

LA INTEGRACIÓN FOTOVOLTAICA ARQUITECTÓNICA Y LA REHABILITACIÓN

Isabel Sánchez Íñiguez de la Torre, Elena Rico Rodríguez, David Martín Jiménez, Teodosio del Caño González

(Onyx Solar Energy S.L.)

Introducción

Los edificios son los responsables del 40% del consumo energético mundial, según datos de la UNEP (United Nations Environment Programme). Así pues, reducir la demanda energética en el sector de la construcción es fundamental para garantizar la sostenibilidad del planeta y que las generaciones futuras puedan satisfacer sus propias necesidades.

Los diferentes países establecen mediante sus normativas requerimientos que limitan el consumo energético de los edificios, a la vez que garantizan el confort y la salubridad de los usuarios. Sin embargo, suelen tratarse de cumplimientos mínimos que pueden ser mejorables. En este sentido, nacen diferentes sistemas de certificación que quieren ir más allá, teniendo en cuenta de manera amplia diferentes aspectos de arquitectura y construcción sostenible, ecológica y respetuosa con el medio ambiente, como por ejemplo las certificaciones LEED, BREEAM, VERDE o Passivhaus.

Por otra parte, conviene tener en cuenta que para poder cumplir con los objetos de la Unión Europea para el año 2020, en relación al cambio climático y la sostenibilidad energética, la renovación y mejora de los edificios existentes cobra gran importancia. Así, estas normativas y certificaciones van teniendo en cuenta la particularidad de los proyectos de rehabilitación.

En el presente documento se expone el proyecto EuroPHit “Improving the energy performance of step-by-step refurbishment and integration of renewable energies”, que basándose en los estándares Passivhaus y EnerPHit, pretende mejorar la eficiencia en los proyectos de rehabilitación paso a paso, incluyendo las energías renovables integradas como una parte importante del proceso.

La mejora de la envolvente, la renovación de las instalaciones y la educación del usuario para que utilice de manera correcta los edificios es importante. Si además se integran sistemas de generación de energía por medio de fuentes renovables en los propios edificios, la reducción de la huella ecológica del sector está garantizada. La integración fotovoltaica arquitectónica permite obtener electricidad a la vez que se mejora el comportamiento pasivo de la envolvente; en el presente documento también se presentan dos soluciones innovadoras que están siendo estudiadas en el proyecto EuroPHit: la fachada ventilada fotovoltaica y los acristalamientos fotovoltaicos.

El Estándar Passivhaus, EnerPHit y el Proyecto EuroPHit

El estándar Passivhaus nació en Alemania a principio de los años 90 y poco a poco se ha ido extendiendo por todo el mundo. Hoy en día es uno de los principales certificados que garantizan que una construcción está realizada siguiendo unos parámetros exigentes de ahorro energético y confort.

Los edificios Passivhaus pueden llegar a reducir el consumo energético debido a los sistemas de calefacción y refrigeración un 90% en relación a los edificios existentes, y un 75% en relación a los edificios de nueva construcción, según el Passivhaus Institute de Alemania. Pero sobre todo, lo más destacable es la sensación que se experimenta en el interior de este tipo de edificios: además del

confort térmico debido a una temperatura interior adecuada, la calidad del aire y el aislamiento acústico contribuyen al bienestar de los usuarios. Se dice que quien ha vivido en una casa Passivhaus, no es capaz de poder vivir después en una casa sin estas prestaciones.

Para que una vivienda sea considerada Passivhaus, los requerimientos que debe cumplir se pueden resumir en los siguientes:

- Demanda energética de calefacción $< 15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$
- Demanda energética de refrigeración $< 15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$
- Demanda de energía primaria (calefacción, agua caliente y electricidad) $< 120 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$
- Estanqueidad: máximo de 0,6 renovaciones de aire por hora a 50 pascales de presión
- El confort térmico se debe cumplir para todas las zonas habitables tanto en invierno como en verano, con un máximo del 10% de las horas en un año dado a más de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Un buen diseño de la envolvente arquitectónica con buenos materiales aislantes, la ausencia de puentes térmicos, el control de las infiltraciones, la elección de carpinterías y acristalamientos de altas prestaciones, la ventilación mecánica controlada con recuperación de calor así como una buena ejecución de la obra son claves para poder conseguirlo.

