleccionaron seis zonas con diferentes rangos climáticos, como puede verse en la Figura 6.2: Barcelona, Madrid, Alicante, Bilbao A Coruña y Huelva. Que representan adecuadamente el espectro climático peninsular. Desde un clima mediterráneo más de levante o árido, a diferentes tipos de clima atlántico, y aun clima continental extremo.

En la Figura 4.3, se puede observar la variación mensual de la temperaturas ambiente media de las seis zonas seleccionadas y el promedio de España (azul suave), y su rango de variación según las diferentes zonas. La variación mensual de la temperaturas ambiente media para España se ha obtenido mediante el promedio de las 70 estaciones meteorológicas con datos disponibles (se han excluido las estaciones insulares y extrapeninsulares).

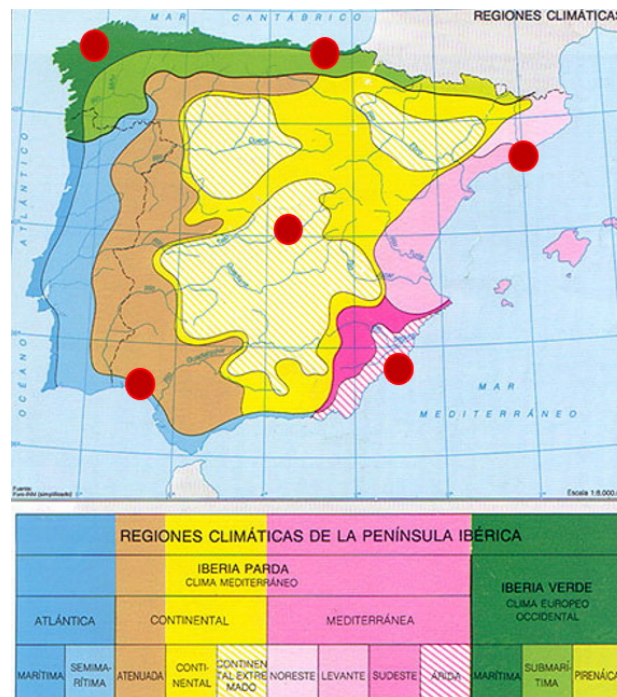


Figura 6.2 Zonas climáticas seleccionadas de España

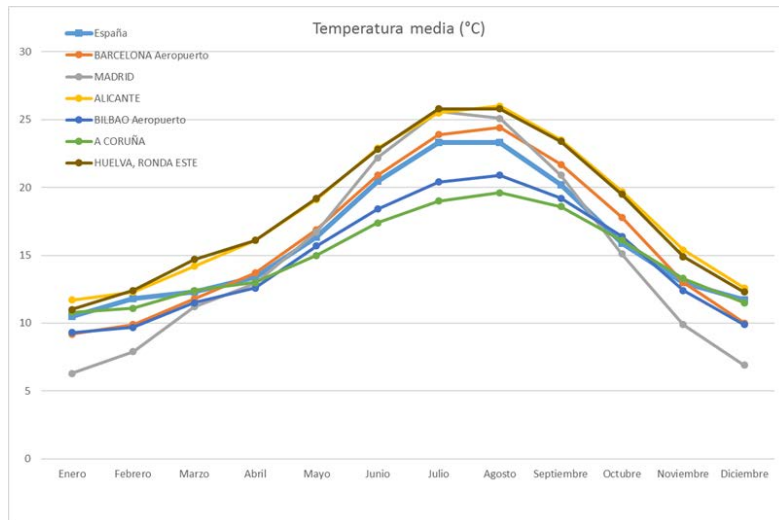


Figura 6.3 Variación mensual de la temperatura media del aire de las seis zonas seleccionadas de España y el promedio de España (azul suave)

6.10. Estimación de las pérdidas por permeabilidad al aire

La permeabilidad al aire tiene una gran importancia, porque influye en la temperatura de las habitaciones y, por tanto, en el correspondiente nivel de confort. Para las zonas de estudio se estiman las pérdidas por permeabilidad al aire mediante las ventanas. La permeabilidad al aire es la propiedad de una ventana cerrada 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 las ventanas se ha estimado según la clasificación de ventanas en cuatro tipos que establece la norma UNE-EN 12207:2000 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 RPT se clasifican como Clase 4, mientras que las ventanas de madera y las de Aluminio sin RPT 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 RPT, mientras que dicho coeficiente se incrementa hasta 7,0 m³/h m² en los escenarios que implican ventanas de madera y de Aluminio sin RPT.

6.11. 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.

No obstante, es una etapa fundamental, pues permite la recuperación de los materiales después de la etapa de uso, y es básica para permitir el reciclaje de los mismos, como puede observarse en la Figura 6.4, y poder avanzar en el camino de una economía circular.



Figura 6.4 Material acumulado para el reciclaje de perfiles de PVC (izquierda) y Aluminio (derecha)

6.12. El reciclaje

Un dato importante es la cantidad de material que se recicla, principalmente de los perfiles. En el estudio de 2005 se asumió un valor teórico potencial del 97%. En la Figura 6.5 se puede ver el aumento acelerado de distintos productos de PVC desde el año 2003 al 2016 en Europa. En 2015, se recicló del orden de 590.000 toneladas de residuos de PVC, una tendencia al alza del reciclado de la que los perfiles de ventanas y productos afines que representaron alrededor del 45% del total.

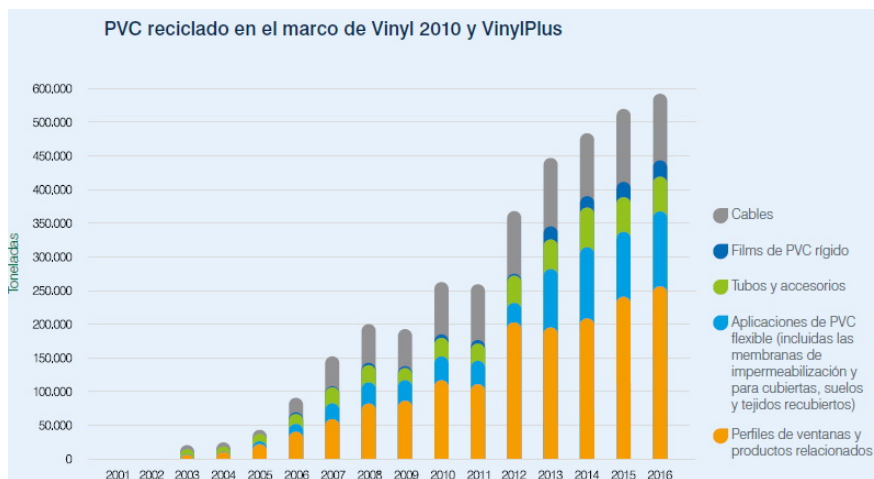


Figura 6.5 Reciclaje de PVC en Europa (Fuente: 2017 VinylPlus Progress Report year 2016)

En el presente estudio, se ha utilizado un porcentaje de reciclado del 30% del PVC, como cantidad disponible de residuos reciclables. En el caso de Aluminio, los datos disponibles indicarían un porcentaje de reciclado del 15% en España.

No obstante, se ha utilizado un valor uniforme de reciclado del 30% para el PVC, el Aluminio y el vidrio contenidos en la ventana que son actualmente reciclados -basado en un criterio de igualdad comparativa-. Los residuos de madera y el restante constituyen residuos que se depositan 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 respectivos documentos BREF europeos. Para la madera, se considera que en su totalidad se dispone en vertedero.

6.13. 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, ya que es el combustible usado en la maquinaria utilizada en dicho tipo de instalación.

6.14. 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 en Europa Occidental.

Se consideró un recorrido medio uniforme 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.

6.15. Factores de emisión de CO₂

El factor de emisión de CO₂ debido a la producción de electricidad no tiene un valor constante, sino que depende del "mix eléctrico" que se refiere a la combinación de las diferentes fuentes de energía (carbón, nuclear, gas natural, hidráulica, eólica, solar, etc.) que cubren el suministro eléctrico de un país.

El mix eléctrico es el valor que expresa las emisiones de CO₂ asociadas a la generación de la electricidad que se consume, y se convierte así, en un indicador de las fuentes energéticas que se han empleado para producir electricidad en un territorio y en un período de tiempo determinado. Cuanto

más bajo es su valor, mayor es la contribución de las fuentes energéticas bajas en carbono.

La electricidad que se consume en la España peninsular proviene de la red eléctrica peninsular, sin poder distinguir exactamente en qué planta de generación de electricidad se ha producido. Por tanto los datos que se utilizan para el cálculo del mix eléctrico, son los que corresponden a la red eléctrica peninsular española.

El mix eléctrico publicado por la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) estima la información referente al origen de la electricidad y a la emisión de CO₂ de todas las compañías comercializadoras que participan en el Sistema de Garantías de Origen.

En la Figura 6.6 se ha representado la evolución temporal en el último período de diez años: 2007-2016 del factor de emisión de CO₂ en España de acuerdo a la información publicada por la Comisión Nacional de Energía (CNE), que representa un valor promedio para dicho período de 0,301 kg CO₂/kWh. Su tendencia deriva del mix eléctrico español cuya evolución con la contribución de las diferentes fuentes se ha representado en la Figura 6.7. En el estudio de 2005, se usó el factor de emisión del año 2002 con un valor de 0,443 kg CO₂/kWh, lo que implica una disminución del 32%.

En el caso de un combustible específico (gasóleo, gas natural, etc.), su factor de emisión depende específicamente del % de C que el mismo contiene.

La Tabla 6.5 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.

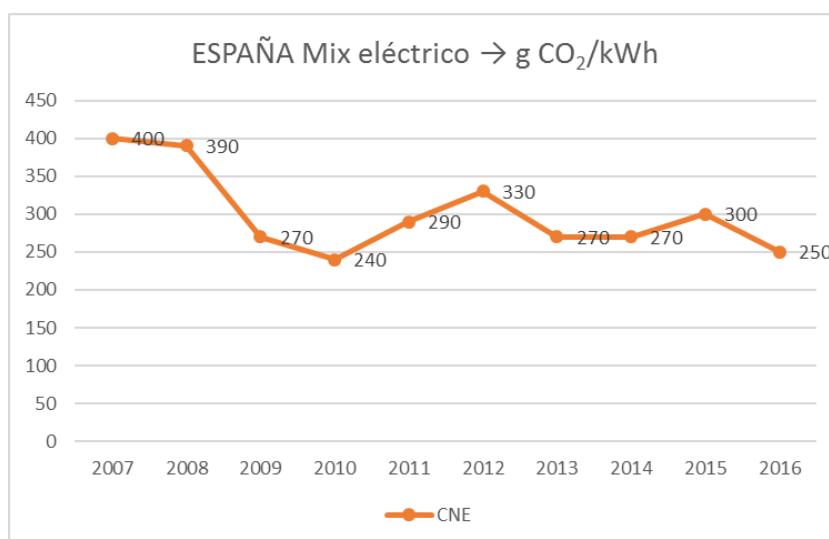


Figura 6.6 Evolución en el período 2007-2016 del factor de emisión de CO₂ en España

