



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

La madera como elemento clave en la certificación  
Passivhaus

Wood as a key element in Passivhaus certification

Autor/es

Víctor Lucia Jiménez

Director/es

Jaime Magén Pardo

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
2017







## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. Víctor Lucia Jiménez,

con nº de DNI 73022390N en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
Grado \_\_\_\_\_, (Título del Trabajo)

La madera como elemento clave en la certificación Passivhaus

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 20 de septiembre de 2017

Fdo: Víctor Lucia Jiménez





## RESUMEN

La madera es un material que ha estado unido al hombre desde sus inicios, presente en su día a día y dando solución a sus problemas. Sin embargo, en el marco arquitectónico, con la llegada de la revolución industrial se vio relegada a un segundo plano, dando paso a los nuevos materiales que conformarían el plano constructivo y a una época de derroche energético. Será la incipiente preocupación por el fin de los recursos limitados la que de la voz de alarma y se detenga a analizar el contaminado entorno que esta época de "bonanza" ha dejado tras de sí.

El trabajo plantea el análisis de la madera y cómo ésta viene a resolver las necesidades constructivas a través de su uso en la arquitectura. El porque es sencillo; la preocupación y concienciación sobre el cambio climático, unido al Acuerdo 20-20-20 de la Unión Europea, generan la necesidad de reducir los consumos y demandas energéticas. La arquitectura, responsable del 40% de dicha demanda, debe tomar un cambio de dirección, realizando obras que no solo consuman poca energía, sino que también demanden poca para su construcción. El Passivhaus Institut aportará sus herramientas y criterios para la creación de viviendas cuya demanda energética de mantenimiento sea casi nula y la madera las hará reales, aportando un consumo energético de construcción muy inferior al que supondría una construcción tradicional gracias a su sostenibilidad y reducido impacto medioambiental.

En primer lugar, se estudia la historia de la madera en la arquitectura, para entender cómo ésta ha ido evolucionando y dando solución a las necesidades del hombre. Posteriormente, para comprobar las hipótesis anteriores, se analiza el Passivhaus Institut, estudiando sus criterios y correcto funcionamiento a través de su primera obra. En último lugar, se extrapolan estos criterios al clima español y se analiza cómo se les ha dado solución a partir del análisis de viviendas concretas construidas con madera, las cuales cuentan con la certificación Passivhaus, consiguiendo finalmente una reducida demanda energética tanto en construcción como en mantenimiento.

# **LA MADERA COMO ELEMENTO CLAVE EN LA CERTIFICACIÓN PASSIVHAUS**

TRABAJO FIN DE GRADO\_VÍCTOR LUCIA JIMÉNEZ

DIRIGIDO POR\_JAIME MAGÉN PARDO

Grado en Estudios en Arquitectura

Universidad de Zaragoza, EINA, Septiembre de 2017

## ÍNDICE

### **PARTE 1** **08**

---

INTRODUCCIÓN	09
LA MADERA COMO ELEMENTO CLAVE EN LA CONSTRUCCIÓN	12
Madera y tradición	12
Tradición española	14
Madera e industrialización	15
HACIA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA	16
Arquitectura pasiva	17
Passivhaus Institut	18
La primera Passivhaus.	
Criterios de construcción	
Resultado del “experimento”	
Certificación Passivhaus	22
Criterios de certificación	
Principios para obtener la certificación	

### **PARTE 2** **24**

---

LA MADERA COMO ELEMENTO CLAVE EN LA CERTIFICACIÓN	25
PASSIVHAUS: <i>ANÁLISIS DE LOS PRINCIPIOS PASSIVHAUS A TRAVÉS DE CASOS PRÁCTICOS.</i>	26
Aislamiento térmico	27
Cerramiento opaco vertical	
Cerramiento opaco horizontal	
Hermeticidad.	35
Eliminación de puentes térmicos.	37
Carpinterías de alta calidad.	39
Ventilación con recuperador de calor.	42
Diseño óptimo.	43
Modelización PHPP	46

CONCLUSIONES	48
--------------	----

BIBLIOGRAFÍA	54
--------------	----

### **ANEXO** **58**

---







## INTRODUCCIÓN

La arquitectura pasiva no es un concepto que se haya acuñado en la actualidad, era ya la arquitectura tradicional la que, debido a la necesidad de buscar el confort con los medios disponibles, iba evolucionando y consiguiendo una habitabilidad correcta a través de las técnicas que poco a poco iban progresando. El concepto de la inercia térmica en climas agrestes, la ventilación cruzada o forzada mediante chimeneas o la protección a la incidencia solar directa eran estrategias que ya se venían utilizando durante años en la arquitectura vernácula.

La llegada de la revolución industrial supuso un cambio en el paradigma arquitectónico. Las soluciones pasivas a los agentes climáticos pasan a ser sustituidas por sistemas activos, consiguiendo el confort en la vivienda a través de combustibles fósiles o electricidad, la cual, en gran medida, se obtenía a través de los mismos. Éste criterio viene acrecentado por el auge del sistema internacional como corriente arquitectónica, obviando por completo la eficiencia energética en pos de unos criterios constructivos basados en la estética, el funcionalismo y el bajo coste constructivo.

Será con la crisis del petróleo de la década de 1970 cuando la preocupación por el medio ambiente y los recursos naturales limitados empiece a calar en los arquitectos, pues suyo es el deber de realizar una arquitectura respetuosa para con el medio ambiente y reducir la contaminación que este sector desgraciadamente genera. Esta preocupación se vio impulsada por la inquietud hacia el cambio climático la cual quedó patente en el IV informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en el cual se afirmaba con una probabilidad superior al 90% que la causa principal del calentamiento global son las emisiones de CO<sub>2</sub>, de las cuales un tercio, como se ha mencionado antes, pertenecen al sector de la construcción. El marco global estimado para el año 2100 por el IPCC presenta un aumento de hasta 6'4°C en el peor de los casos y un incremento de 1'1°C en el caso contrario. Aun así, insiste en la importancia de no sobrepasar un aumento máximo de 2 a 2'4°C para el año 2050 para evitar importantes catástrofes medioambientales. Para poder conseguir estas predicciones, estiman que se debería reducir la emisión de gases de efecto invernadero entre un 50 y un 80% con respecto a las emisiones realizadas en el año 2007. Será la arquitectura pasiva la que dé solución a esta necesidad (Wassouf, 2014).

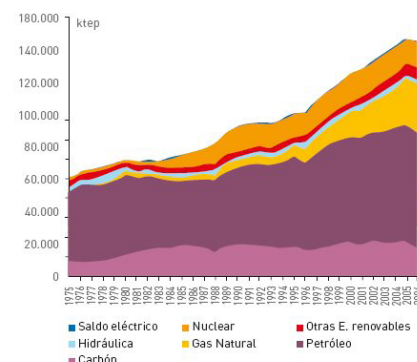


Fig. 1\_Consumo interno de energía en España (ktep) por tipo de combustibles. 1975-2006. (<http://www.observatoriosostenibilidad.com>)

Fig. 3 (izquierda)\_Vivienda en Darmstadt-kranichstein (Entrevista al Dr. Wolfgang Feist. "25 Years of Passive House", 2015)

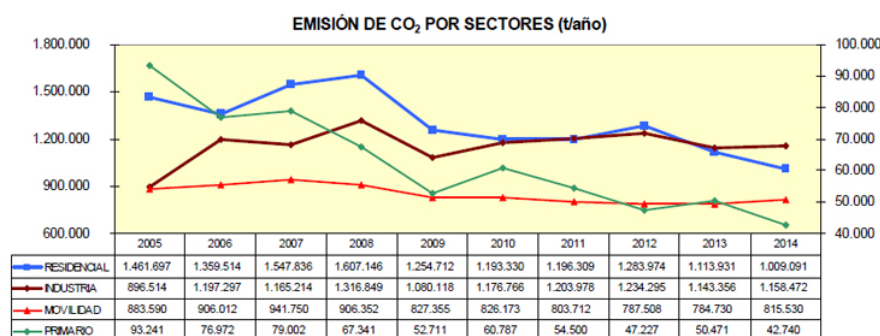


Fig. 2\_Emisiones de CO<sub>2</sub> por sectores (t/año) en Zaragoza. 2005-2014. (<http://www.zaragoza.es>)

Como respuesta a esta situación se crean diferentes normativas estatales estableciendo unos requisitos mínimos de sostenibilidad en el campo de la construcción, las cuales varían en función de la orientación política y social de cada país. La definición del concepto de sostenibilidad se basa en tres pilares: la sostenibilidad ecológica, encargada de la protección del medio ambiente, la sostenibilidad económica, que persigue el bienestar económico y su protección frente a intereses externos y la sostenibilidad social, la cual defenderá un equilibrio entre las diferentes clases sociales para conseguir una convivencia pacífica. Estas normativas se centran sobre todo en el control del consumo de las viviendas ya construidas y no tanto en el control de su construcción y materiales empleados debido a la dependencia de los sistemas políticos y la presión ejercida por la industria de la construcción. Es por ello por lo que no se definen mecanismos para sancionar productos poco sostenibles en su proceso de producción, uso o destrucción.