Un edificio rehabilitado que cumpla con los requerimientos puede ser certificado PassivHaus; sin embargo, no siempre es fácil. Según el estado en que se encuentre la construcción, pueden existir limitaciones que dificulten lograr, con un esfuerzo razonable, estos óptimos resultados que exige la certificación.

Así, nace el estándar EnerPHit para rehabilitación de edificios con aislamiento de la envolvente por el exterior, y el EnerPHit⁺ cuando el aislamiento se sitúa por el interior en más del 25% de la envolvente. Ambas certificaciones tienen en cuenta las particularidades que tiene un edificio rehabilitado en comparación con uno de nueva construcción, y en base a ello establece diferentes requerimientos para lograr certificarse. Además de la obligatoriedad de cumplir con unos objetivos generales relacionados con la estanqueidad, transmitancia térmica de los elementos que forman parte de la envolvente, la protección a la humedad o la demanda de energía primaria entre otros, la obtención del certificado EnerPHit se puede hacer mediante dos procedimientos:

- Mediante la limitación de la demanda energética de calefacción a valores inferiores de $25 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$
- Mediante los requisitos de los componentes individuales del edificio

En este contexto, perteneciente al programa Intelligent Energy Europe (IEE) se desarrolla el proyecto EuroPHit: “Improving the energy performance of step-by-step refurbishment and integration of renewable energies” (Nº: SI2.645928), que está liderado por el Passivhaus Institute y en el que participan socios de diferentes países formando un equipo multidisciplinar.

El principal objetivo del proyecto EuroPHit es aumentar significativamente la calidad y la eficiencia energética de la rehabilitación de edificios “paso a paso” en toda la Unión Europea a través del desarrollo de una metodología que integre todos los factores, la aplicación de una garantía de calidad uniforme de diseño y construcción, el fomento de su puesta en práctica entre los actores clave y la difusión del conocimiento generado mediante redes de proyectos nuevos o existentes. El proyecto así quiere promover la eficiencia energética y la integración de energías renovables en las rehabilitaciones de edificios realizadas “paso a paso”, resolviendo cuestiones de diferentes disciplinas técnicas, de financiación económica, etc. para lo que en los 3 años de duración del

proyecto se destinará una parte significativa de recursos a la creación de material formativo y divulgativo para las diferentes partes involucradas en los proyectos de rehabilitación.

La Rehabilitación Paso a Paso y la Integración Fotovoltaica Arquitectónica

La rehabilitación paso a paso consiste en la realización de proyectos de rehabilitación de edificios en diferentes fases que se vayan adaptando a las circunstancias de cada momento. Por ejemplo, podría suceder que por causas económicas fuera imposible realizar todas las intervenciones al mismo tiempo, por lo que se irían haciendo progresivamente componente por componente, como se observa en la figura 1. Otro caso puede ser que, para no alterar el día a día de los usuarios del edificio, se tuvieran que ir rehabilitando en diferentes momentos diferentes zonas de los edificios, por ejemplo fachada por fachada, como se observa en la figura 2.



Figura 1. Rehabilitación componente a componente



Figura 2. Rehabilitación fachada a fachada

Como puede verse en este esquema, la manera lógica de acometer este tipo de proyectos es, en primer lugar, renovar aquellos elementos que más pueden influir en la demanda energética del edificio, sobre todo en la demanda de calefacción y refrigeración, como son las partes opacas de la envolvente: el incremento de aislamiento térmico en las fachadas debería ser el primer paso. A continuación la renovación de las ventanas y carpinterías y los sistemas de ventilación, para finalizar con la renovación de las instalaciones de calefacción y refrigeración, y la integración de energías renovables.

Las energías renovables instaladas en los edificios producirán de manera limpia la energía que los usuarios necesitan para garantizar su confort y realizar sus actividades: la energía solar térmica puede contribuir al ahorro energético en los sistemas de calefacción y/o producción de agua caliente sanitaria, la biomasa al ahorro energético en los sistemas de calefacción, la fotovoltaica al ahorro energético de todos los sistemas y aparatos que necesitan la electricidad evitando las pérdidas desde los centros de producción energética hasta los puntos de consumo, etc. En este sentido, la integración fotovoltaica arquitectónica o BIPV (Building Integrated Photovoltaics) destaca como solución para la integración de energías renovables en los proyectos de rehabilitación por su carácter multifuncional e innovador.