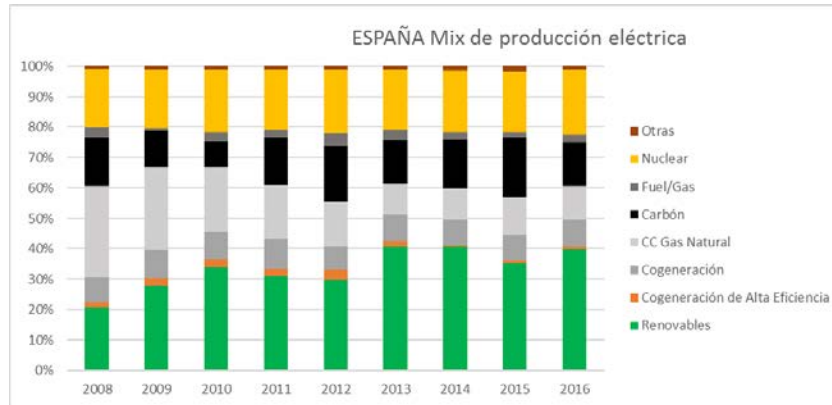


Figura 6.7 Evolución en el período 2007-2016 del mix eléctrico español

Tabla 6.5 Factores de emisión de CO₂

Fuente de energía / combustible	Factor de emisión		
	t C TJ ⁻¹ (IPCC, 1996)	t CO ₂ TJ ⁻¹	kg CO ₂ /kWh
Mix eléctrico español			0,301
Gasóleo / fuelóleo	20,2	74,1	0,267
Gas natural	15,3	56,1	0,202
Carbón (hulla)	26,2	96,1	0,346

7. Resultados y análisis comparativo

7.1. Estimación del consumo de energía y emisión de CO₂ en la etapa de uso

Para las seis zonas geográficas seleccionadas más el promedio de España, se han calculado las diferencias entre la temperatura de confort en el interior de la habitación (22 °C) y las temperaturas medias mensuales. Las diferencias positivas indican necesidad de calefacción, en tanto que diferencias negativas implican necesidad de climatización.

En la Tabla 7.1 se resumen los consumos eléctricos expresados en kWh anuales requeridos para cubrir los requerimientos de calefacción y climatización para cada zona climática seleccionada y por tipo de ventana, y también las emisiones de CO₂ correspondientes. Sus valores están representados en las Figuras 7.1 y 7.2.

Con respecto a las tipologías de las ventanas consideradas, la de PVC y Aluminio con RPT presentan los mejores resultados con ligera ventaja para la ventana de PVC; en segundo nivel se sitúan la ventana de madera con doble cristal ligeramente mejor que la de Aluminio sin RPT, y finalmente con una diferencia significativa la ventana de madera simple. Estos resultados vienen condicionados por las diferencias entre los distintos coeficientes de transmitancia térmica y la permeabilidad, que penaliza particularmente a las ventanas de madera.

Se puede observar que las diferencias geográficas no presentan ninguna sorpresa. En consecuencia, para efectuar el ACV y con el objeto de no introducir un número elevado de resultados, que no exhiben diferencias significativas, el ACV se ha efectuado únicamente para los datos climáticos promedio de España.

Tabla 7.1 Cálculo de la energía eléctrica anual requerida para calefacción y climatización y emisiones de CO₂ asociadas.

	España promedio	Barcelona	Madrid	Alicante	Bilbao	A Coruña	Huelva
Consumo anual kWh							
PVC 4-16-4	22,8	23,5	28,7	18,4	25,0	23,6	18,7
Aluminio sin RPT 4-12-4	35,1	36,2	44,2	29,5	39,9	39,3	29,9
Aluminio con RPT 4-16-4	23,6	24,3	29,7	19,8	26,8	26,4	20,1
Madera doble-claro 4-12-4	32,8	33,8	41,3	27,6	37,3	36,7	28,0
Madera simple-claro 4	45,7	47,1	57,6	38,4	52,0	51,1	39,0
kg CO₂ anuales							
PVC 4-16-4	6,9	7,1	8,6	5,5	7,5	7,1	5,6
Aluminio sin RPT 4-12-4	10,6	10,9	13,3	8,9	12,0	11,8	9,0
Aluminio con RPT 4-16-4	7,1	7,3	8,9	6,0	8,1	7,9	6,1
Madera doble-claro 4-12-4	9,9	10,2	12,4	8,3	11,2	11,1	8,4
Madera simple-claro 4	13,8	14,2	17,3	11,6	15,6	15,4	11,7

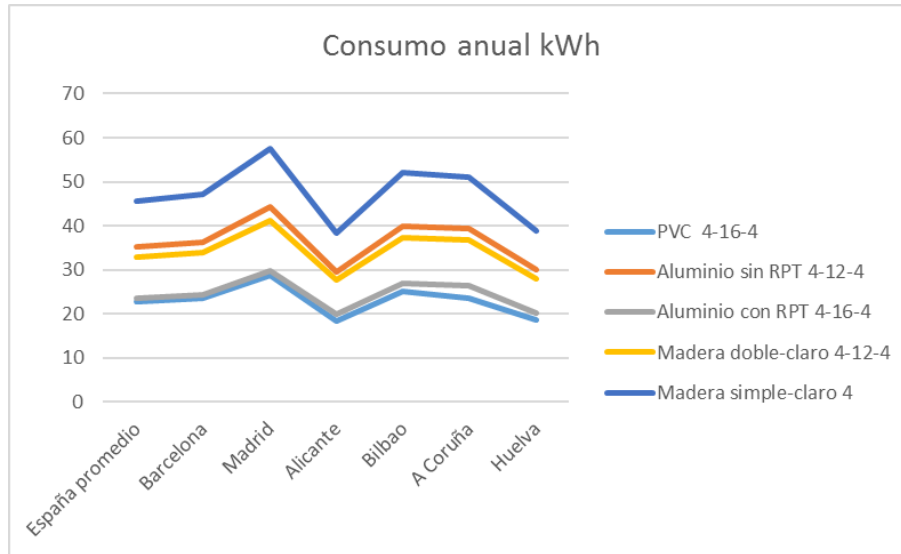


Figura 7.1 Energía eléctrica anual requerida para calefacción y climatización

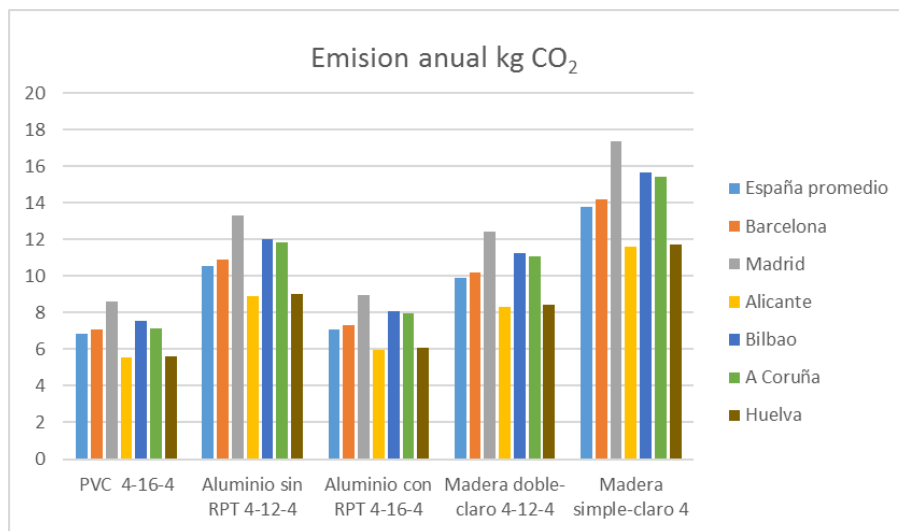


Figura 7.2 Emisiones en base anual de CO₂ asociadas

Los menores consumos eléctricos anuales se presentan para las zonas de Alicante y Huelva (18,4 y 18,7 kWh a⁻¹ ventana de PVC, respectivamente); en tanto que los valores más altos ocurren en Madrid (28,7 kWh a⁻¹, ventana de PVC). Valores intermedios se presentan para la zona del Barcelona, A Coruña y Bilbao.

Las emisiones anuales de CO₂, calculadas mediante la aplicación del factor de emisión del mix de generación eléctrico español (0,301 kg CO₂ kWh⁻¹), en orden creciente, y para el caso de la ventana de PVC, las emisiones ascienden de 5,5 kg CO₂ a⁻¹ para Alicante a 8,6 kg CO₂ a⁻¹ para Madrid.

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

El análisis que a continuación se presenta, se efectúa sobre los resultados obtenidos al aplicar la metodología ACV a las diferentes etapas del ciclo de vida de una ventana, y que toma como referencia los datos climáticos denominados España promedio (período climático: 1981-2010, y promedio de 70 estaciones meteorológicas de la España peninsular).

En la Tabla 7.2 y Tabla 7.3 se resume la información obtenida para las diferentes tipologías de ventanas consideradas y analizadas, referidas al consumo de energía (kWh ventana⁻¹) y la emisión de CO₂ (kg CO₂ ventana⁻¹) asociada a cada etapa del ciclo de vida. Sus valores están representados en las Figuras 7.3 y 7.4.

Se observa fácilmente que las tres etapas que son realmente significativas, pero especialmente las dos primeras, son:

1. Extracción y producción
2. Uso
3. Reciclaje

Presentando el conjunto del resto de etapas una significancia muy menor, con consumos de energía inferiores a 6,5 kWh y la emisión de CO₂ inferior a 1,7 kg CO₂ en cada una de ellas.

Tabla 7.2 ACV consumo de energía de cada etapa y porcentaje respectivo (kWh/año).

Consumo de energía (kWh)	PVC 4-16-4 0%rec	PVC 4-16-4 30%	Al 4-12-4 0%rec	Al 4-12-4 30%rec	Al 4-16-4 0%rec	Al 4-16-4 30%rec	Madera 4-12-4	Madera simple
Extracción y producción	252,8	212,8	1991,7	1445,9	1991,7	1445,9	87,4	52,2
Transporte	4,0	4,0	5,1	5,1	5,1	5,1	3,0	2,1
Montaje	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
Transporte	4,0	4,0	5,1	5,1	5,1	5,1	3,0	2,1
Uso	1140,0	1140,0	1755,0	1755,0	1180,0	1180,0	1644,2	2289,2
Transporte	2,4	2,4	3,1	3,1	3,1	3,1	2,2	1,6
Disposición final	5,1	5,1	6,5	6,5	6,5	6,5	4,7	3,5
Transporte	4,0	4,0	5,1	5,1	5,1	5,1	3,0	2,1
Reciclaje	33,3	33,3	93,0	93,0	93,0	93,0	22,9	12,4
TOTAL	1450	1410	3869	3324	3294	2749	1775	2370
Extracción y producción	17,4%	15,1%	51,5%	43,5%	60,5%	52,6%	4,9%	2,2%
Transporte	0,3%	0,3%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,1%
Montaje	0,3%	0,3%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,3%	0,2%
Transporte	0,3%	0,3%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,1%
Uso	78,6%	80,8%	45,4%	52,8%	35,8%	42,9%	92,6%	96,6%
Transporte	0,2%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
Disposición final	0,4%	0,4%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,3%	0,1%
Transporte	0,3%	0,3%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,1%
Reciclaje	2,3%	2,4%	2,4%	2,8%	2,8%	3,4%	1,3%	0,5%
TOTAL	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

En la etapa de extracción y producción de materiales los mayores consumos de energía, en orden decreciente, corresponde el más elevado a la ventana de Aluminio (1.446 kWh para ventanas con 30% de Aluminio reciclado y 1.992 kWh para el caso de no incluir material reciclado); la ventana de PVC (213 kWh y 253

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 (87 kWh) y la ventana de madera con acristalamiento simple (52 kWh).