La Unión Europea, sin embargo, propone el Acuerdo 20-20-20 del 12/2008 del Parlamento Europeo y la "Hoja de ruta Energía 2050" de la Comisión Europea del 15/12/2011, en las cuales obliga a los estados miembros a reducir para el año 2020 un 20% la emisión de gases de efecto invernadero, un 20% el consumo de energía primaria y suplir el 20% de la demanda energética mediante energías renovables con respecto a los datos obtenidos en 1990, y a reducir en un 90% la emisión de gases de efecto invernadero para el año 2050. España, como país miembro de la misma, adopta estas nuevas medidas en el Código Técnico de la Edificación (CTE), específicamente en el Documento básico de ahorro de energía (DB-HE).

Con relación a estas propuestas y preocupaciones medioambientales surgen los estándares de construcción, los cuales, la mayoría, se centran en la limitación de consumo de energía de la edificación en su periodo de uso. Para conseguir cumplir las limitaciones impuestas los estándares ofrecen soluciones constructivas concretas, testadas en prototipos y que garantizan el cumplimiento de las limitaciones energéticas. Por último, cada estándar desarrolla su herramienta de cálculo, permitiendo a los profesionales proyectar la obra de modo que cumpla con los requisitos mínimos. Los dos estándares de construcción más importantes a día de hoy son el Passivhaus y el Minergie-ECO, ambos de carácter privado y que constituyen la vanguardia en cuanto a eficiencia energética.



Fig. 4\_ (<http://www.minergie.ch>)



Fig. 5\_ (<http://passiv.de/>)

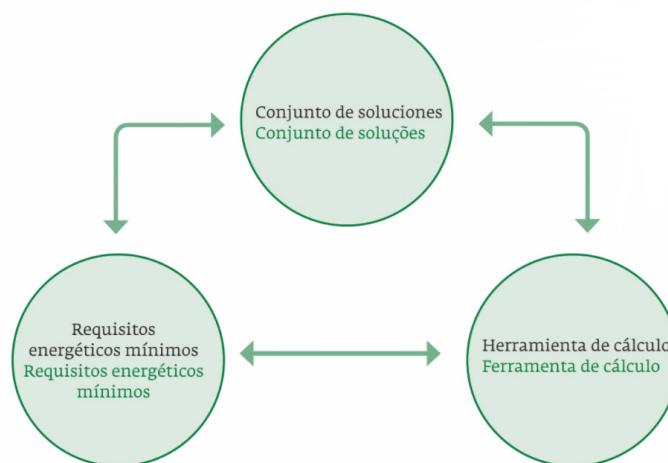


Fig. 6\_Esquema de un estándar de construcción (Wassouf, 2014)

En este contexto en el que nos encontramos la madera viene a resolver todos los problemas. La única barrera a romper es la de la tradición surgida a partir de la industrialización, la cual la había apartado estos últimos años del marco arquitectónico europeo y la había sustituido por el hormigón y el acero. Sin embargo, poco a poco, la madera va retomando la presencia que una vez tuvo, pues se están reconociendo sus grandes características mecánicas y térmicas, además de ecológicas y sostenibles. Un material que absorbe el CO<sub>2</sub> de la atmósfera mientras se produce y que es capaz de ofrecer la misma resistencia que el acero, con una estructura 16 veces más ligera, en el caso del pino, parece ser el propicio para dar solución a la arquitectura actual, una arquitectura preocupada por el medio ambiente y el ahorro energético (McLeod, 2010).

Ocurre, sin embargo, el mismo problema que ocurre en cualquier sociedad en el momento en el que un recurso que se extrae de la naturaleza cobra interés, y es su extracción y explotación indiscriminada y sin control. Hasta el siglo XIX se produjo una deforestación alarmante. Posteriormente, en el siglo XX se tomó cierta conciencia, aunque no por igual en todos los países, continuándose la tala indiscriminada en determinadas zonas. Para controlar esta práctica aparecen certificados para constatar que la madera ha sido obtenida de fuentes controladas. Los más reconocidos a nivel mundial son el FSC y el PEFC. La Unión Europea, por su parte, estableció medidas para controlar la tala indiscriminada mediante el plan de acción FLEGT (Aplicación de leyes, gobernanza y comercios forestales) a través del cual se eliminaban del mercado europeo productos procedentes de talas ilegales y el nuevo reglamento EUTR (European Union Timber Regulation) el cual prohíbe la entrada al mercado europeo a la madera obtenida de talas no controladas (Comisión Europea, 2017).

De este modo, realizando una construcción utilizando madera certificada, que cumpla con una certificación energética, estaremos realizando un proyecto sostenible, eficiente y con un impacto medioambiental muy reducido.

En este trabajo se pretende mostrar cómo diferentes viviendas en diferentes localizaciones de España han conseguido este objetivo y cómo han sido ejecutadas para dar solución a las complejidades que representa una vivienda con una muy alta eficiencia energética, obteniendo la certificación Passivhaus.



Fig. 7\_Can Tanca, Ibiza. Quinta casa en conseguir la certificación Passivhaus Premium a nivel mundial (<http://www.madera-sostenible.com>)





Fig. 8\_Mito de la cabaña primitiva (Laugier, 1999)



Fig. 9\_Piraguas monolíticas recuperadas en el valle Isola, provincia de Ferrara (Italia). Construidas a partir de la talla y extracción de material de un tronco de árbol. (www. archeobologna.beniculturali.it)

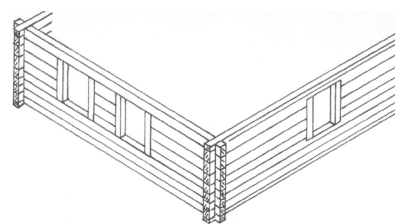


Fig. 10\_Sistema "Blockbau". (Jacobo, 2004)

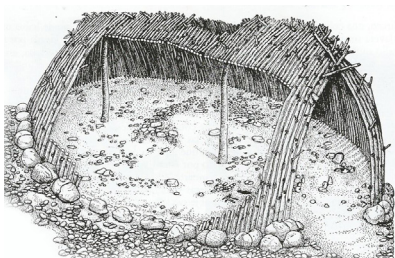


Fig. 11\_Cabaña primitiva (Kostof, 1988)

## LA MADERA COMO ELEMENTO CLAVE EN LA CONSTRUCCIÓN

La madera es un material que, junto con la piedra, guarda una relación ancestral con el hombre, ya que supusieron sus primeros cobijos, aquellas cuevas en las que el hombre primitivo se resguardaba del frío o esos lustrosos árboles que le protegían del sol abrasador o la lluvia. Elementos que desde el primer momento de su existencia les proporcionaron seguridad y de los que, lógicamente, no se han querido separar, evolucionando hasta hacerlos suyos. Es de aquí de donde surge, según Marc-Antoine Laugier en su "Essai sur l'architecture" de 1753, el primer vestigio de la arquitectura, su origen, el momento en el que "el hombre quiere una morada que le albergue, no que le entierre. Algunas ramas desgajadas que encuentra en el bosque sirven para sus fines. Elige las cuatro más fuertes y las coloca perpendicularmente al suelo para formar un cuadrado. Sobre estas cuatro apoya otras cuatro transversales; sobre estas, coloca en ambos lados otras inclinadas de modo que lleguen a un punto del centro. Cubre esta especie de techo con hojas lo bastante gruesas para protegerse del sol y la lluvia: ahora el hombre está alojado". Es de este modo a través del cual el hombre primitivo crea su propio refugio a partir del elemento que se lo había proporcionado en un primer momento, aprendiendo de su funcionamiento y haciéndolo suyo (Echaide, 1990).

Este proceso se vio beneficiado por las especiales características técnicas que tiene la madera, al ser un material muy versátil y fácilmente manipulable. Su ligereza y resistencia la hacían idónea para todo tipo de utensilios, herramientas y armas, en contraposición con la piedra, cuya dureza y peso la hacían menos práctica por sí sola, aunque muy útil cuando se aliaba con la madera. Su conocimiento fue evolucionando, aumentando su comprensión hacia ella y mejorando su forma de trabajarla y aplicarla, dando lugar así a construcciones no solamente de cabañas o refugios, sino de puentes, piraguas, templos...