Las soluciones BIPV consisten en la sustitución de materiales convencionales constructivos por materiales con propiedades fotovoltaicas que generan electricidad en el propio edificio gracias al sol. Así, cualquier elemento que forme parte de la envolvente (fachada ventilada, muro cortina, doble piel, lucernarios...) o que se encuentre en el exterior del edificio (pérgola, pavimento exterior...) podrá producir energía eléctrica, reduciendo la demanda energética y contribuyendo a la sostenibilidad.

Es importante destacar el carácter multifuncional de estas soluciones. La integración fotovoltaica en edificios reúne propiedades activas y pasivas (figura 3), por lo que, además de la generación de electricidad, no hay que olvidar otras ventajas como el aislamiento térmico y acústico, la iluminación natural, o la imagen moderna e innovadora que aportan al edificio.



Figura 3. Características multifuncionales de las soluciones BIPV

Existen diferentes tecnologías fotovoltaicas, entre las que podemos destacar dos, para su utilización en soluciones BIPV: el silicio cristalino y el silicio amorfo. Los vidrios fotovoltaicos de tecnología de silicio cristalino se componen principalmente de una capa exterior de vidrio y una capa interior de vidrio u otros materiales tipo TEDLAR disponiendo entre ambas capas células cristalinas. La potencia del vidrio vendrá definida por el número de células y la tecnología de las mismas, monocristalino (mono-Si) y policristalino (poly-Si). Los vidrios cristalinos suelen tener valores de potencia alrededor de los 100-170 Wp/m², dependiendo de la tecnología, de la separación entre células y la eficiencia de las mismas. La tecnología thin-film o tecnología de silicio amorfo (a-Si), se forma al depositar diferentes tipos de silicio tratado sobre un sustrato de vidrio, seguido de diferentes tratamientos. La tecnología de silicio amorfo permite diferentes grados de transparencia desde el 0% (opaco) al 30%. Es importante tener en cuenta que la potencia nominal depende directamente del grado de transparencia: a mayor transparencia, menor potencia del vidrio fotovoltaico. Seleccionar el adecuado equilibrio entre potencia y transparencia condiciona la idoneidad de la integración.

Los sistemas más comunes de integración fotovoltaica para proyectos de rehabilitación paso a paso son la fachada ventilada y los acristalamientos (lucernarios, muros cortina...). En las secciones siguientes se exponen estas soluciones y su aplicación para climas cálidos, con la utilización de la tecnología de silicio amorfo (a-Si) por ser la que mejor se comporta en este tipo de aplicaciones.



Figura 4: Fachada ventilada fotovoltaica de Onyx Solar



Figura 5: Lucernario fotovoltaico de Onyx Solar

Tratándose de proyectos de rehabilitación, no será fácil que los vidrios fotovoltaicos se encuentren en condiciones óptimas (inclinación y orientación) para el aprovechamiento de la radiación solar directa, por lo que será fundamental aprovechar la radiación difusa del sol, que es aquella que no produce sombras y predominante en días nublados. Así, la tecnología de silicio amorfo es la que ofrece mejores resultados de producción energética en relación a la potencia instalada bajo este tipo de condiciones.

Fachada Ventilada Fotovoltaica

El sistema de fachada ventilada fotovoltaica se puede aplicar a la rehabilitación de edificios existentes, ya que consta de diferentes componentes que se colocan en la parte exterior de los cerramientos verticales de un edificio. Una capa de aislamiento térmico y acústico se coloca en la cara exterior de la fachada donde va anclada también la subestructura que sujeta el material de acabado, en este caso unidades de vidrio fotovoltaico. Entre el aislamiento y los vidrios fotovoltaicos se crea una cámara de aire que es fundamental para el correcto comportamiento térmico de la solución. En verano, cuando en la fachada ventilada fotovoltaica incide la radiación solar, el aire de la cámara ventilada se calienta, y debido a la diferencia de densidad entre el aire caliente y frío, se crea en el interior de esta un efecto chimenea que hace que el aire caliente suba hacia arriba, eliminando el calor y la humedad, y elevando el confort en el interior. En invierno, este aire caliente puede ser aprovechado para precalentar el aire de los sistemas de ventilación a través de unos sistemas de recuperación o para aportar calor a los sistemas de calefacción o producción de agua caliente sanitaria. Además, esta solución, gracias a la incorporación de material fotovoltaico, produce al mismo tiempo electricidad de manera gratuita y limpia.