Lógicamente, en esta etapa del ciclo de vida la cual presenta el menor consumo de energía es la ventana de madera (con porcentajes entre 2,2-4,9%), como producto natural, que se deben únicamente a las acciones de obtención de la madera desde el bosque hasta convertirla en tablones.

Para el Aluminio (con porcentajes entre 43-60%), se debe al alto consumo energético necesario para pasar desde el mineral base: Bauxita hasta obtener un lingote de Aluminio metal, es en esta etapa donde este material se ve claramente penalizado.

Los valores para el PVC (con porcentajes entre 15-17%) hay que entenderlo en que es el plástico con menor contenido de Carbono.

Tabla 7.3 ACV emisión de CO₂ de cada etapa y porcentaje respectivo (kg CO₂/año).

Emisiones CO ₂ (kg CO ₂)	PVC 4-16-4 0%rec	PVC 4-16-4 30%rec	Al 4-12-4 0%rec	Al 4-12-4 30%rec	Al 4-16-4 0%rec	Al 4-16-4 30%rec	Madera 4-12-4	Madera simple
Extracción y producción	74,5	63,1	598,4	434,1	598,4	434,1	24,9	14,8
Transporte	1,1	1,1	1,4	1,4	1,4	1,4	0,8	0,6
Montaje	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Transporte	1,1	1,1	1,4	1,4	1,4	1,4	0,8	0,6
Uso	343,1	343,1	528,3	528,3	355,2	355,2	494,9	689,0
Transporte	0,6	0,6	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,4
Disposición final	1,4	1,4	1,7	1,7	1,7	1,7	1,3	0,9
Transporte	1,1	1,1	1,4	1,4	1,4	1,4	0,8	0,6
Reciclaje	10,2	10,2	27,7	27,7	27,7	27,7	6,6	3,6
TOTAL	435	423	1162	998	989	825	532	712
Extracción y producción	17,1%	14,9%	51,5%	43,5%	60,5%	52,6%	4,7%	2,1%
Transporte	0,2%	0,3%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,2%	0,1%
Montaje	0,3%	0,3%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,3%	0,2%
Transporte	0,2%	0,3%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,2%	0,1%
Uso	79,0%	81,1%	45,4%	52,9%	35,9%	43,0%	93,0%	96,8%
Transporte	0,1%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
Disposición final	0,3%	0,3%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,1%
Transporte	0,2%	0,3%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,2%	0,1%
Reciclaje	2,4%	2,4%	2,4%	2,8%	2,8%	3,4%	1,2%	0,5%
TOTAL	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Los consumos energéticos de la fase de uso se refieren al uso de electricidad para compensar los flujos térmicos (-/+) a través de la ventana. En todos los casos se observa que esta es la etapa que presenta los valores más altos de consumo y emisión. 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 una 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.

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 ($U_{pared/ventana}$ 1,14 W m⁻² °C⁻¹), aunque menor consumo energético en la etapa de extracción y producción de materiales implica que en los resultados globales 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%).

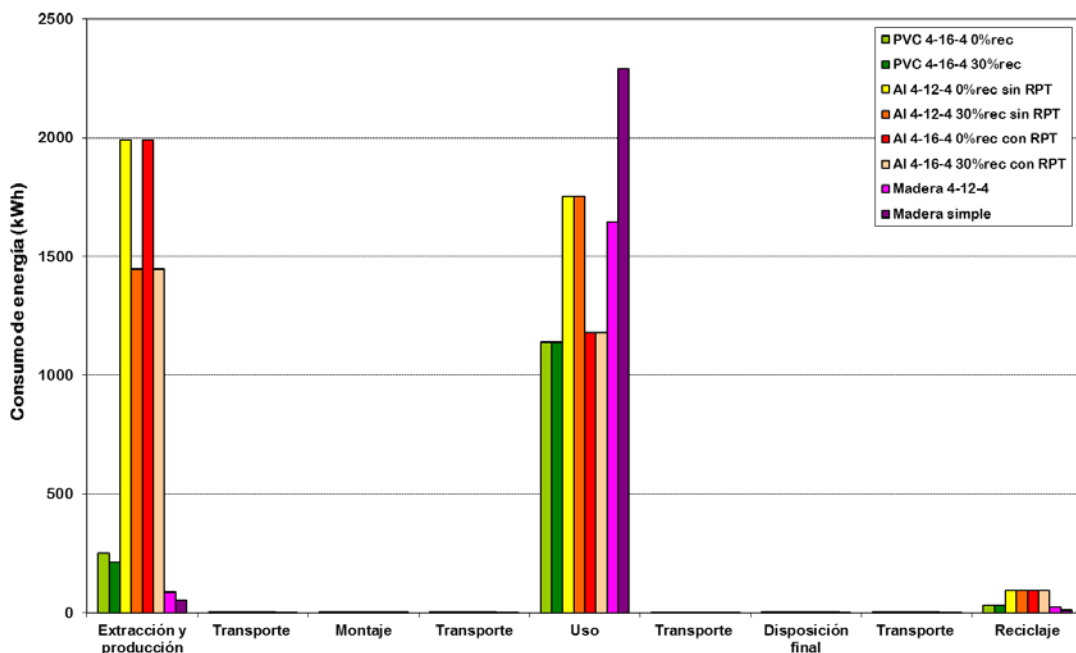


Figura 7.3 Consumo de energía (kWh) asociada a cada etapa del ciclo de vida

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 RPT y 1.935 kg CO₂ para el caso de ventana de Aluminio sin RPT).

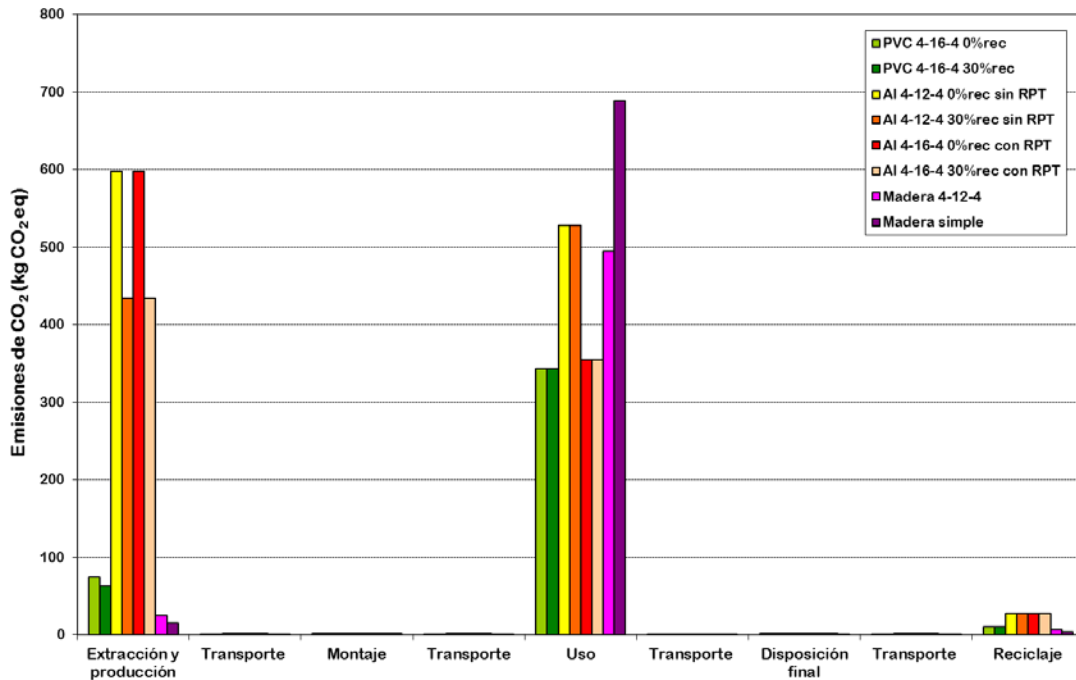


Figura 7.4 Emisión de CO₂ (kg CO₂) asociada a cada etapa del ciclo de vida

7.3. Análisis y discusión de los resultados del ACV utilizando la herramienta SimaPro

Un segundo análisis de ACV, a efectos de complementariedad y comparación, se ha efectuado usando la herramienta informática SimaPro (versión 8.3), que permite modelar y analizar el ciclo de vida de un producto o servicio siguiendo las recomendaciones de la serie ISO 14040; y utilizando la base de datos Ecoinvent.

La metodología de evaluación de impactos utilizada ha sido ReCiPe (A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level): midpoint hierarchist, por sus características (Goedkoop et al. 2013). En base a la norma UNE-EN 14042 se han incluido todas las categorías de impacto aprobadas internacionalmente, sin excluir ninguna.

En la Tabla 7.4, se muestran los resultados de caracterización para cada una de las alternativas de las ventanas consideradas y la contribución asociada a cada una de las dieciocho categorías de impacto consideradas.

Tabla 7.4 Contribución asociada a cada categoría de impacto ambiental y a cada tipo de material de ventana analizado.

CATEGORÍAS DE IMPACTO	PVC 0% rec	PVC 30% rec	Al 0%-sin RPT	Al 30%-sin RPT	Al 0%-con RPT	Al 30%-con RPT	Madera doble	Madera simple
Cambio climático	474,0	447,8	979,2	882,4	809,0	712,2	638,0	830,4
Disminución capa Ozono	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Acidificación	2,9	2,7	5,6	5,1	4,6	4,1	4,1	5,3
Eutrofización agua dulce	0,1	0,1	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Eutrofización marina	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Toxicidad humana	146,5	139,3	390,2	328,6	339,0	277,4	184,8	244,3
Fotoquímica	1,6	1,5	3,0	2,7	2,5	2,2	3,9	4,5
Material particulado	1,1	1,1	2,2	2,0	1,8	1,7	1,7	2,1
Ecotoxicidad terrestre	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1
Ecotoxicidad agua dulce	6,2	6,0	14,8	12,8	12,7	10,7	8,1	10,5
Ecotoxicidad marina	5,8	5,7	14,0	12,1	12,0	10,1	7,6	9,9
Radiación ionizante	169,0	168,9	328,7	300,0	254,6	225,8	224,3	307,4
Ocupación suelo	30,1	30,1	57,4	55,8	42,9	41,4	13299,1	13318,1
Ocupación suelo urbano	3,5	3,5	8,4	7,8	7,2	6,6	703,0	704,4
Transformación suelo natural	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	9,7	9,7
Agotamiento del agua	2,2	1,9	14,0	10,4	13,0	9,4	6,8	8,0
Agotamiento de metales	40,2	40,2	51,9	49,0	45,9	43,0	45,3	50,9
Agotamiento comb. fósiles	128,4	120,9	246,3	225,9	198,7	178,4	186,9	240,7

Del análisis de los resultado, se puede ver claramente que solo cinco categoría de impacto ambiental son realmente significativas de acuerdo con los materiales y procesos asociados, las categorías de impacto que tienen efectos significativos, son:

- Cambio climático (Emisión de GEI, kg CO₂ eq.)
- Toxicidad humana (kg 1,4-DB eq.)
- Radiación ionizante (kBq U235 eq.)
- Ocupación y transformación del suelo (m²)
- Agotamiento de los combustibles fósiles (kg oil eq.)