### Madera y tradición

Existe una teoría que define un "Periodo de la Madera" previo a la "Edad de Piedra", sin embargo, no se han encontrado restos suficientes como para confirmarlo científicamente. Lo que sí se sabe con certeza es que ya desde los hombres de Neandertal (100.000 a 60.000 años a.C.) la madera era un material muy utilizado por ellos, encontrándose diferentes elementos materializados en ella como lo eran columnas de chozas de cazadores de Mamuts. La técnica fue evolucionando, dando lugar a diferentes concepciones de construir con madera en función de cómo era ésta utilizada, ya que podía utilizarse en la totalidad de la construcción de modo macizo o como entramado realizando la función estructural únicamente.

El sistema "Blockbau" o de madera maciza fue bastante utilizado en la antigüedad, encontrándose restos de estas construcciones palafíticas de madera en el Lago de Constanza, entre Alemania y Suiza, pero no solo se encontraron restos en esta zona, sino que se extiende a lugares de la Europa septentrional y oriental, incluso también se han encontrado restos de construcciones de estas características en Asia, Oceanía, África y América, siempre próximos a zonas geográficas con bosques de árboles de troncos largos y rectos. Por otro lado, la utilización

de la madera como únicamente estructura se remonta a la primera cabaña primitiva, cuyo primer vestigio, que data de hace unos 400.000 años, lo hallamos en el campamento de Terra Amata, cerca de Niza, Francia. Se realizaban campamentos temporales en las proximidades de la playa donde se construían refugios de forma ovalada de 8 a 15 metros de longitud y de 4 a 6 de anchura, cubiertos mediante ramas tiernas de árbol las cuales se unían en el centro y se sujetaban mediante 2 postes de madera hincados en la arena a modo de pilares en el eje longitudinal (Kostof, 1988).

Las técnicas fueron mejorando y evolucionando al tiempo que aumentaba también su conocimiento sobre el material dando así lugar a la construcción de casas mediante entramado con diagonales de madera, denominadas “Holzfachwerkhaus”. Este sistema tiene su origen, en Europa, en los pueblos germanos sobre el siglo VII, aunque también se tiene constancia de construcciones mediante este sistema en Japón previamente a las realizadas en Europa. La diferencia principal entre ambas es que, en sus inicios, las construcciones niponas rellenaban los vacíos entre maderas con papiros, mientras que las europeas, debido al clima más agreste, rellenaban los huecos con mampostería de adobe no cocido. Mediante este sistema constructivo se empezaron a entender las lógicas de la vectorización de cargas para aguantar esfuerzos en lugar de la masa muraria de las construcciones en piedra, sentando las bases tecnológicas y constructivas para el futuro estilo gótico.

También surge, en el siglo VIII en el norte de Europa, el sistema constructivo acolumnado con marco perimetral rígido, denominado “Stabbauweise”. Con este sistema los troncos se colocan verticalmente, relativamente próximos, rigidizándoles una viga-dintel superior en vez de elementos diagonales. Este sistema constructivo acompañó a los primeros inmigrantes noreuropeos al noreste del continente americano, donde se le incorporó un revestimiento exterior horizontal de tirantes para proteger el núcleo de la lluvia y nieve y sentó las bases para lo que será el sistema constructivo “Balloon Frame” (Jacobo, 2004).

En los Estados Unidos se estaba presenciando una situación diferente ya que la mano de obra cualificada no era tan abundante como lo era en Europa y había gran abundancia de materiales, de modo que rápidamente, en el siglo XIX, se extendió la industrialización de procesos complejos, cambiando de este modo la mano de obra cualificada por la mecanización. Esta tendencia se trasladó al ámbito de la construcción, haciendo que la construcción en madera pasara, de ser una artesanía llevada a cabo por mano de obra cualificada, a ser una industria. Se sustituyen las uniones en caja y espiga por cortes perpendiculares y uniones mediante clavos, creando, a partir de sencillos listones sin apenas trabajo, casas perfectamente resistentes y económicas. A este sistema constructivo se le denominó en un primer momento “Balloon Frame” a modo de mofa y se intentó modificar por “Basket Frame”, sin embargo, fue el primero el que sobrevivió a las burlas y ha permanecido hasta la actualidad. Éste sistema no pudo llevarse a cabo hasta que no se industrializó la fabricación de clavos, produciéndose de tal modo un abaratamiento en su precio. Su bajo coste y sencillez hizo que la construcción en madera mediante este método se extendiera por todos los Estados Unidos, llegando a ser usado entorno al 60-80% de todas las viviendas construidas. Por otro lado, la industrialización en Europa afectó de un modo diferente, impulsando nuevos materiales como el hormigón, el hierro y, posteriormente, el acero y dejando la madera en un segundo plano (Giedion, 2009).

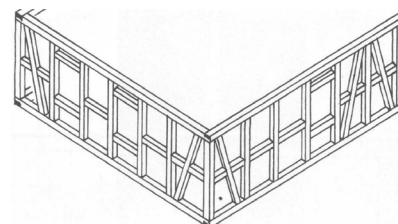


Fig. 12\_Sistema “Holzfachwerkhaus” (Jacobo, 2004)



Fig. 13\_Ejemplo de vivienda mediante el sistema “Holzfachwerkhaus” en Meiningen (<https://www.commons.wikimedia.org>)

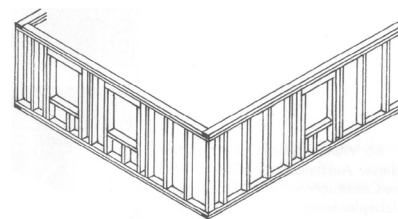


Fig. 14\_Sistema “Stabbauweise” (Jacobo, 2004)



Fig. 15\_Ejemplo de vivienda mediante el sistema “Stabbauweise” (Jacobo, 2004)

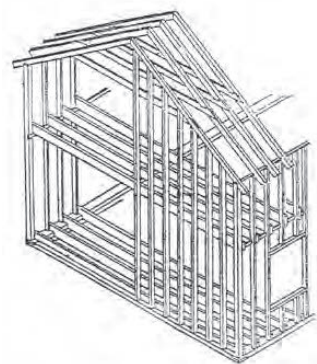


Fig. 16\_Primer representación 3D del sistema “Balloon Frame” en una publicación (Jacobo, 2004)





Fig. 17\_Casa típica medieval castellana. Covarrubias, Burgos (Jiménez-Landi, 1985)

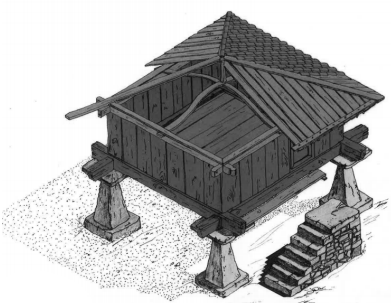


Fig. 18\_Esquema hórreo asturiano. (Cobo, Cores & Zarracina, 1986)



Fig. 19\_Viviendas en Santa Cruz de la Palma, Canarias (Jiménez-Landi, 1985)

## Tradición española

Con respecto a la tradición en la arquitectura española no se puede decir que la madera sea un material predominante, ya que ha estado presente a lo largo de toda la historia en armonía con otros materiales a través de construcciones mixtas. Sin embargo, se dan unos pocos casos en los que la madera adopta un papel más importante que en el resto de construcciones, siendo el elemento fundamental de la obra.

El primero de ellos se da en la arquitectura popular de Castilla y León, en zonas próximas a bosques en las cuales se realizaban construcciones mediante entramado de madera rellenando los vanos con mampostería, mortero, adobe o ladrillos, un sistema muy similar al que se explicaba con anterioridad, el "Stabbauweise" ya que se establecen los pilares en disposición vertical, quedando unificados a través de las vigas perimetrales y rigidizados en determinados puntos con otros pilares dispuestos en diagonal. En la zona de Asturias se dan también construcciones con esta tipología, pero con una diferencia principal, ya que en estas la planta inferior se realizaba mediante sillares de piedra, normalmente revocados en blanco, y es en la planta superior en donde se utiliza la madera como elemento estructural principal.

Otra de las tradicionales construcciones principalmente en madera realizadas en España es el hórreo asturiano, el cual se destinaba a la preservación y protección de los productos agrarios de las inclemencias del tiempo y de las alimañas. Esta función caracteriza su construcción, componiéndose de una sólida cubierta y separándose del suelo. El hórreo se distribuye en una planta cuadrada, en caso de ser rectangular se le denomina panera, y se levanta del suelo mediante cuatro pilares de piedra, elevando un cuerpo de madera cerrado, en la cual se dispone una galería en al menos una de sus caras. La estructura de la cubierta se realiza en madera, a cuatro aguas, formando una pirámide de poca altura y se la cubre con teja vana (Jiménez-Landi, 1985).

A excepción de estos casos, la arquitectura española tendrá siempre presente la madera, pero como se ha comentado al inicio, en compañía de otros materiales como lo son la piedra, el adobe y el ladrillo, desempeñando funciones estructurales en forjados y cubiertas y presente en galerías exteriores, es decir, solucionando los elementos estructurales solicitados a flexión.