Para analizar el comportamiento pasivo del sistema de fachada ventilada fotovoltaica, se ha llevado a cabo el test PASLINK que, mediante la aplicación de una metodología desarrollada, permite obtener propiedades energéticas de los sistemas constructivos de fachada. El sistema se basa en la construcción de un habitáculo con una de sus paredes construida con la solución que se quiere analizar. Para el resto de la envolvente se utilizan otros sistemas cuyas propiedades son conocidas y se sitúa el habitáculo en el exterior, manteniendo en su interior unas condiciones de humedad y temperatura de confort como si del interior de un edificio se tratara. Durante una duración aproximada de una semana o diez días, se miden los flujos de calor a través de las paredes así como la evolución de las temperaturas superficiales, y los parámetros meteorológicos del exterior. Es decir, el habitáculo es un calorímetro que cuantifica la transferencia de energía entre el exterior y el interior a través de la envolvente. Los datos obtenidos durante ese período se extrapolan siguiendo un modelo matemático, con lo que es posible obtener información sobre el comportamiento de la solución en diferentes climatologías a lo largo de un año tipo.

Para poder estudiar el comportamiento de la fachada ventilada fotovoltaica, se han comparado dos sistemas de fachada bajo las condiciones climáticas de Madrid: una fachada tipo base BW (yeso + bloques de hormigón + mortero de cemento) y una fachada ventilada fotovoltaica PVF (fachada tipo base BW + aislamiento térmico + cámara de aire + vidrios fotovoltaicos de silicio amorfo opaco).

La figura 6 muestra la energía intercambiada: ganancias y pérdidas entre el interior y el exterior, así como las características térmicas de las soluciones. Se observa que la fachada ventilada reduce de manera considerable las pérdidas y ganancias de calor en los meses fríos y cálidos respectivamente.

En una situación ideal, las temperaturas interiores y exteriores permanecen constantes, y bajo esta premisa se calcula el valor de transmitancia térmica o valor U, que mide el flujo de calor a través de un elemento. Sin embargo, las temperaturas en realidad no son constantes, por lo que podemos definir como transmitancia térmica dinámica equivalente, U_{din} , aquella que sí tiene en cuenta las

variaciones que se producen. La metodología seguida permite calcular este valor a lo largo del año tipo de un lugar en concreto, y en este caso los resultados obtenidos para la ciudad de Madrid de la figura 6 muestran que los valores con la solución de fachada ventilada fotovoltaica son mejores que para el muro base. Además, el valor de U_{din} es siempre inferior al valor U convencional.

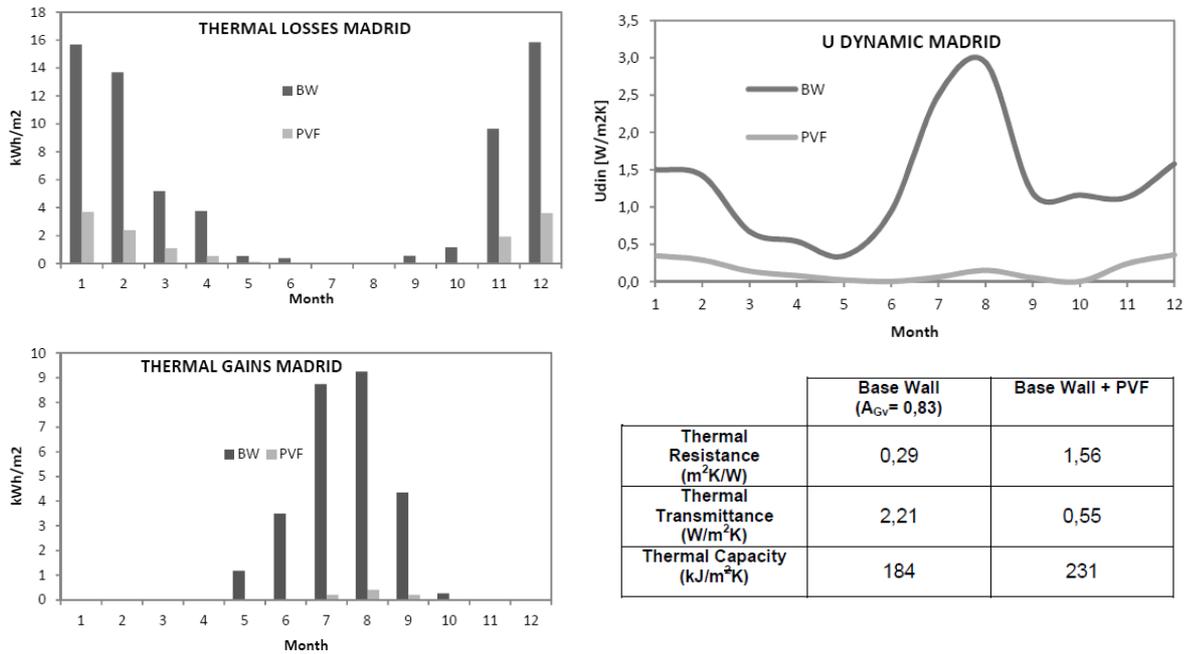


Figura 6: Comportamiento térmico, test PASLINK (propiedades pasivas)