Los resultados para categorías de impacto ambiental significativas se presentan en la Figura 7.5 según los tipos de ventanas. Debe tenerse en consideración que cada indicador es independiente.

Los resultados muestran que las ventanas de Aluminio tienen un mayor impacto en las categorías de cambio climático, toxicidad humana y radiación ionizante; mientras que las ventanas de madera conllevan un gran impacto en ocupación de suelo (su fuente natural) y los impactos en cambio climático y agotamiento de combustibles fósiles son similares a los que presentan las alternativas de Aluminio (ello se debe a la etapa de uso de la ventana). Las ventanas de PVC presentan los menores impactos en todas las categorías de impacto seleccionadas.

La categoría más significativa e importante es la categoría de cambio climático, seguida del agotamiento de los combustibles fósiles (que es totalmente dependiente del mix eléctrico específico que se utilice en cada zona geográfica para la producción de electricidad), seguidas de la toxicidad humana y la radiación ionizante.

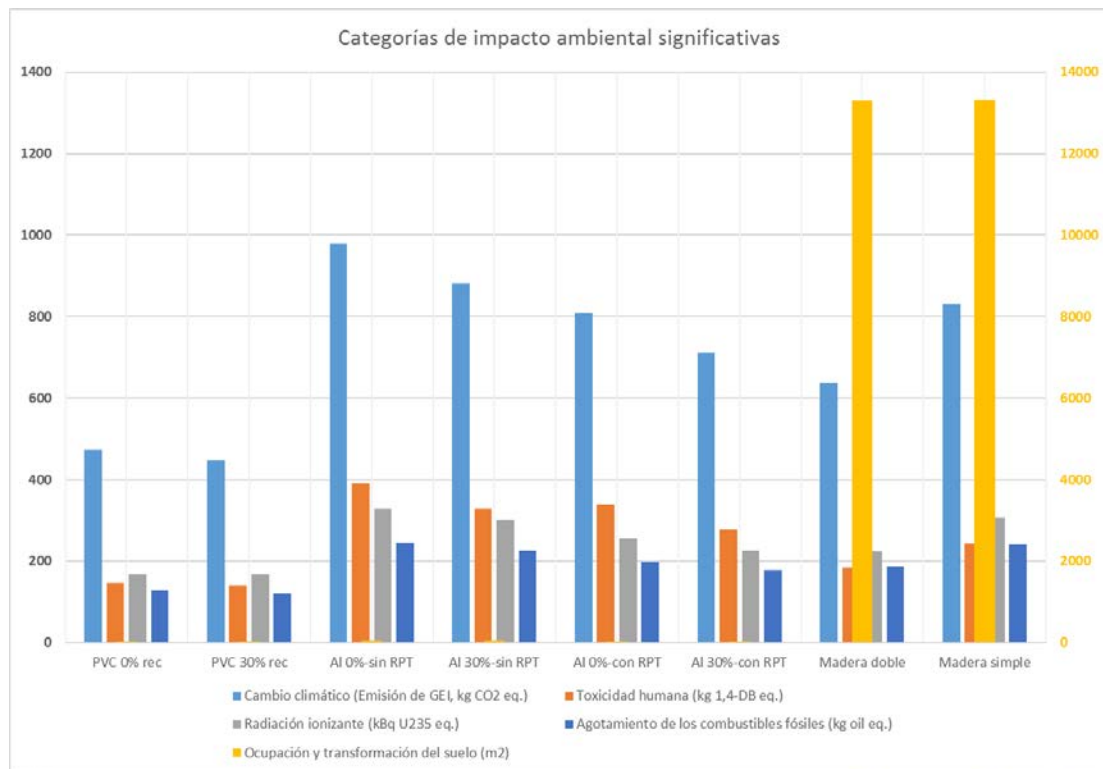


Figura 7.5 Comparación de los tipos de ventanas según las categorías de impacto ambiental significativas .

Los resultados de la categoría de impacto de cambio climático se presentan en la Figura 7.6 para cada tipos de ventana de acuerdo a las diferentes etapas del ciclo de vida.

Especialmente para el caso de Aluminio, el impacto de cambio climático está asociado no únicamente a la etapa de uso; sino también, a las emisiones debidas a la obtención de las materias primas desde los recursos naturales, como puede verse además (en la dirección opuesta) en el impacto de su reciclaje. Con respecto a la fase de uso, la ventana de PVC es la que muestra un impacto menor.

El agotamiento de recursos fósiles se refiere a los recursos que contienen hidrocarburos (carbón, petróleo y gas natural). En la se muestran los resultados para todas las alternativas en todas sus etapas del ciclo de vida en la Figura 7.7.

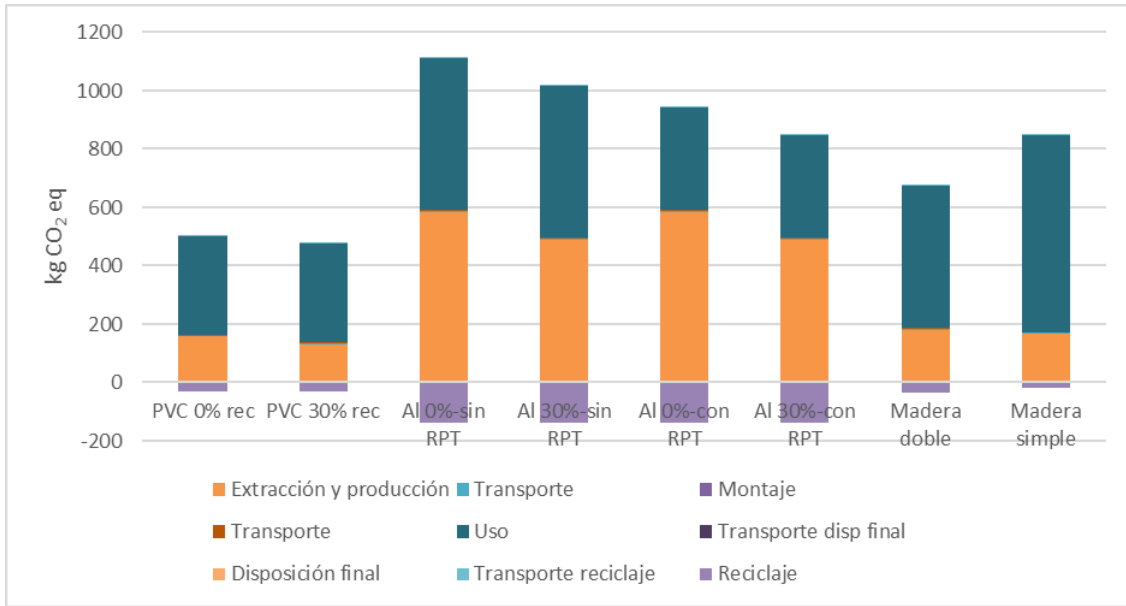


Figura 7.6 Resultados de ReCiPe para la categoría de impacto: cambio climático

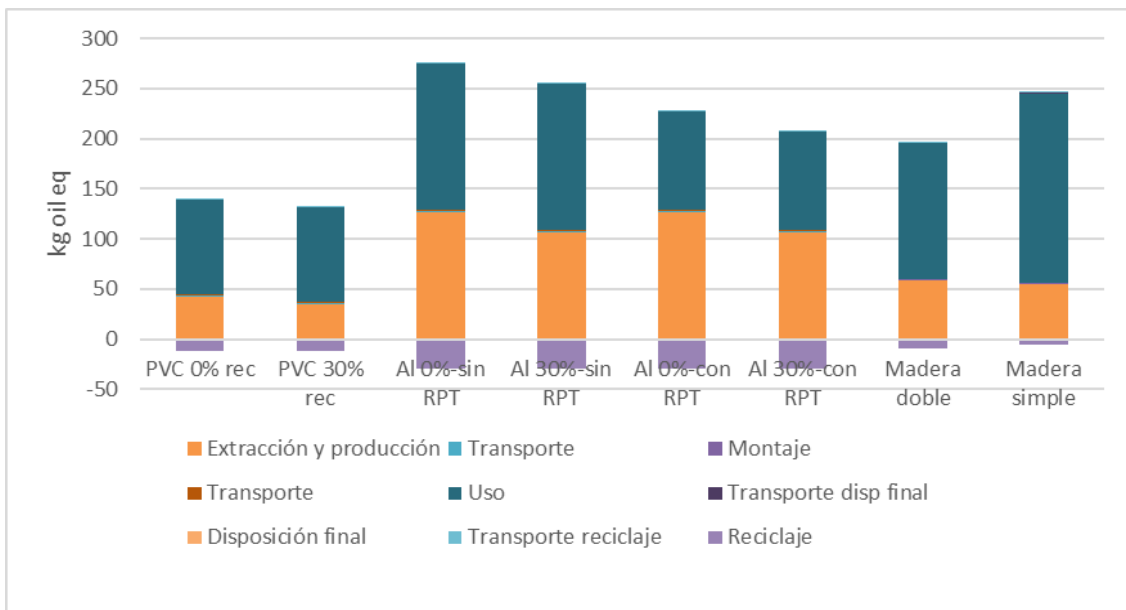


Figura 7.7 Resultados de ReCiPe para la categoría de impacto: Agotamiento de combustibles fósiles

Los resultados muestran claramente que la mayor parte del impacto proviene de la etapa de uso, es decir, del consumo de energía eléctrica; seguida de la etapa de obtención del material. En las alternativas de PVC y madera este impacto va desde el 72% al 78%, mientras que en las alternativas de aluminio el impacto durante la etapa de uso representa entre el 49% y 64% (debido a la

necesidad energética del proceso de obtención de la materia prima desde el mineral).

Puede observarse la similitud de la respuesta del impacto de las dos categorías: cambio climático y agotamiento de combustibles fósiles (necesidades energéticas).

Además, los resultados obtenidos con las dos metodologías ACV utilizadas han sido totalmente equivalentes.

La toxicidad humana hace referencia a la emisión de sustancias y partículas que pueden generar enfermedades en la salud humana (respiratorios, cancerígenos, alergias, etc.). Es decir la persistencia (el destino) ambiental y la acumulación en la cadena alimentaria humana (exposición), y la toxicidad (efecto) de un producto químico. El destino y los factores de exposición se calculan mediante un modelo "evaluativo" del destino multimedia y modelos de exposición, mientras que los factores de efecto se derivan de los datos de toxicidad en seres humanos y animales de laboratorio. Asociado al conjunto de los diferentes productos usados esencialmente como aditivos en los diferentes materiales. Los resultados se muestran en la Figura 7.8 para cada una de las alternativas y sus etapas de ciclo de vida.