Fig. 20\_Casa asturiana (<https://www.asturnatura.com>)

## Madera e industrialización

Con la llegada de la revolución industrial la madera en Europa pasó a un segundo plano, aunque no fue así en todo su territorio, ya que ésta siguió presente en los países nórdicos y aquellos centroeuropeos en los cuales abundaba, debido a que en su tradición arquitectónica estaba demasiado arraigada como para ser sustituida o modificada con tanta presteza. De hecho, en estos países se la introdujo dentro del círculo industrial, abandonando su concepción artesanal y buscando su máximo pragmatismo. Es de este modo cuando, tras la Primera Guerra Mundial, Konrad Wachsmann y Alvar Aalto empiezan a trabajar para industrias madereras en busca de la creación de un sistema prefabricado en madera para dar solución a la demanda de vivienda que la Gran Guerra había dejado tras de sí.

Mientras que Aalto no terminaba de romper con la estética tradicional en sus sistemas, los de Wachsmann, dentro de la Christoph and Unmack AG, consiguieron lograr una mayor estandarización e industrialización. Influenciado por la tradición constructiva "Blockbau" centroeuropea y la importada de Estados Unidos "Balloon Frame" y "Platform Frame", Wachsmann elaboró dos sistemas constructivos que pretendían dar respuesta a las exigencias alemanas. El primero de ellos fue el "Entramado de madera in situ" el cual aprovechaba las cualidades térmicas de la madera en envoltente para reducir el grosor y mediante travesaños verticales a interje de 50 a 55 cm levantaba la estructura al estilo "Balloon Frame", mediante secciones perpendiculares y uniones con clavos. Esto hacía que la construcción fuera en seco, rápida y económica. El otro sistema que desarrolló fue el "Método Panel", el cual daba un paso más allá en la prefabricación, eliminando el entramado y sustituyéndolo por paneles autoportantes de madera con el aislamiento ya en su interior y los acabados exteriores e interiores instalados. Estos paneles eran fabricados en la factoría y recibidos en obra, donde se instalaban directamente uniéndose mediante 4 conectores por lado y eran tapadas las aristas de unión mediante tapajuntas de madera. El sistema redujo aún más el grosor de la envoltente y eliminó la necesidad de trasdosar. Posteriormente emigró a Estados Unidos como refugiado de la Segunda Guerra Mundial, donde, junto a Walter Gropius, crearon el sistema "General Panel System", un sistema que, requería de una mayor complejidad en su fabricación y pensado, siendo un sistema estricto e inflexible en el que los módulos marcaban las dimensiones, pero que, gracias a sus complejas mecanizaciones conseguía unas uniones sencillas y rápidas mediante ganchos de resorte, consiguiendo montar y desmontar una vivienda de dimensiones medias de una planta en un solo día con la ayuda de una grúa y unos pocos operarios. Sin embargo, este sistema no triunfó debido a la falta de financiación y la oposición ejercida por el sector de la construcción tradicional no prefabricada (Fernández, 2011) (Kelly, 1951).

Estos sistemas de prefabricación y aplicación de la madera fueron el origen de lo que vendrá siendo el futuro de la arquitectura residencial en madera, adoptándose en la actualidad soluciones muy parecidas al "Balloon Frame" en entramado, realizadas in situ o prefabricadas, o estructuras a base de madera contralaminada, ofreciendo de este modo la madera aislamiento y estructura al estilo tradicional "Blockbau".

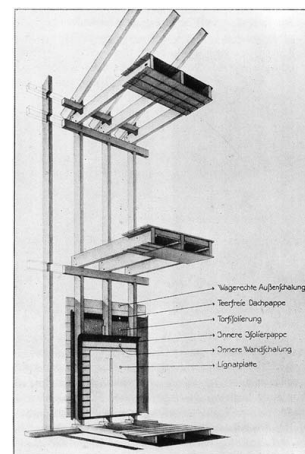


Fig. 21\_ Diagrama de la construcción del entramado de madera in situ (Fernández, 2011)

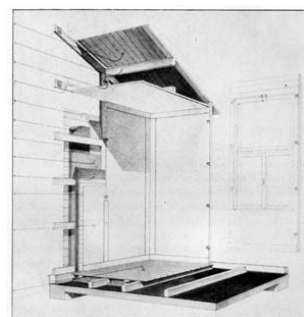


Fig. 22\_ Diagrama de la construcción del método de panel (Fernández, 2011)

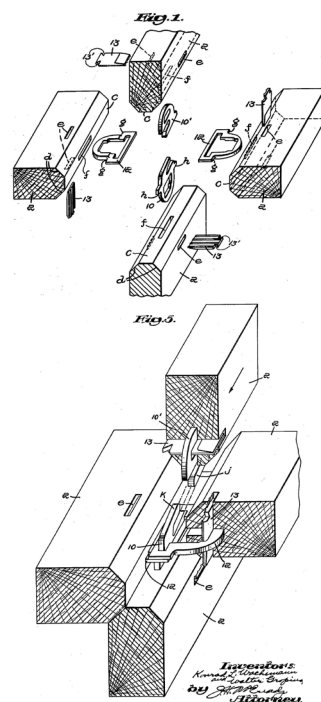


Fig. 23\_ Patente del sistema "General Panel System" (Wachsmann & Gropius, 1945)

## HACIA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Como se ha comentado en la introducción, la crisis del petróleo y, sobre todo, la preocupación creciente hacia el cambio climático, cambian el paradigma constructivo. Ya no se admite el proceso arquitectónico que se venía realizando caracterizado por un derroche energético, tanto en construcción como en mantenimiento. El marco arquitectónico tiene que decantarse hacia soluciones más pasivas, reduciendo al máximo el consumo de energía, optando por materiales sostenibles y evitando de este modo una contaminación innecesaria. Solo de esta manera se conseguirán reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que poco a poco van calentando el planeta.

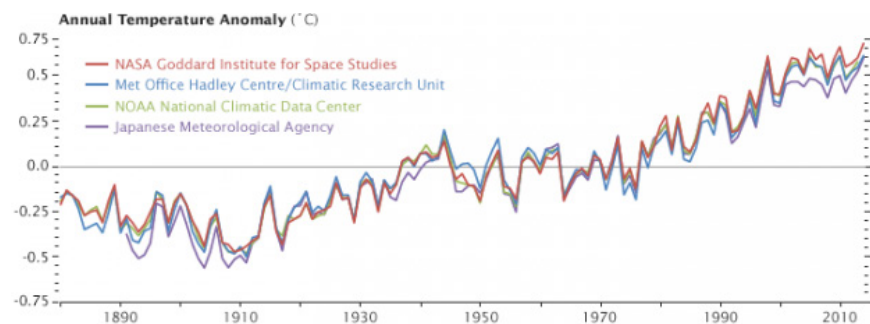


Fig. 24\_Anomalía anual de temperatura.1880-2014. (<http://www.earthobservatory.nasa.gov>)

El uso de materiales sostenibles y energías renovables es muy importante de cara a conseguir retomar un metabolismo circular, en el cual a partir de los recursos, se obtienen los productos necesarios y éstos al ser desechados, mediante el reciclado y la descomposición de los elementos naturales, se convierten nuevamente en recursos. Éste era el sistema previo a la revolución industrial, la cual trajo consigo un sistema lineal en el que se extraen los productos o energías de los recursos necesarios y los residuos no son posteriormente reaprovechables, generando un continuo gasto que no se regenera y produciendo continuamente desechos.

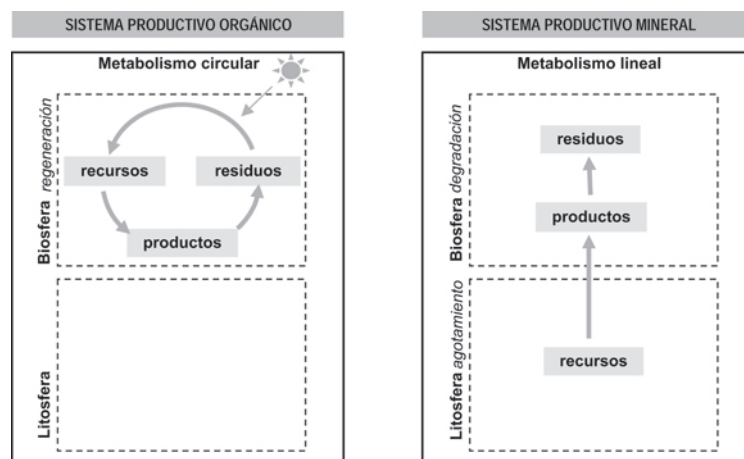


Fig. 25\_Esquema de los sistemas productivos orgánico y mineral. (<http://www.scielo.cl>)

Uno de los pasos a tomar para conseguir encaminarnos de nuevo a este sistema es la reducción de la demanda energética en la arquitectura, tanto en el proceso de producción de los materiales para su construcción como en el consumo de las obras ya realizadas y suplir en todo lo posible esa energía demandada por energías renovables. Es por ello por lo que la arquitectura pasiva viene a dar respuesta a las necesidades actuales.