Es importante destacar que el sistema de fachada fotovoltaica permite así mismo obtener electricidad de manera gratuita y limpia gracias al sol. Por otra parte como ya se ha comentado anteriormente, es posible recuperar el calor generado en la cámara de aire para utilizarlo en el interior del edificio reduciendo el consumo de los sistemas de calefacción y/o agua caliente sanitaria.

El gráfico de la figura 7 presenta la electricidad estimada producida por los vidrios fotovoltaicos y el calor absorbido por la cámara de aire. Los valores máximos de producción de calor corresponden al mes de agosto (mes de altas temperaturas exteriores). En cuanto a la generación eléctrica, el gráfico muestra los kilovatios hora obtenidos por metro cuadrado de vidrio fotovoltaico situado en una fachada vertical orientada al sur, en cada mes de un año completo tipo. En el hemisferio norte, la radiación solar es superior en los meses de verano que en los de invierno, pero en este caso, como las fachadas están en posición vertical, los valores de producción alcanzan máximos en primavera y en otoño. La diferencia que existe en el mes de febrero en relación a los meses de enero y marzo, se debe a que este mes tiene 28 días, por lo que los resultados mensuales son inferiores.

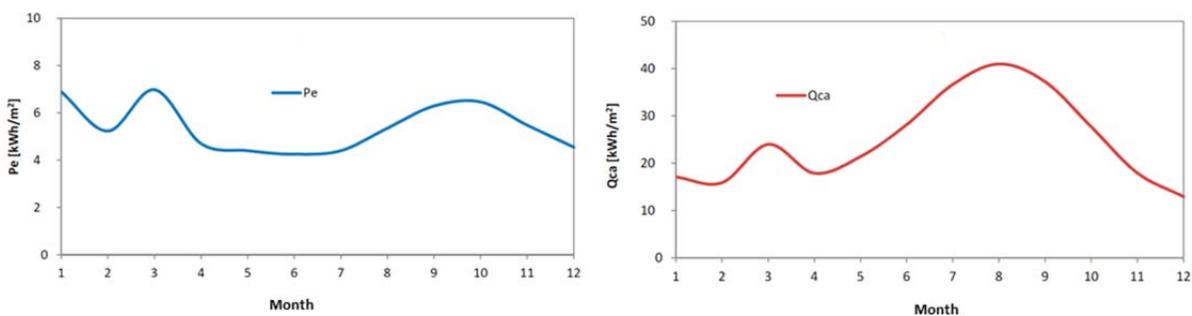


Figura 7: Generación de energía (electricidad y calor), test PASLINK (propiedades activas)

Lucernarios y Muros Cortina Fotovoltaicos

Las zonas acristaladas de las envolventes de los edificios facilitan la iluminación natural de los espacios reduciendo la energía requerida para el funcionamiento de los sistemas de iluminación artificial. Sin embargo, es necesario considerar las ganancias térmicas producidas por la radiación solar que aumentan los consumos de los sistemas de refrigeración y ventilación en climas calurosos. El vidrio fotovoltaico semitransparente de tecnología de silicio amorfo es idóneo para este tipo de aplicaciones tanto en construcción nueva como en proyectos de rehabilitación, ya que, además de producir electricidad y permitir la iluminación natural, actúa como un filtro a la radiación infrarroja, responsable del recalentamiento de los edificios.

Debido al efecto invernadero, la temperatura del interior de los edificios aumenta cuando lo hace el valor g. El valor g y el SHGC (Solar Heat Gain Coefficient) indican la cantidad de energía que traspasa un acristalamiento. El vidrio fotovoltaico semitransparente de silicio amorfo limita este efecto no deseado, como puede verse en la figura 8.