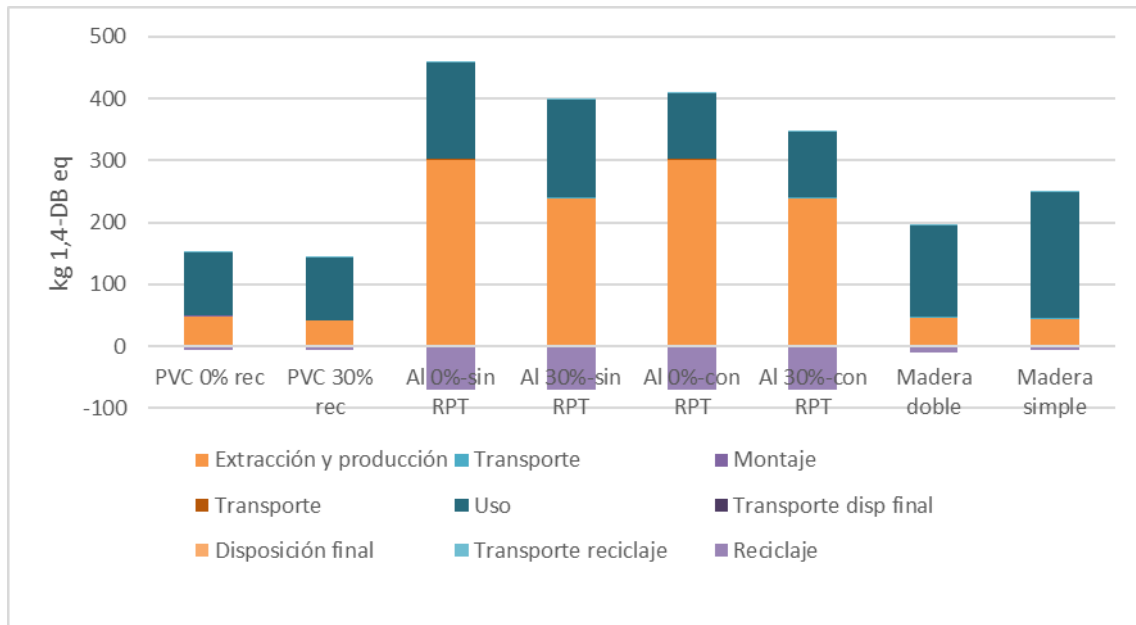


Figura 7.8 Resultados de ReCiPe para la categoría de impacto: toxicidad humana

Los resultados muestran que una parte importante del impacto en toxicidad humana se debe a la etapa de uso, es decir, al consumo de energía eléctrica y por lo tanto dependiente del mix eléctrico considerado. La otra parte del impacto está asociada a la producción de materiales y en las alternativas de Aluminio este impacto representa entre el 72% y el 88% del impacto en toxicidad

humana mientras que en el caso de PVC y madera es el consumo de energía eléctrica que se lleva estos porcentajes de impacto.

La radiación ionizante hace referencia a los daños a la salud humana relacionados con las emisiones rutinarias de material radiactivo al medio ambiente. Principalmente en la producción de energía eléctrica mediante centrales nucleares. En consecuencia, de nuevo, asociado al sistema de producción de electricidad. Además, de estar asociado a los materiales radioactivos naturales (NORM por sus siglas en inglés) como son:

- La minería y fundición de metales
- Industria de fosfatos (fertilizantes)
- industria del carbón (minería y combustión)
- Industria del petróleo y del gas (producción)
- Industria de la construcción
- Reciclaje

Los resultados para la categoría de impacto de radiación ionizante, se presenta en la Figura 7.9 para todas las alternativas y sus etapas de ciclo de vida.

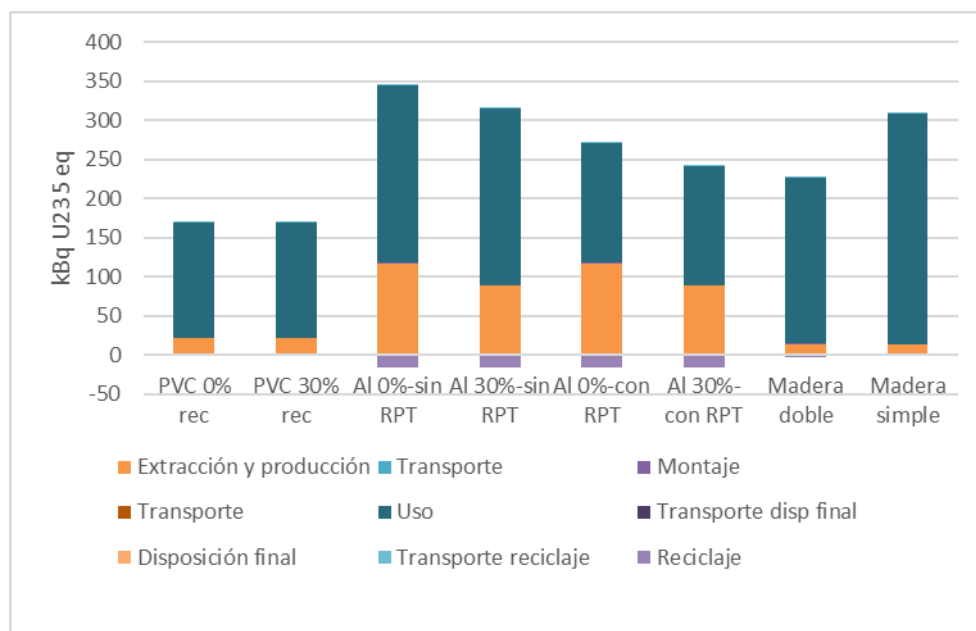


Figura 7.9 Resultados de ReCiPe para la categoría de impacto: radiación ionizante

Se puede ver como el mayor impacto de radiación ionizante se debe al consumo de energía eléctrica durante la etapa de uso en todas las alternativas. En las alternativas de PVC y madera entre un 4% y 12% se debe a la extracción y producción de metales (acero y cerrajería de acero). Por otro lado, en las alternativas de Aluminio el impacto durante la etapa de extracción y producción de materiales puede ir desde el 35% hasta el 46%.

La categoría de impacto debido a la ocupación de suelo refleja el daño a los ecosistemas a causa de los efectos de la ocupación y uso del suelo. Aunque existen muchos vínculos entre la forma en que se utiliza el suelo y la pérdida de biodiversidad, ésta categoría se concentra en la ocupación de una cierta superficie de suelo durante un determinado tiempo. Los resultados de ocupación de suelo se presentan en la Figura 7.10.

Se observa claramente que este tipo de impacto está asociado a las ventanas de madera; y cómo el impacto de esta categoría es casi nulo en el caso de PVC y Aluminio.

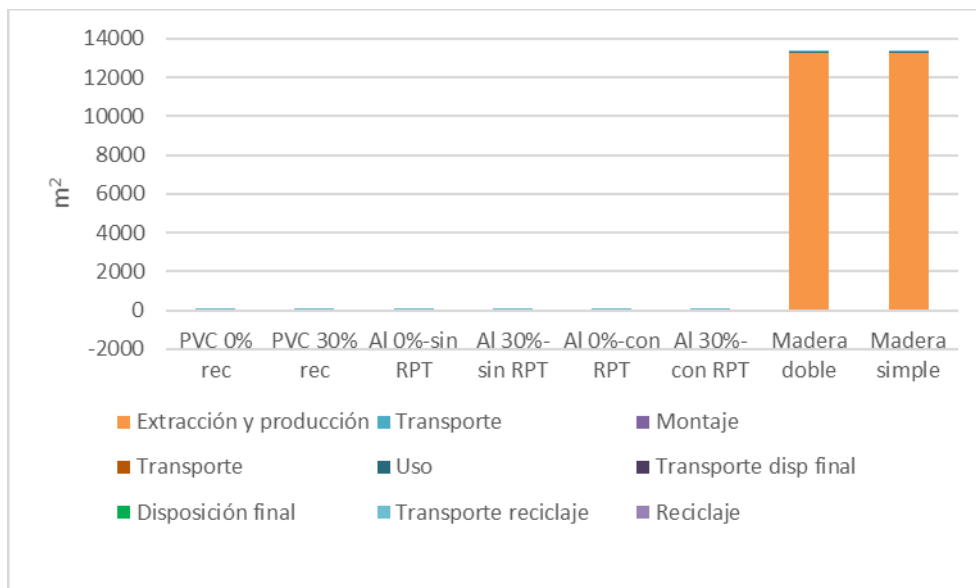


Figura 7.10 Resultados de ReCiPe para la categoría de impacto: ocupación de suelo.

Estos resultados se deben a que el sistema considera la madera como material neutro desde la perspectiva ambiental. Pero, en cambio, si hay la afectación específica a la ocupación y transformación de suelo, especialmente de bosques. Por lo que es fundamental que la madera que se usa esté asociada a una gestión sostenible de los bosques. La madera debe tener una procedencia legal y controlada.

8. Conclusiones

Se ha realizado un Análisis del Ciclo de Vida de 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 RPT) y madera, y valorándose también la opción de ser fabricados los perfiles con un 30% de material reciclado. Focalizado especialmente en las dos siguientes categorías de impacto ambiental: consumo energético y emisiones de CO₂ asociadas a la producción, uso, reciclaje y disposición final de los residuos.

Debido a que en España hay un parque importante de ventanas de madera con acristalamiento simple instalado, se ha incluido esta alternativa como un octavo caso de análisis complementario.

Se ha buscado que los resultados sean representativos para la Península Ibérica, tanto en lo que se refiere a los consumos y a 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. Así como, a la representatividad climática de la misma (30 años de datos meteorológicos de 70 estaciones meteorológicas peninsulares).

Entre los factores básicos es clave la emisión de CO₂ del mix eléctrico de España, se ha utilizado el valor medio del período de diez años 2007-2016, con un valor de 0,301 kg CO₂/kWh (0,443 en el año 2002). Este cambio es debido a la evolución que ha tenido el sistema de generación de energía eléctrica en España en los últimos años, donde el peso de las energías renovables es del orden del 33%, pero todavía con un porcentaje de carbón del 15%.

Respecto a las tipologías de las ventanas analizadas, su actualización, con respecto a las consideradas en el estudio de 2005, se debe a los nuevos requerimientos técnicos más exigentes y a la mejora que han tenido las ventanas que actualmente se están instalando, cuyos nuevos coeficientes de transmitancia térmica presentan una reducción del 14% (ventana madera 4/12/4), un 17% (ventana PVC 4/16/4) y un 26 % (ventana Aluminio 4/16/4 con RPT).

La ventana que genera en su del ciclo de vida un menor consumo de energía y de emisión de CO₂ es la ventana de PVC con un 30% de material reciclado (1.410 kWh/año y 423 kg CO₂/año), y sin material reciclado también. Seguida de la ventana de madera con doble acristalamiento con un 26% más (1.775 kWh/año y 532 kg CO₂/año). A continuación se sitúa la ventana de Aluminio con material reciclado (30%) y con RPT con un 95% más (2.749 kWh/año y 825 kg CO₂/año), y finalmente los valores más altos corresponden a la ventana de Aluminio sin material reciclado y sin RPT con un 174% más.

Los resultados obtenidos indican, que para las ventanas de PVC y madera el porcentaje más alto del consumo de energía corresponde a la etapa de uso de la ventana (se ha considerado un período uniforme de uso de 50 años), pero no en el caso de la ventana de Aluminio.

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 mínimo en el caso de la ventana de madera (4%). Es en esta etapa del ciclo de vida donde la ventana de Aluminio está penalizada, debido a los consumos de energía necesarios a la fabricación del lingote de aluminio desde la bauxita (proceso Bayer).

La ventana de madera, si bien en la fase de extracción y producción presenta valores sustancialmente más bajos, se ve desfavorecida en la fase de uso, por sus mayores valores de permeabilidad y su necesidad de un mayor mantenimiento.