## ARQUITECTURA PASIVA

La arquitectura pasiva actual retoma las bases de la arquitectura tradicional, la cual no disponía de los avances energéticos que aportaban el confort a la vivienda a través de un uso indiscriminado de energía, sino que se apoyaba en estrategias, a través de las cuales conseguía el mayor bienestar posible utilizando los recursos justos y necesarios y los reinterpreta y adapta a los medios actuales. El fin que busca una arquitectura pasiva es conseguir ofrecer el máximo confort posible como su propio nombre indica, mediante un proceso pasivo en todo lo que sea posible, sin necesidad de una dependencia total de sistemas activos como lo son calderas o sistemas de refrigeración. Sabremos la condición pasiva de una obra en función de su demanda energética para calefacción y refrigeración, la cual dependerá de los siguientes factores: las pérdidas producidas por la envolvente térmica y por la ventilación a través de la misma y las ganancias generadas a partir de la radiación solar y las producidas internamente.

Para conseguir realizar una buena arquitectura pasiva hay que tener estos conceptos presentes desde el momento de proyecto, pues será el diseño realizado por el arquitecto el encargado de dar respuesta a todos los problemas energéticos a través del control y la correcta interpretación para cada proyecto de las siguientes cualidades:

- Orientación: Elemento fundamental que vendrá condicionado por el control de la incidencia solar y la protección o exposición a los vientos dominantes del contexto.
- Incidencia solar sobre la envolvente: Controlar la calidad de los elementos que conforman la envolvente, los flujos de energía interior-exterior y la apertura de huecos. El estudio de la carta solar nos dará las claves sobre la incidencia solar en un contexto específico a lo largo de las diferentes estaciones definiendo de este modo la disposición de huecos en función de la necesidad.
- Incidencia del viento sobre la envolvente: esta cualidad depende mucho del contexto en el que se implante la obra debido a que se realizarán una disposición de huecos en función de la incidencia solar y de la necesidad de corrientes a crear en el proyecto. En un clima frío en el hemisferio norte en el que los vientos dominantes sean de componente sur habría que encontrar la justa medida en la implantación de huecos a dicha orientación para que las posibles filtraciones a través de ellos no contrarresten las ganancias térmicas debidas a la incidencia solar.
- Compacidad: la compacidad es la relación área de envolvente/volumen encerrado. Es una cualidad que tiene que estar presente en el proceso arquitectónico pero que no debe impedir su calidad intrínseca imponiendo una altísima compacidad.
- Protección solar: de vital importancia en climas como el Mediterráneo, en los cuales se dan tanto periodos muy cálidos como muy fríos. Se deben disponer elementos que protejan de la radiación solar cuando ésta no sea deseada, ya sea mediante elementos móviles como fijos.
- Reflectividad solar: Para reducir el impacto solar sobre las envolventes se puede aumentar la reflectividad de las capas exteriores, reduciendo así la absorción de energía solar incidente (Wassouf, 2014).

El proceso proyectual para llevar a cabo una Passivhaus deberá partir de un gran conocimiento de estas cualidades para realizar la mejor interpretación y diseño arquitectónico, pues solamente con una buena ejecución e integración de estos conceptos se conseguirán obtener obras con una altísima eficiencia energética.

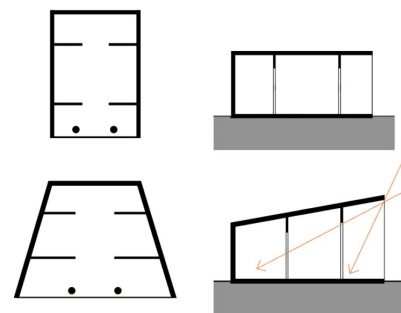


Fig. 26\_Megarón griego (arriba) y propuesta de megarón por Sócrates en el siglo IV a.C. (abajo). Se muestra una preocupación por aumentar la captación solar en meses invernales manteniendo la protección en los estivales (<http://www.energiehaus.es>)

## PASSIVHAUS INSITUT (PHI)

El Passivhaus Institut es una institución fundada en 1996 que, como estándar de construcción, ofrece su propia certificación energética Passivhaus, la cual se divide en tres categorías dependiendo del grado de eficiencia energética alcanzado: Classic, Plus y Premium.

Su objetivo es aportar las herramientas y conocimientos para poder conseguir una arquitectura pasiva, disminuyendo las demandas energéticas y favoreciendo la lucha contra el cambio climático. Esto se traduce en una gran biblioteca actualmente de obras construidas que sirven de ejemplo y un gran catálogo de soluciones constructivas vanguardistas para suplir las necesidades de confort con la mejor eficiencia posible. Además, también aporta el Passive House Planning Package (PHPP), la herramienta de diseño de balance energético para la planificación del edificio a través de la cual se obtienen todas las demandas de la obra (calefacción, refrigeración, ventilación...) y se puede proyectar en función de estos datos, para obtener los mejores resultados posibles.

El origen del Passivhaus Institut surge de la inquietud del Doctor en física Wolfgang Feist, el cual veía, al igual que otros pocos científicos, que, tras darse cuenta en los años 1970 que la era de los combustibles fósiles estaba llegando a su fin, la energía nuclear no era la mejor respuesta a suplir las altas demandas energéticas debido al riesgo que dicho proceso de fisión traía consigo. Por ello realizaron un estudio para averiguar la cantidad de energía fósil que se extraía del suelo y en qué se empleaba. El resultado mostraba que más de un tercio de toda esa gran cantidad de energía era destinada a calentar edificios por lo que el modo a actuar era sencillo, había que conseguir hacer que éstos fueran más eficientes. Hacía falta una nueva manera de construir para evitar las pérdidas energéticas y éste germen se fue desarrollando tras una charla con Bo Adamson, profesor emérito de ciencias de la construcción en la universidad de Lund (Suecia), el cual había regresado recientemente de un viaje de investigación en el sur de China donde estaba realizando una investigación sobre casas sin calefacción a las cuales se refería como Casas Pasivas, debido a que su funcionamiento térmico era llevado a cabo de forma pasiva. Esto les inspiró a profundizar en su funcionamiento y buscar un método para conseguir extrapolar estas estrategias al frío clima del norte de Europa (Entrevista al Dr. Wolfgang Feist. "25 Years of Passive House", 2015).

Estas ideas se desarrollaron y aplicaron a la vivienda para 4 familias construida en Darmstadt, situada en una parte de la ciudad que había sido reservada para la "construcción experimental de viviendas", donde la mayoría de las cuales ya estaban desarrolladas. Una de esas familias que habitarían el edificio era la del propio Doctor Wolfgang Feist, promotor y diseñador de la obra junto con la ayuda de arquitectos y asociaciones como la IWU (Instituto Alemán para la Vivienda y el Medio Ambiente) los cuales se mostraban dubitativos ante la posibilidad de que funcionara pero curiosos por hacerlo y comprobarlo, ya que se planteaba una manera diferente, "exótica", de construir y plantear un edificio el cual apenas requeriría de energía para calentarse.



Fig. 27\_Certificación Classic Passivhaus (<http://passiv.de>)



Fig. 28\_Certificación de componente apto para Passivhaus (<http://passiv.de>)



Fig. 29\_Herramienta PHPP para simulación del proyecto (<http://passiv.de>)



Fig. 30\_Vivienda en Darmstadt (Entrevista al Dr. Wolfgang Feist. "25 Years of Passive House", 2015)

## La primera Passivhaus

En 1991 se finalizó la obra que sería el germen del Passivhaus Institut, la vivienda para 4 familias en Darmstadt, la obra en la que el Doctor Wolfgang volcó todo su conocimiento e ímpetu por conseguir una vivienda que no necesitara de sistemas activos para calentarse, sino que se consiguiera simplemente con las ganancias solares y las producidas por el propio efecto de habitar. Su construcción supuso un reto ya que era un sistema novedoso y muchas de las soluciones constructivas planteadas eran nuevas para la época, por lo que debían ser desarrolladas y ejecutadas específicamente para el proyecto, lo que supondría al final de la construcción un incremento de un 50% sobre el coste de una obra similar al estilo convencional de construcción según el Departamento del Medio Ambiente de Hessen. Gracias a la estandarización de este sistema de construcción y todos los avances tecnológicos en el campo de la arquitectura, este sobrecoste ha ido reduciéndose, siendo en 2010 de un 8% aproximadamente y menos de un 5% en el último estudio realizado por Passipedia en 2015 (<http://passipedia.org>).

Para comprobar el correcto funcionamiento del edificio y si éste respondía como se esperaba se instalaron en obra cientos de sensores de alta precisión, los cuales monitorizarían el edificio y ratificarían las ideas y conceptos energéticos del Doctor Wolfgang.