Además, también permite reducir la radiación ultravioleta en el interior de los edificios hasta un 1% como se observa en la figura 8, evitando el impacto negativo que esta radiación puede tener sobre los usuarios, el mobiliario o los materiales. Por otra parte, la reflexión solar alcanza valores del 7 al 9%, similares a los del vidrio convencional cuyos valores se sitúan entre el 6 y el 10%. Es importante destacar también que, dependiendo del grado de transparencia, la transmisión de luz puede variar entre el 10 y el 30% que es normalmente el rango óptimo para la iluminación de los espacios interiores.

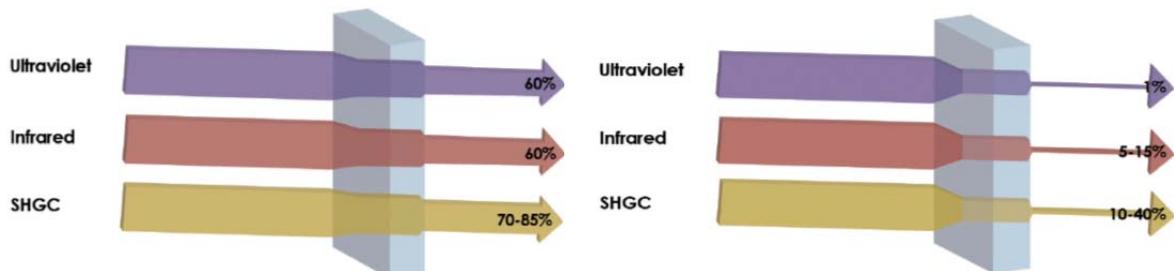


Figura 8: Comportamiento ante la radiación solar del vidrio convencional versus el vidrio fotovoltaico de tecnología de silicio amorfo

También se pueden incorporar cámaras de aire o cualquier otro gas, obteniendo así unidades de vidrio doble o triple, para poder aumentar el aislamiento térmico y acústico. La tabla 1 muestra las propiedades de las configuraciones de vidrio fotovoltaico más comunes.

	U _{value} W/m ² K	Opaco			10% transp.		20% transp.		30% transp.	
		g _{value} %	Pot. Wp/m ²							
Simple (6+3.6+6)	5,2	23	62	29	44	32	39	37	33	
Doble (6+3.6+6/12aire/4+4)	2,7	6	62	11	44	14	39	19	33	
Low-E Doble (6+3.6+6/12aire /LowE4+4)	1,6	5	62	10	44	12	39	17	33	

Tabla 1: Propiedades de diferentes configuraciones de vidrio fotovoltaico a-Si

Conclusiones

La rehabilitación de los edificios existentes es clave para aumentar la eficiencia energética y la sostenibilidad en el sector de la construcción.

Además de las normativas obligatorias de cada país, existen certificaciones voluntarias que fomentan una mejor manera de realizar los proyectos, entre las cuales se encuentra la certificación EnerPHit, que se basa en la certificación Passivhaus.

El proyecto EuroPHit trata de mejorar este sistema de certificación para los proyectos de rehabilitación paso a paso, incluyendo los sistemas de energía renovables como una medida de ahorro energético importante.

Las soluciones constructivas de integración fotovoltaica o BIPV, que combinan propiedades activas y pasivas, son una buena estrategia para la rehabilitación energética de edificios.

Las fachadas ventiladas fotovoltaicas, además de producir electricidad, reducen los intercambios de calor entre el exterior y el interior, y en verano ayudan a eliminar el calor y la humedad de los cerramientos exteriores. Además, es posible reutilizar el calor producido en la cámara.

Los acristalamientos fotovoltaicos, permiten el paso de la luz natural, evitando el recalentamiento del interior de los edificios y las radiaciones dañinas, a la vez que producen electricidad. Son posibles diferentes configuraciones para adaptarse a las necesidades del edificio.

Referencias

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA (IDAE), Secretaría General Departamento de Planificación y Estudios, 2011. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Proyecto SECH_SPAHOUSEC. Spain.

PASSIVHAUS INSTITUTE. www.passivhaus-institut.de/

PLATAFORMA DE EDIFICACIÓN PASSIVHAUS (PEP). www.plataforma-pep.org/

PROYECTO EUROPHIT. <http://europhit.eu/>

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). <http://www.unep.org/>

VAN DICK AND TELLEZ, 1995. F. COMPASS Measurement and data analysis procedures. Brussel, Belgium.

VAN DICK AND VAN DER LINDEN, 1995. PASLINK Calibration and component test procedures. TNO Delft, Netherlands.