Respecto al reciclaje de los materiales de las ventanas, un dato importante es la cantidad de material que se recicla, principalmente los perfiles. En el estudio de 2005 se asumió un valor teórico potencial del 97%. El PVC ha tenido un aumento acelerado del reciclaje de distintos productos desde el año 2003 al 2016 en Europa; en 2015, se recicló del orden de 590.000 toneladas de residuos de PVC, una tendencia al alza del reciclado de la que los perfiles de ventanas y productos afines que representaron alrededor del 45% del total. En el caso de Aluminio, los datos disponibles indicarían un porcentaje de reciclado del 15% en España. En el caso de las ventanas de madera, debido a la dificultad de poder reciclar, se debe proceder a la extracción y tratamiento de madera nueva. En el presente estudio, se ha utilizado un valor uniforme de reciclado del 30% para el PVC, el Aluminio y el vidrio contenidos en la ventana que son actualmente reciclados -basado en un criterio de igualdad comparativa-. Los residuos de madera y restantes materiales se ha considerado su depósito en vertedero.

La reducción del consumo energético y de las emisiones de CO₂, con respecto a los valores del estudio de 2005, se deben principalmente a las siguientes causas:

1. Mejora de las características de las ventanas que actualmente se están instalando,
2. Mejora del factor de emisión de CO₂ del mix eléctrico de España correspondiente al valor medio del período de diez años 2007-2016.
3. Con una reducción del consumo energético promedio entre el 12-19%; y de emisión de CO₂ entre el 40-42%.

Además, se ha efectuado un segundo ACV usando la herramienta informática SimaPro (versión 8.3) y considerando todas las categorías de impacto ambiental (dieciocho), la metodología de impacto utilizada ha sido ReCiPe.

Los dos impactos más significativos han sido: cambio climático (emisión de GEI), y el agotamiento de los combustibles fósiles (Consumo energético). Observándose una respuesta de impacto similar de estas dos categorías. Además, los resultados obtenidos con las dos metodologías ACV utilizadas han sido totalmente equivalentes.

Seguidos de toxicidad humana y radiación ionizante. Especialmente para el caso de PVC y Aluminio, su impacto en estas categorías están asociadas no únicamente a la etapa de uso; sino también, al conjunto de las emisiones debidas a la obtención de las materias primas desde los recursos naturales y al consumo de electricidad desde los combustibles fósiles.

La quinta categoría con impacto significativo, es la afectación específica al uso y ocupación de suelo, especialmente de bosques, que se da únicamente en el caso de la madera. A pesar de que el sistema considera la madera como material neutro desde la perspectiva ambiental. Por lo que es fundamental que la madera que se usa este asociada a una gestión sostenible de los bosques. La madera debe tener una procedencia legal y controlada.

Una consideración final importante es que es necesario en estos temas realizar el análisis sobre todo el ciclo de vida, y no limitarse al análisis exclusivo de únicamente una sola de las fases, pues los resultados deben ser analizados desde una perspectiva integrada del ciclo de vida. Es decir, desde una perspectiva global de economía circular.

De los resultados obtenidos, se hace absolutamente necesaria una actuación de información activa a los sectores involucrados, pero especialmente un plan "renove" de ventanas a nivel español, que debería ayudar a conseguir los objetivos de reducción de emisiones de GEI que la UE ha decidido con el propósito de conseguir los objetivos marcados por el Acuerdo de París, para mitigar las emisiones tanto de las necesidades de calefacción como de climatización frente a las olas de calor.

9. Referencias

- 1 AIE (2015) Energy Technology Perspectives 2015. Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action. International Energy Agency
- 2 Asif, M., Davidson, A., Muneer, T. (2002). Life cycle analysis of window materials - a comparative assessment, CIBSE National Technical Conference, London.
- 3 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.
- 4 CNE (2008) Sistema de Garantía de Origen y Etiquetado de la Electricidad, Año 2007, 14 pp.
- 5 CNE (2009) Sistema de Garantía de Origen y Etiquetado de la Electricidad, Año 2008, 14 pp.
- 6 CNE (2010) Sistema de Garantía de Origen y Etiquetado de la Electricidad, Año 2009, 9 pp.
- 7 CNE (2011) Sistema de Garantía de Origen y Etiquetado de la Electricidad, Año 2010, 11 pp.
- 8 CNE (2012) Sistema de Garantía de Origen y Etiquetado de la Electricidad, Año 2011, 12 pp.
- 9 CNE (2013) Sistema de Garantía de Origen y Etiquetado de la Electricidad, Año 2012, 12 pp.
- 10 CNMCE (2014) Sistema de Garantía de Origen y Etiquetado de la Electricidad, Año 2013, 13 pp.
- 11 CNMCE (2015) Sistema de Garantía de Origen y Etiquetado de la Electricidad, Año 2014, 14 pp.
- 12 CNMCE (2016) Sistema de Garantía de Origen y Etiquetado de la Electricidad, Año 2015, 21 pp.
- 13 CNMCE (2017) Sistema de Garantía de Origen y Etiquetado de la Electricidad, Año 2016, 24 pp.
- 14 Environmental performance assessment of glazing and window: context, overview, main concerns. IEA-SHC Task 27 (www.iea-shc-task27.org)
- 15 Chevalier, L. , Krogh , H., Tarantini, M. (2002). Environmental performance assessment of glazing and window: context, overview, main concerns. IEA-SHC Task 27 (www.iea-shc-task27.org)

- 16 Choate, A. , Ferland, H. Waste Management and Energy Savings: Benefits by the Numbers. U.S. EPA. (yosemite.epa.gov, diciembre de 2004)
- 17 EPA (2004) About Brefs. Environmental Protection Agency. (www.epa.ie/Licensing/IPPC/Licensing/BREFDocuments)
- 18 Gobierno Vasco (2009) MADERA Y CAMBIO CLIMÁTICO. Análisis del ciclo de vida de la madera como material alternativo. Colección Lur N.º 14
- 19 Goedkoop M.J., Heijungs R., Huijbregts M., De Schryver A., Struijs J., Van Zelm R. (2013). ReCipe 2008: A Life Cycle Impact Assessment Method Which Comprises Harmonised Category Indicators at the Midpoint and the Endpoint Level. 1st ed, Report I: Characterisation. (www.lcia-recipe.net)
- 20 IPCC (1996). *Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventor.*
- 21 IPCC (2013) AR5: CLIMATE CHANGE 2013. The Physical Science Basis, WG I.
- 22 IPCC (2014) AR5: CLIMATE CHANGE 2014: Mitigation of Climate Change, WG III.
- 23 ISCarlos III (2017) Temperaturas umbrales de disparo de la mortalidad atribuible al frío en España en el periodo 2000-2009. Comparación con la mortalidad atribuible al calor. Instituto de Salud Carlos III.
- 24 Llorente (2011) Análisis del ciclo de vida de la ventana de madera. PFC, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal, Abril, 101 pp.
- 25 MFOM (2004). Código Técnico de la Edificación. Propuesta de real decreto de aprobación. Ministerio de Fomento. (www.mfom.es)
- 26 Morrison, G. (2004). Air conditioner performance rating. University of New South Wales. Sídney. (solar1.mech.unsw.edu.au)
- 27 OMM (2017) (public.wmo.int/en/our-mandate/climate)
- 28 REE (2004). Proyecto Indel: Atlas de la demanda eléctrica española. Red Eléctrica de España. (www.ree.es)
- 29 WBG (2004). Aluminum Manufacturing. The World Bank Group. (www.wbg.org)
- 30 WEC (2004). Total Energy Use Characteristics, del Global Transport and Energy Development: The Scope for Change, WEC. (www.worldenergy.org)
- 31 Weir, G., Muneer, T. (1998). Energy and environmental impact analysis of double-glazed windows. *Energy Convers.* 39, 243 - 256.

Anexo 1 Recopilación bibliográfica

A continuación se incluye una recopilación de 24 estudios sobre el ACV de una ventana, o relacionado fuertemente con este tema.

1. 1994 Ecobalance windows-Germany
2. 1996 Energy and environmental LCA of advanced windows-WREC
3. 1997 Eco considerations windows _Wien-KIU
4. 1998 LCA windows-façades-German UnivStuttgart
5. 1998 On the study of energy performance and LC cost of smart window-EB28
6. 1998 Weir Energy and environmental impact analysis of doubleglazed windows-ECM39
7. 1999-2002 UK Asif et al LCA window materials A comparative assessment
8. 2000 Eco-label windows J_Kreissig-German-UniStuttgart
9. 2000 Window and advanced glazing systems LCA-EB32
10. 2005 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 UPC
11. 2005 UK Asif et al Sustainability analysis of window frames
12. 2005 Windows in the workplace-EB37
13. 2005 WWF windows_0305
14. 2006 BRE Service Life PVC-U Windows Executive Summary
15. 2007 Australia PR07.1047 Final Report WEB
16. 2008 Salazar LCA of windows for the North American residential market Case study
17. 2009 Gob. Vasco ACV de la madera como material alternativo
18. 2011 UPM ACV de Vida de la Ventana de madera
19. 2012 Master Energy and CO₂ emissions associated with the production of Multi- glazed windows, Sweden
20. 2013 LCA assessment of recycling PVC window frames
21. 2013 Wood Window Alliance LCA_Report 2
22. 2014 LCA of Residential Windows: Saving Energy with Window Restoration
23. 2015 Al institute tsc_report3_lca_100dpi_release_locked_1016
24. 2015 LCA as a Decision Making for Window Performance Comparison in Green Building Design.

1994 Ecobalance windows-Germany

VORWORT

Die anhaltende Werkstoffdiskussion sowie das überraschend rege Interesse an der im Jahr 1991 herausgegebenen Arbeit "Ökologische Betrachtung der Fenster-Profil-Werkstoffe, Kunststoff, Aluminium, Holz" waren Anlaß dafür diese Studie zu überarbeiten. Im Zuge des großen öffentlichen Interesses an den ökologischen Qualitäten verschiedener Materialien hat sich auch die entsprechende Datenlage stark verbessert -sowohl qualitativ als auch quantitativ.

Durch Einbeziehung dieser neuen und verbesserten Daten wurde die vorliegende Fassung der "Ökologischen Betrachtung der Fenster-Profil-Werkstoffe, Kunststoff, Aluminium, Holz" entsprechend aktualisiert.

Im Gegensatz zur ersten Fassung wurde die Belastung der Umwelt durch Luftschadstoffe in Form des Summenparameters "Kritisches Luftvolumen" angegeben. Trotz aller Einschränkungen (S. 8) bietet das KLV doch eine Möglichkeit die Belastung, die die gleichzeitige Abgabe verschiedener Schadstoffe in unterschiedlichen Mengen für die Umwelt darstellt, übersichtlich und vergleichbar zu erfassen.