## Criterios de construcción

La idea base de esta primera casa era la conservación de la energía, por lo que el diseño y la construcción responderá principalmente a esa necesidad, solucionándose mediante el aislamiento térmico y la ventilación con recuperador de calor. Además, añadiendo sistemas de captación solar para suplir la necesidad del agua caliente sanitaria y la inclusión de un pozo canadiense para la inserción de aire exterior fresco precalentado, se consiguen unas menores necesidades energéticas para conseguir un adecuado confort térmico y ambiente saludable.



Fig. 32\_Fachada sur. Aleros y persianas exteriores venecianas para evitar ganancias solares indeseadas (<http://passiv.de>).

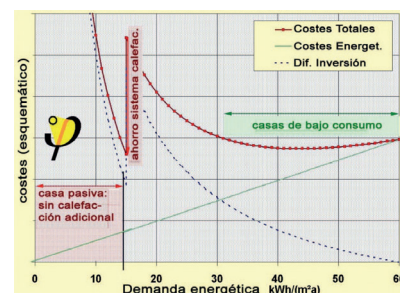


Fig. 31\_Gráfica coste de construcción en función de la demanda energética final (Martínez, 2017).



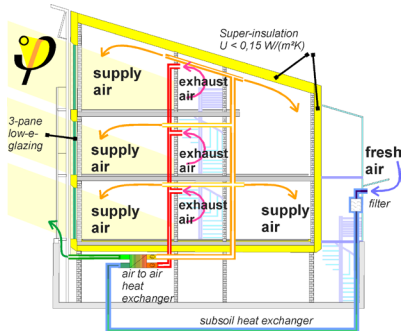


Fig. 33\_Esquema funcionamiento de la vivienda (<http://passiv.de>).



Fig. 34\_Estructura para protección solar (<http://passiv.de>).



Fig. 35\_Recuperador de calor. Diseñado expresamente para este proyecto (<http://passiv.de>).

A continuación, se detallan las soluciones adoptadas para los diferentes elementos constructivos:

- Cubierta ajardinada: Compuesta por humus, lámina geotextil, aglomerado de 50 mm sin formaldehído, entramado ligero de madera realizado mediante vigas de madera y tableros de fibra de alta densidad y relleno con lana de roca (445mm), capa de polietileno hermética al aire, placa de yeso de 12.5 mm, lámina de fibra de madera y revestimiento de pintura. Con esta solución en cubierta se obtiene un valor de transmitancia térmica ( $U$ ) de  $0.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , un valor muy inferior al máximo que establece el Código Técnico de la Edificación (CTE DB-HE) para una zona climática E (la más desfavorable) cuyo valor límite es de  $0.35 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- Envolvente opaca: Revestimiento exterior reforzado con tela; 275 mm de poliestireno expandido (EPS) (150+125 mm), 175 mm de mampostería de ladrillo, 15 mm de acabado interior continuo de yeso, lámina de fibra de madera y emulsión de pintura. Transmitancia térmica obtenida ( $U$ )  $0.14 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Al igual que en la solución de cubierta, aquí se consigue un valor muy inferior al que marca la legislación española, siendo éste un valor máximo de  $0.55 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- Techo de sótano: Revestimiento de yeso reforzado con fibra de vidrio, aislamiento térmico 250 mm de poliestireno, 160 mm de hormigón, aislamiento acústico 40 mm de poliestireno, 50 mm de acabado de suelo de cemento, 8-15 mm de parquet, adherido mediante adhesivo libre de disolventes. Transmitancia térmica ( $U$ )  $0.13 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- Envolvente transparente (carpinterías): Hoja triple vidrio bajo emisivo con relleno de Krypton. Transmitancia térmica del vidrio ( $U_g$ )  $0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Carpintería en madera y unión de la misma a la envolvente mediante espuma de poliuretano. Valor de transmitancia final ( $U_w$ )  $0.7 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Valor de referencia en España según los criterios explicados anteriormente,  $2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- Ventilación con recuperador de calor: Instalación de intercambiador de calor a contraflujo alojado en el sótano (aproximadamente  $9^\circ\text{C}$  en invierno) correctamente sellado y aislado con una eficiencia aproximada del 80% (<http://passipedia.org>)(<http://passiv.de>).



Fig. 36\_Fachada norte. Galería acristalada. Captación solar por cubierta, precalentando el aire de acceso al interior a través del intercambiador (<http://passiv.de>).

## Resultado del “experimento”

Mediante estos sistemas constructivos y su correcta ejecución se consigue un valor de hermeticidad al aire a través del test Blower Door de  $0.3 \text{ h}^{-1}$ . Este test consiste en la medición de filtraciones de aire que tiene el edificio cuando se le somete a una diferencia de presión de 50 Pascales. Además, mediante las fotos termográficas se aprecia que el edificio está libre de puentes térmicos.

Estas características, unidas a que la producción de agua caliente sanitaria (ACS) se supla en un 66% por la energía solar mediante colectores solares de tubos de vacíos (más eficientes que las placas solares térmicas) hace que el consumo energético de la vivienda sea muy reducido, ya que es el ACS una de las principales demandantes de energía. La energía restante para conseguir el agua caliente sanitaria se obtiene mediante gas natural. Debido al afán por conseguir la mínima demanda energética, la red de distribución fue diseñada para ser lo más compacta posible, dentro de la envolvente térmica y bien aislada, para evitar al máximo las posibles pérdidas.

Sabían que la vivienda iba a tener una alta eficiencia energética, pero no sabían cuánto, por lo que no se arriesgaron a eliminar los radiadores del proyecto, sin embargo, la experiencia que ofreció esta obra y futuras con el mismo criterio constructivo demostraron que la demanda energética en invierno era inferior a  $10 \text{ W/m}^2$ , una cantidad fácilmente suministrable a través del sistema de ventilación. Posteriormente, en el año 2002, se realizaron las simulaciones con la herramienta Passive House Planning Package (PHPP), a través de las cuales se obtenían unos valores de demanda energética para calefacción de  $10.5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ , un valor muy próximo a los que se obtuvieron de las mediciones del edificio una vez terminado, demostrando la fiabilidad de la herramienta y el perfecto comportamiento del edificio al paso del tiempo. Además, se realizó otra simulación para una vivienda realizada según la normativa energética alemana con la misma herramienta, arrojando un valor de  $58 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ , casi 6 veces mayor que el conseguido en la passivhaus de Darmstadt.

Amory Lovins, el pionero estadounidense en eficiencia energética, contribuyó a la transformación del concepto de casa pasiva de experimento a práctica. Tras su visita a la vivienda en 1995 declaró: “No, this is not just a scientific experiment. This is the solution. You will just have to redesign the details in order to reduce the additional costs – and that will be posible, I am convinced”.

Para conseguir cumplir la recomendación de Lovins en 1996 se creó el “Research Group for Cost-efficient Passive Houses”, el cual pretendía expandir el concepto Passivhaus haciéndolo asequible, dotando de herramientas a los profesionales (son ellos los encargados de crear el Passive House Planning Package (PHPP) con el cual se consiguen realizar las simulaciones energéticas del proyecto para conseguir la eficiencia necesaria para ser una vivienda pasiva) y generando proyectos piloto, aumentando así la experiencia en este campo y consiguiendo que las soluciones constructivas que una vez fueron ejecutadas específicamente para la vivienda en Darmstadt, pasen a ser soluciones estándar en el mercado (<http://passipedia.org>)(<http://passiv.de>).

Éste es el origen del Passivhaus Institut, el cual se ha convertido en el centro de referencia a nivel mundial en el sector de la construcción pasiva.

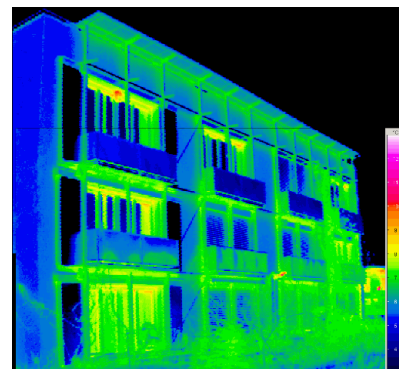


Fig. 37\_Termografía de la fachada norte. Se aprecia cómo la envolvente está prácticamente libre de puentes térmicos. (<http://passiv.de>)

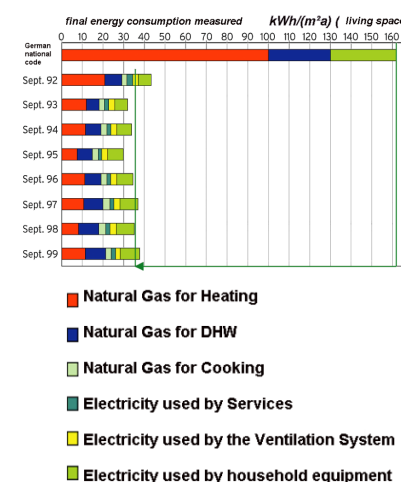


Fig. 38\_Gasto de energía de vivienda según el Código Nacional Alemán (primer valor), historial de consumo de la vivienda para 4 familias en Darmstadt. Sept 1992 - Sept 1999 (<http://passipedia.org>).

## CERTIFICACIÓN PASSIVHAUS

### Criterios de certificación

Tras la construcción de la primera casa en Darmstadt y otras obras con los mismos criterios en las cuales se consiguieron también unos valores energético extraordinarios, fueron asentando las bases de este experimento aplicado a la práctica y formando este nuevo estándar de construcción, avalado por la experiencia.

El Passivhaus Institut establece 5 criterios a cumplir para obtener la certificación los cuales son:

- Una demanda de calefacción inferior o igual a  $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .
- Una demanda máxima de refrigeración de  $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  en climas secos. En húmedos el valor es más flexible, siendo un valor máximo de  $18 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  para el caso de Barcelona.
- La demanda de energía primaria no debe ser superior a  $120 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ , por lo que todos los elementos que requieran de una solicitud energética en la vivienda deben ser lo más eficientes posibles para conseguir un muy bajo consumo global.
- La hermeticidad del edificio al aire para una diferencia de presión de 50 pascales no puede ser superior a  $0.6 \text{ h}^{-1}$ .
- Tiene que garantizarse un confort térmico para todas las estancias de la vivienda tal que solamente un 10% de horas al año la temperatura supere los  $25^\circ\text{C}$ .

Además de estos criterios a cumplir para conseguir la certificación Passivhaus, desde mayo de 2015 se han añadido dos criterios más a la ecuación, dependiendo de los cuales se conseguirán diferentes clases dentro de la certificación Passivhaus, como se ha comentado al inicio del capítulo. Estos criterios son la demanda de energía primaria renovable (EPR) y la generación de energía primaria renovable. Categorías:

- Passivhaus Classic: Demanda de EPR  $< 60 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$ .
- Passivhaus Plus:
  - Demanda de EPR  $< 45 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$ .
  - Generación de EPR  $> 60 \text{ kWh}/\text{m}^2$  de terreno  $\cdot \text{a}$ .
- Passivhaus Premium:
  - Demanda de EPR  $< 30 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .
  - Generación de EPR  $> 120 \text{ kWh}/\text{m}^2$  de terreno  $\cdot \text{a}$ .

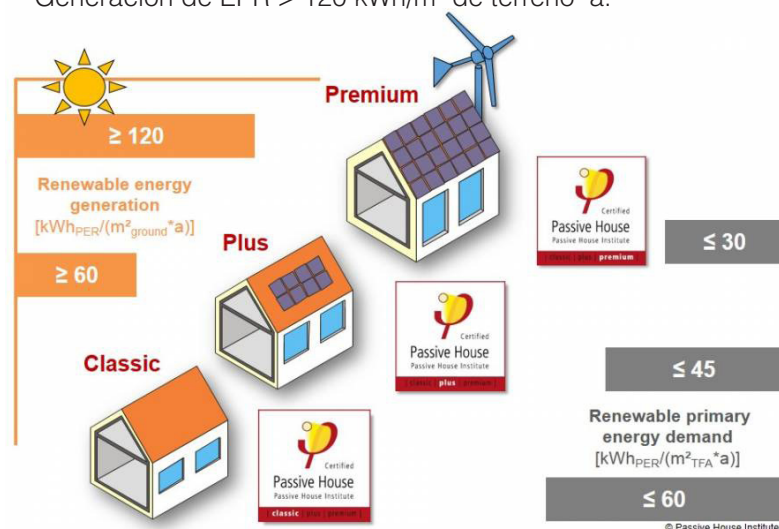


Fig. 39\_(<http://passiv.de>).

## Principios para obtener la certificación

El Passivhaus Institut define 5 principios básicos a partir de los cuales, si son correctamente ejecutados, se puede conseguir la certificación Passivhaus. Estos principios son:

- Gran cantidad de aislamiento: Para conseguir una construcción de alta eficiencia energética uno de los puntos principales a seguir es la realización de una muy buena envolvente térmica, con espesores de aislamiento que duplican o incluso triplican los utilizados generalmente en la construcción habitual española.
- Hermeticidad y estanqueidad: La correcta ejecución de la obra, ayudada de la inclusión de láminas y bandas herméticas al aire permiten controlar la hermeticidad del proyecto, evitando de este modo infiltraciones indeseadas y, por tanto, pérdidas energéticas.
- Eliminación de puentes térmicos: Es muy importante controlar los encuentros entre elementos constructivos y las zonas en las que se producen cambios de material para conseguir una envolvente térmica continua evitando así puntos por los que se produzcan pérdidas o ganancias indeseadas.
- Carpinterías de alta calidad y eficiencia: Siendo los huecos uno de los puntos críticos en toda construcción, es de vital importancia solucionarlos con la mejor ejecución posible y los elementos de mayor calidad, evitando cualquier filtración y consiguiendo unas transmitancias muy bajas a través de carpinterías de alta calidad y acristalamientos dobles o triples entre los cuales se pueden incorporar gases nobles para mejorar aún más su resistencia térmica.
- Ventilación mediante recuperador de calor: el criterio Passivhaus establece unas renovaciones mínimas de  $0.3 \text{ h}^{-1}$ , por lo que, al ser la casa estanca, tiene que realizarse una ventilación del proyecto a través de un sistema de ventilación forzada mediante recuperador de calor, de tal modo que el aire fresco introducido es precalentado por el viciado que se expulsa, minimizando de este modo al máximo las pérdidas energéticas producidas por la ventilación.

Además de estos 5 principios, se deben añadir dos más para conseguir que la vivienda sea lo más eficiente posible, los cuales son:

- Diseño del proyecto para la optimización de las ganancias solares y del calor interior: tal y como se había explicado en el apartado anterior "Arquitectura Pasiva", el diseño del proyecto es primordial para conseguir el confort en la vivienda con el menor gasto energético posible.
- Modelización energética de ganancias y pérdidas mediante la herramienta PHPP: mediante la modelización y simulación del proyecto con ésta herramienta se podrá calcular y predimensionar todos los elementos constructivos de tal modo que se realice el proyecto del mejor modo posible, eliminando puentes térmicos y utilizando las cantidades correctas de material.

Mediante el correcto seguimiento de estos principios a la hora de realizar el proyecto se garantiza el perfecto comportamiento térmico del edificio, consiguiendo unas demandas energéticas muy bajas, una habitabilidad perfecta con un alto nivel de confort y cumpliendo con los criterios del Passivhaus Institut, consiguiendo, de este modo, su certificación. (Wassouf, 2014).





PARTE 2



## LA MADERA COMO ELEMENTO CLAVE EN LA CERTIFICACIÓN PASSIVHAUS

En la actualidad nos encontramos con gran variedad de construcciones con la certificación Passivhaus emplazadas en diferentes puntos del planeta, aunque está claro que Alemania sigue en cabeza, seguido de cerca por Inglaterra. Sin embargo, en este análisis nos interesa centrarnos en las viviendas construidas en territorio español, debido a las diferencias climáticas existentes entre España y Alemania, país donde se creó el Passivhaus Institut y que tuvo de referencia a la hora de plantear los principios a seguir para cumplir con los criterios energéticos máximos. Es por ello por lo que estos principios deberán ser interpretados y aplicados correctamente al clima español para garantizar el perfecto funcionamiento energético de la vivienda.

Además, tal y como se viene presentando en el trabajo, interesan especialmente aquellas obras en las que la madera sea el elemento principal en la construcción de las viviendas, consiguiendo así, a parte de una altísima eficiencia energética, un impacto medioambiental muy bajo, las mínimas emisiones de CO<sub>2</sub> necesarias para su construcción y mantenimiento y un alto grado de sostenibilidad al utilizarse maderas certificadas.

Para realizar el estudio se analizan viviendas que han obtenido la certificación Passivhaus y cuyo material principal de construcción es la madera y se estudia cómo estas obras dan solución a los diferentes principios planteados por el Passivhaus Institut:

- Aislamiento térmico.
- Hermeticidad.
- Eliminación de puentes térmicos.
- Carpinterías de alta calidad.
- Ventilación mediante recuperador de calor.
- Diseño para optimizar las ganancias solares.
- Modelización energética de ganancias y pérdidas mediante la herramienta PHPP.