1996 Energy and environmental LCA of advanced windows-WREC

WREC 1996

Energy and Environmental Life-Cycle Analysis of Advanced Windows

PW Griffiths, PC Eames, SNG Lo & B Norton

PROBE: centre for Performance Research On the Built Environment
School of the Built Environment
University of Ulster
Newtownabbey
BT37 0QB N. Ireland

ABSTRACT

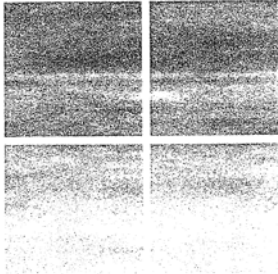
The environmental consequences of options for the manufacture, application, disposal, reuse and recycling, applicable to the full range of currently conceived advanced window systems, are discussed. Advanced window systems may incorporate, singly and in various combinations: evacuated contiguously-sealed glazing, electrochromics, thermochromics, photochromics, aerogels, xerogels, inert gas filled double glazings, low infra-red emittance coatings, diffractive daylight deflectors, holographic daylight deflectors refractive daylight deflectors, toughened glass.

The primary impetus for the development of such systems is that their use enables buildings to incur minimal energy use by reducing window heat losses and/or the displacement of electric lighting by enhanced daylighting. The energy savings associated with advanced glazings displace the combustion of fossil fuels directly and indirectly; environmental benefits thus ensue. However these benefits may be offset by the impact of energy embodied from manufacture and the negative impacts of the extraction and disposal of constituent materials. Over their total life-cycle the environmental impact for advanced glazing systems and their associated means of manufacture, system fabrication and the tenable reuse, recycling and disposal options are unknown. The usefulness of life cycle analyses during the research and development stage is discussed.

1997 Eco considerations windows _Wien-KIU

Ökologische Betrachtung von Fenstern aus verschiedenen Werkstoffen

Ergebnisbericht als Grundlage für das NÖ ökologische Beschaffungswesen



FORSCHUNGSINSTITUT FÜR CHEMIE UND UMWELT - TU-WIEN
gemeinsam mit
VERTRETERN VON HERSTELLERN DER EINZELNEN PRODUKTE
im Auftrage der/Abt. Umweltrecht und Umweltkoordination-
Koordinierungsstelle für Umweltschutz
des Amtes der Niederösterreichischen Landesregierung

Wien, im Juni 1997

1998 LCA windows-façades-German UnivStuttgart



1998 On the study of energy performance and LC cost of smart window-EB28

ELSEVIER

Energy and Buildings 28 (1998) 307–316

On the study of energy performance and life cycle cost of smart window

S.C. Sekhar*, Kenneth Lim Cher Toon

School of Building and Real Estate, National University of Singapore, 10 Kent Ridge Crescent, Singapore 119260, Singapore

Received 8 April 1998; received in revised form 28 April 1998; accepted 29 April 1998

Abstract

With worldwide energy cost rising significantly, there has been a pressing need to reduce the burning of fossil fuels and subsequently energy consumption. This, coupled with the prospect of global warming threatening human habitation, has made countries including Singapore more conscious and aware of the energy problem at hand. This paper deals with smart window, a double glazing unit where one pane consists of a high-performance heat reflective glass and the other coated with low-emissivity (low-e) coating. This combination of glazing provides optimum energy efficiency and a high level of daylight transmission with minimal reflectance. A study is made on the benefits derived from smart window done on a hypothetical 20-storey building. This encompasses a description of its quantitative impact on cooling load, energy consumption and energy savings achieved as compared with other forms of glazing. Following this, a detailed life cycle costing is done to determine the economic benefits attained from this type of glazing. The reduction of atmospheric pollutants as a result of using smart window is also analysed, and the future application of the glazing in hot and humid climates is discussed. In conclusion, it is observed that the smart window meets the technical and economic targets set, thus making it a viable long-term investment for high-rise commercial buildings.

1998 Weir Energy and environmental impact analysis of doubleglazed windows-ECM39



Pergamon

Energy Convers. Mgmt Vol. 39, No. 3/4, pp. 243–256, 1998

© 1997 Elsevier Science Ltd. All rights reserved

Printed in Great Britain

0196-8904/98 \$19.00 + 0.00

PII: S0196-8904(96)00191-4

ENERGY AND ENVIRONMENTAL IMPACT ANALYSIS OF DOUBLE-GLAZED WINDOWS

G. WEIR and T. MUNEER

Mechanical Manufacturing and Software Engineering Department, Napier University, 10 Colinton Road, Edinburgh EH10 5DT, U.K.

(Received 15 May 1996)

Abstract—The embodied energy of the four main materials used in the construction of an inert gas filled, double-glazed window, of a given size, was quantified. The four main materials considered were infill gas (argon, krypton and xenon), timber, aluminium and glass. The energy requirements of the underlying manufacturing processes are also estimated for the processing of the finished product. The total embodied energy for argon, krypton and xenon cavity filled windows (1.2 m by 1.2 m standard tilt and turn window), was found to be 1031 MJ, 1539 MJ and 5531 MJ per window, respectively. For argon filled cavities, this leads to the production of 94.7 kg of CO₂, 1.2 kg of SO₂ and 0.4 kg of NO_x per window. The results presented in this paper are initial findings in the first stages of a complete Life Cycle Analysis (LCA) of double-glazed windows for sustainable buildings. © 1997 Elsevier Science Ltd.

1999-2002 UK Asif et al LCA window materials A comparative assessment

LIFE CYCLE OF WINDOW MATERIALS - A COMPARATIVE ASSESSMENT

LIFE CYCLE OF WINDOW MATERIALS - A COMPARATIVE ASSESSMENT

M. Asif BSc MSc, **A. Davidson** BSc and **T. Muneer** PhD DSc CEng MImechE
FICBSE Millennium Fellow

School of Engineering , Napier University, 10 Colinton Road, Edinburgh EH10 5DT,
U.K.

ABSTRACT

This article addresses the life cycle assessment of the materials normally used for window frames, highlighting their respective benefits and weaknesses. Frames of different materials have been assessed on the basis of their production, energy consumption and environmental impacts. It has been found that the embodied energy of the windows made of aluminium, PVC, Al-clad timber and timber, for a reference window (1.2m×1.2m), are 6GJ, 2980MJ, 1460MJ and 995MJ respectively. The investigation shows that aluminium and PVC frames exhibit large amounts of environmental burdens. Accelerated ageing tests have been carried out to test the durability of windows against weathering impacts. These tests show that aluminium clad timber windows are comparatively least affected by environmental impacts. The article also provides results of a survey carried out with housing associations on performance of the studied windows.

2005 UK Asif et al Sustainability analysis of window frames

Building Serv. Eng. Res. Technol. 26,1 (2005) pp. 71–87

Technical note

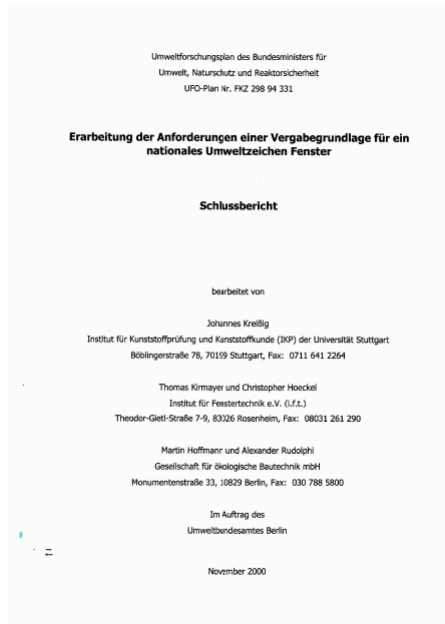
Sustainability analysis of window frames

M Asif BSc MSc PhD, **T Muneer** BEng (Hons) MSc PhD DSc CEng MImechE FICBSE Royal Society Millennium Fellow and **J Kubie** BSc(Eng) PhD DSc(Eng) CEng FImechE
School of Engineering, Napier University, Edinburgh, UK

The characteristics of the frame materials have significant impacts on the properties of a window. A window itself plays a crucial role in determining the overall energy performance of the building. This article analyses four different frame types; aluminium, aluminium-clad timber, Polyvinyl chloride (PVC) and timber make, from the sustainability perspective. These frame types have been studied on various parameters such as; environmental impacts during production/extraction of frame materials and disposal of frames; embodied energy, durability and service life; and maintenance and repair of frames. A price comparison and market scenario has also been discussed. It has been found that timber- and aluminium-clad timber windows are sustainable products due to their environment-friendly characteristics i.e., low embodied energy, low environmental impacts, better durability and longer service life. While aluminium and PVC frames have high values of embodied energy and associated environmental impacts.

Practical application: In the present sustainability-conscious age, the window industry is emphasising how to enhance the energy and environmental performance of their products. This article will be of interest not only to modern window manufacturers but also to customers as it addresses the key sustainability features of windows, i.e., energy and environmental performance, durability and service life, and maintenance and life cycle costing.

2000 Eco-label windows J_Kreissig-German-UniStuttgart



2000 Window and advanced glazing systems LCA-EB32

ELSEVIER

Energy and Buildings 32 (2000) 225–234

www.elsevier.com/locate/enbuild

Window and advanced glazing systems life cycle assessment

Stéphane Citherlet ^{*}, Francesca Di Guglielmo, Jean-Bernard Gay

LESO-PB / ITB Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland

Received 29 August 1998; received in revised form 2 November 1998; accepted 2 November 1998

Abstract

The present study has been done in the framework of the European Project IMAGE (Implementation of Advanced Glazing systems in Europe) and offers to the glass industry, engineers, architects and all people dealing with energy in buildings a reliable indicator of the environmental impact of advanced windows: their *global environmental impact*, which includes an Life Cycle Assessment analysis of the glazing system production/maintenance phase *and* a thermal balance of its utilisation phase. © 2000 Elsevier Science S.A. All rights reserved.

2005 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 UPC

Citado en diferentes estudios como: Recio et al. 2005

2005 Windows in the workplace-EB37

ELSEVIER

Energy and Buildings 37 (2005) 623–630

www.elsevier.com/locate/enbuild

Windows in the workplace: examining issues of environmental sustainability and occupant comfort in the selection of multi-glazed windows

G.F. Menzies*, J.R. Wherrett

School of the Built Environment, Heriot-Watt University, Riccarton, Edinburgh EH14 4AS, Scotland, UK

Received 29 March 2004; received in revised form 15 September 2004; accepted 18 September 2004

Abstract

Windows are important in the workplace for both environmental and psychological reasons. Good glazing design can reduce energy outputs by lowering the requirements for heating or cooling; frame design can utilise more sustainable materials and those with lower embodied energy, such as timber and aluminium-clad timber. Windows are also important for the provision of daylight and a view, both of which have known psychological benefits, although glare and passive solar gain can be problematic.

Three studies were undertaken to look at sustainability and comfort issues for a number of different types of multi-glazed windows. Focus groups and interviews with professionals were used to examine issues of sustainability and productivity. Four case study buildings were surveyed to examine the level of energy use for different glazing specifications. A post-occupancy survey was then used to examine the level of comfort in these buildings. Results showed that architects consider comfort and productivity in their designs, but consider sustainability less often. Surveys of energy usage showed that building design can influence the efficiency of multi-glazed windows; this result was mirrored in the post-occupancy survey where design factors influenced occupant comfort. The research concludes that comfort and productivity in the workplace is related more to design factors than to sustainability factors.

© 2004 Elsevier B.V. All rights reserved.

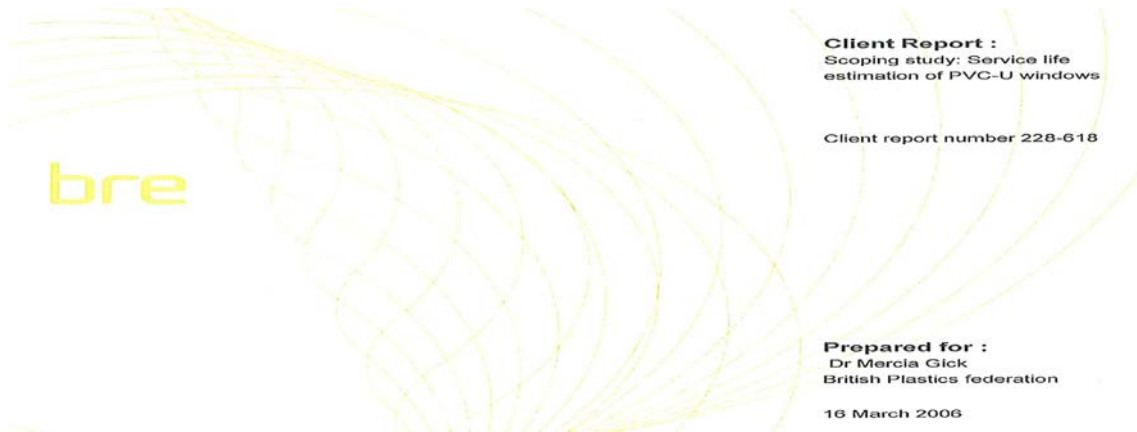
2005 WWF windows_0305: Timber vs PVC

Window of opportunity

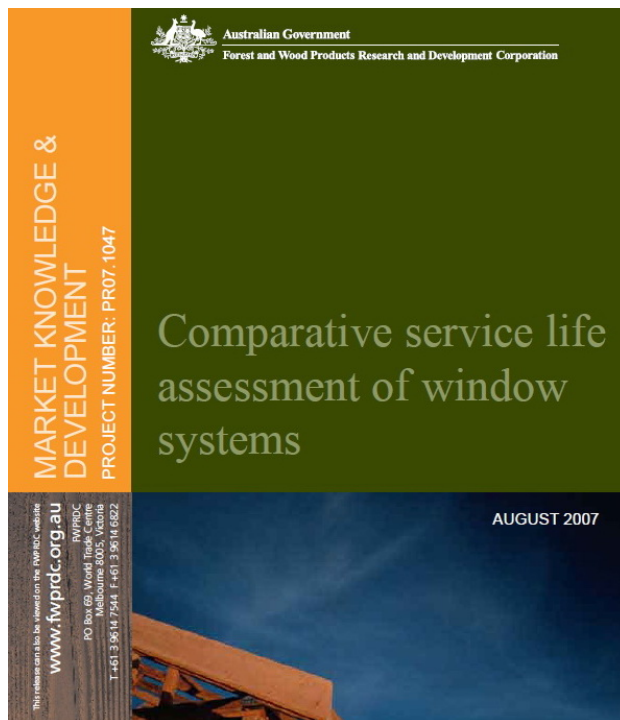
The environmental and economic benefits of specifying timber window frames



2006 BRE Service Life PVC-U Windows Executive Summary



2007 Australia PR07.1047 Final Report WEB



2008 Salazar LCA of windows for the North American residential market Case study

Scandinavian Journal of Forest Research, 2008; 23: 121–132



ORIGINAL ARTICLE

Life cycle assessment of windows for the North American residential market: Case study

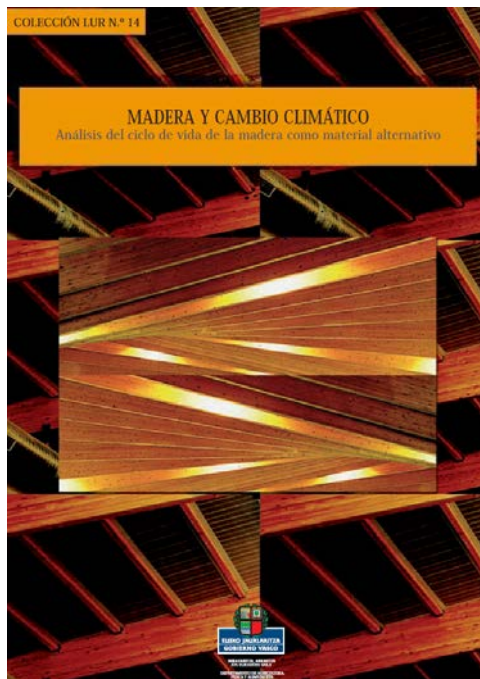
JAMES SALAZAR & TARANEH SOWLATI

Department of Wood Science, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada

Abstract

A life cycle assessment (LCA) of residential windows was conducted to evaluate the environmental impacts of those made with aluminum-clad wood, polyvinyl chloride (PVC) and fiberglass frames for sale in North America. The LCA was a case study in which specific-site data were used for the manufacturing stage of each window, while published data were adapted to complete the life cycle inventories using Sima Pro software. These inventories were grouped into impact categories and scaled based on IMPACT 2002+ version 2.1 characterization and damage factors. The damage modeling indicated that the life cycle impacts are dominated by the combustion of non-renewable energy resources. The PVC life cycle used the most non-renewable energy and caused the most damage owing to that window's shorter service life. The disposal of aluminum cladding in the municipal waste stream caused greater aquatic ecotoxicity for the wood window. The sensitivity analysis revealed that replacing the virgin material in aluminum cladding with recycled content improved the life cycle impacts of the wood window. Using fiberglass or PVC to clad the wood window also improved the environmental performance. Other potential improvements to the life cycle impacts of the three windows include improving energy efficiency, particularly during the secondary manufacturing.

2009 Gob. Vasco ACV de la madera como material alternativo



2011 UPM ACV de Vida de la Ventana de madera



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA FORESTAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA VENTANA DE MADERA

Autora: ISABEL MARÍA LLORENTE DÍAZ

Directores:

SANTIAGO VIGNOTE PEÑA (ETSI MONTES, UPM)

OLGA MORO-COCO (FEIM)

Tutor: ISAAC MARTINEZ ROJAS

Madrid, abril 2011

2012 Master Energy and CO₂ emissions associated with the production of Multi-glazed windows, Suecia



Thesis for the degree of Master of Science

Energy and CO₂ emissions associated with the production of
Multi-glazed windows

Submitted by

Raya Yousef Teenou

Eco-technology and Environmental Science

Department of Engineering and Sustainable Development

Mid Sweden University

Östersund, Sweden

May, 2012

2013 LCA assessment of recycling PVC window frames

Resources, Conservation and Recycling 71 (2013) 40–47



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Resources, Conservation and Recycling

journal homepage: www.elsevier.com/locate/resconrec



Life cycle assessment of recycling PVC window frames

Heinz Stichnothe^{a,b}, Adisa Azapagic^{a,*}

^a School of Chemical Engineering and Analytical Science, The Mill, Sackville Street, The University of Manchester, Manchester M13 9PL, UK

^b Johann Heinrich von Thünen Institut (vTI), Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 August 2012

Received in revised form 20 October 2012

Accepted 11 December 2012

Keywords:

Environmental impacts

LCA

Metals recycling

PVC recycling

PVC windows

ABSTRACT

This paper presents the life cycle impacts of recycling PVC window frames. Both post-industrial and post-consumer waste are considered to produce white and non-white chips and powder. The results suggest that significant savings of environmental impacts can be achieved by using PVC from recycled waste frames compared to virgin PVC resin. Recycling post-consumer waste leads to higher savings than post-industrial waste due to the credits for metals recycling. For example, replacing virgin by PVC from post-consumer waste saves around 2 t of CO₂ eq./t of PVC while PVC from post-industrial waste saves 1.8 t. The results are sensitive to transport distances and truck payloads. For instance, the global warming potential (GWP) of non-white PVC chips increases 1.7 times when the transport distance increases from 100 to 500 km and the payload factor decreases from 0.7 to 0.2. Credits for metals recycling influence the environmental savings: crediting the system for virgin aluminium saves 54 times more CO₂ eq./t of recycled PVC compared to the credits for recycled aluminium.

2013 Wood Window Alliance LCA_Report 2

LCA of timber, modified timber and aluminum-clad timber windows.

Gillian F. Menzies

Institute for Building and Urban. Design Report for the Wood Window Alliance,

Abstract: This work allows a complete like-for-like longevity, cost and environmental impact comparison of timber, modified timber, aluminum-clad timber and PVC-U frame materials. It concludes that there is no single or optimal timber based window frame material; there is not a one-size-fits-all solution. For various exposure conditions and applications, one timber-based product may be preferable over another in service life terms, while others may prevail in cost or global warming potential terms. It is clear that PVC--U windows are not comparable with wood alternatives in GWP terms. Indeed PVC--U windows are not comparable with wood alternatives over a number of LCA impact factors.

2014 LCA of Residential Windows: Saving Energy with Window Restoration

50th ASC Annual International Conference Proceedings

Copyright 2014 by the Associated Schools of Construction

Life Cycle Assessment of Residential Windows: Saving Energy with Window Restoration

Katherine M. Switala-Elmhurst, Ph.D. Candidate, LEED AP and
Philip D. Udo-Inyang, Ph.D., PE
Temple University
Philadelphia, PA

New windows are rated based on their energy performance during the use phase and neglect the overall environmental impacts caused by manufacturing, maintenance and disposal. Due to the number of residential window replacements occurring today in the U.S., there is a growing need to quantify the sustainability of window preservation as an alternative to window replacement. This study assesses the environmental impact of wood window restoration versus replacement with the polyvinyl chloride (PVC) window and aluminum-clad wood window for the entire "cradle to grave" life cycle of the window assembly. A life cycle assessment (LCA) was conducted to evaluate the environmental impacts of historic wood window restoration versus window replacement. The life cycles were modeled using GaBi software with the construction extension database. Inventories were analyzed using TRACI 2.1 which translates the environmental consequences of the LCA processes into quantifiable environmental impacts. The results indicate that wood window restoration has less overall environmental impact when compared to a PVC and aluminum-clad wood replacement window. The sensitivity analysis revealed that window lifespan assumptions impact results and demonstrates the importance of proper wood window maintenance.

2015 Al institute tsc_report3_lca_100dpi_release_locked_1016

Aluminium and Life Cycle Thinking Towards Sustainable Cities



KIERANTIMBERLAKE

2015 LCA as a Decision Making for Window Performance Comparison in Green Building Design. [beech wood vs Al]

Ghada Elshafei, Abdelazim Negm. World Academy of Science, Engineering and Technology. International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering Vol: 9, No: 9

Abstract: Life cycle assessment is a technique to assess the environmental aspects and potential impacts associated with a product, process, or service, by compiling an inventory of relevant energy and material inputs and environmental releases; evaluating the potential environmental impacts associated with identified inputs and releases; and interpreting the results to help you make a more informed decision. In this paper, the life cycle assessment of aluminum and beech wood as two commonly used materials in Egypt for window frames are heading, highlighting their benefits and weaknesses. Window frames of the two materials have been assessed on the basis of their production, energy consumption and environmental impacts. It has been found that the climate change of the windows made of aluminum and beech wood window, for a reference window (1.2m×1.2m), are 81.7 mPt and -52.5 mPt impacts respectively. Among the most important results are: fossil fuel consumption, potential contributions to the green building effect and quantities of solid waste tend to be minor for wood products compared to aluminum products; incineration of wood products can cause higher impacts of acidification and eutrophication than aluminum, whereas thermal energy can be recovered.