Se eligen 6 viviendas que se ajusten a los criterios constructivos mencionados anteriormente y que estén situadas en diferentes puntos geográficos del marco español, intentando abarcar todos los climas que se pueden dar a nivel nacional. De este modo se pretende analizar e interpretar las decisiones de los arquitectos para extrapolar los criterios impuestos por el Passivhaus Institut al clima español, mucho más variado que el alemán, ya que nos encontramos con zonas templadas, en las que con una solución de envolvente menos eficiente que la adoptaba en la vivienda de Darmstadt se consiguen mantener unos valores de demanda energéticas por debajo del impuesto por el estándar constructivo, además de la existencia de zonas más frías, en las cuales será necesario conseguir unos valores inferiores de transmitancia para poder cumplir con los requisitos.

Para realizar el análisis se presenta primero la solución aportada por la primera vivienda que marcó el camino del Passivhaus Institut, la vivienda para 4 familias en Darmstadt y posteriormente se estudia cómo estas viviendas, tomadas como ejemplo, dan solución a dichos requerimientos teniendo en cuenta el clima en el que se insertan.

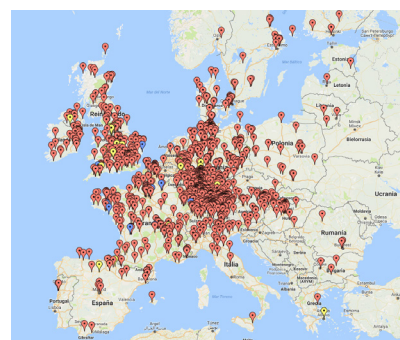


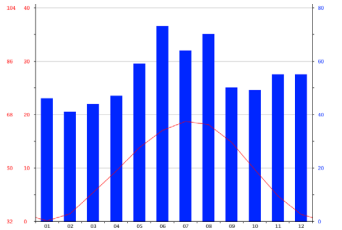


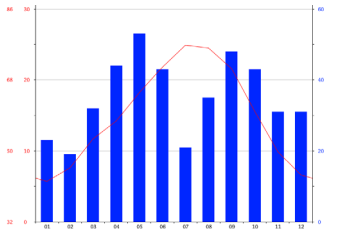


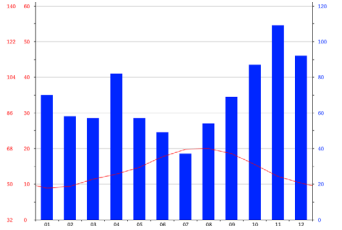


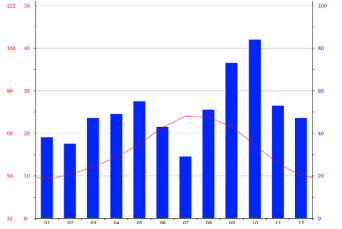


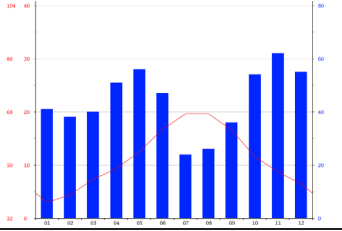


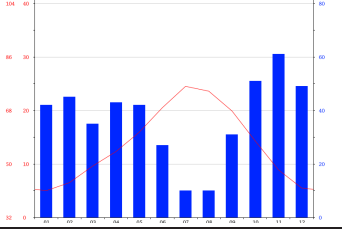


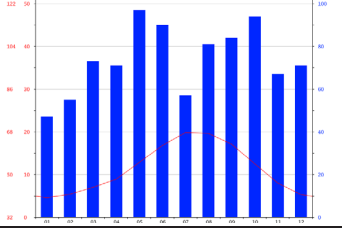


Fig. 40 - 41\_ Mapa de viviendas Passivhaus Mundial y Europeo ([www.database.passivehouse.com](http://www.database.passivehouse.com))

Fig. 42 (Izquierda)\_Vivienda EntreEncinas (<https://www.plataformaarquitectura.cl>)

# ANÁLISIS DE LOS PRINCIPIOS PASSIVHAUS A TRAVÉS DE CASOS PRÁCTICOS

Darmstadt			
Bunyesc			
EntreEncinas			
PassivPalau			
El Plantío			
Rivas Passivhaus			
Estrella dels Vents			

## Aislamiento térmico

El Passivhaus Institut recomienda la instalación de un espesor de aislamiento que generalmente suele duplicar o incluso triplicar las dimensiones a utilizar para satisfacer las normativas estatales, dándose valores de transmitancia de la envolvente térmica de 0.1 a 0.15 W/m<sup>2</sup>K lo que se traduce en un grosor de aislamiento de entre 25 a 40 cm. Éstos son valores que se aplican a construcciones en climas fríos como son en la zona de Centroeuropa, sin embargo, para climas más moderados no es necesaria la inclusión de tanto aislamiento para conseguir una transmitancia tan baja, ya que al ser menor la diferencia de temperatura interior-exterior, con una transmitancia ligeramente mayor se siguen cumpliendo los máximos de demanda energética para calefacción y refrigeración. Sin embargo, la reducción de diferencia térmica que hay en invierno suele ir acompañado por un incremento en la variación de temperatura interior-exterior en verano, lo cual unido a la más agresiva incidencia solar, hace que haya que tener en cuenta este factor a la hora de calcular las transmitancias para cumplir con el máximo de demanda energética para refrigeración. Además, las cubiertas deberán disponer de una cantidad mayor de aislamiento debido a la mayor incidencia solar en verano en los planos horizontales que en los verticales.

### Cerramiento opaco vertical

En la vivienda en **Darmstadt** se soluciona el aislamiento térmico en la envolvente vertical opaca mediante la suma de una capa de ladrillo de 175mm y dos capas de aislamiento EPS con un grosor total de 275mm (150+125mm), lo que da un espesor de 450mm. Añadiéndole el resto de capas del muro, éste obtiene un valor total de transmitancia térmica  $U=0.14$  W/m<sup>2</sup>K, un valor muy reducido, no solamente con respecto al resto de viviendas que se construían en la época sino también con las que se construyen hoy en día. Incluso es inferior que todas las viviendas Passivhaus que analizamos a excepción de una, la vivienda Estrella dels Vents, la cual cuenta con una transmitancia en sus cerramientos exteriores de 0.127 W/m<sup>2</sup>K. Lo comentado en el párrafo anterior se muestra si observamos los valores de transmitancias y los climogramas, advirtiéndolo cómo las viviendas **Estrella dels Vents, el Plantío y Rivas** obtienen valores más bajos de transmitancias al mismo tiempo que sus temperaturas medias son inferiores que el resto de ejemplos. Por otro lado, la vivienda **PassivPalau** también dispone de un valor de transmitancia moderadamente bajo, debido en este caso a las temperaturas veraniegas y al impacto solar.

Para conseguir estos valores de transmitancias en la envolvente opaca las viviendas optan por diferentes soluciones utilizando la madera como elemento principal, haciendo cerramientos mediante entramado ligero o pesado relleno con aislamiento o mediante madera en bruto utilizando paneles de madera contralaminada y, posteriormente, se coloca el aislamiento. Con estos proyectos y soluciones se muestra la evolución de los sistemas “Balloon Frame” y “Blockbau” explicados anteriormente.

Material	Conductividad térmica ( $\lambda$ ) W/(m·K)
Ladrillo	0.80
EPS	0.04
OSB	0.13
Celulosa	0.039
Neopor®	0.032
Lana de roca	0.034
Fermacell	0.32
Madera contralaminada	0.13
Aislamiento fibras de madera	0.038
Lana de oveja	0.043
Paja	0.055
Corcho	0.05
PVC	0.18

Fig. 43\_ Conductividad térmica de materiales componentes de las viviendas analizadas (Elaboración propia)

Fig. 44 (Izquierda)\_Presentación de viviendas analizadas. Ubicación y climograma (Elaboración propia. Fuentes: <https://www.google.es/maps> - <https://www.plataforma-pep.org> - <https://es.climate-data.org>)



### Entramado ligero

La vivienda **PassivPalau** ofrece una solución de entramado ligero de 145mm de espesor al que se le aplica un aislamiento insuflado de celulosa en el interior del entramado y también en el trasdosado de 70mm y un SATE (Sistema de Aislamiento Térmico Exterior) conformado por 60 mm de Neopor® (Poliestireno expandible con mejores propiedades térmicas que el EPS).

Este sistema utilizado aprovecha la sencillez del sistema de entramado ligero con la modulación, permitiendo la fácil prefabricación de los módulos, abaratando costes tanto en producción, al ser ejecutado en taller, con una atmósfera controlada, como en instalación, ya que es un sistema en seco, disminuyendo los tiempos de construcción y siendo un proceso más sencillo.

Los paneles estructurales se construyen mediante montantes verticales que se unen entre sí gracias a los travesaños y dinteles y se solidariza toda la estructura a través de los paneles OSB a ambas caras, aportando la rigidez necesaria. La sencillez de este sistema se acrecienta al ser todo uniones de secciones perpendiculares y anclados mediante clavetería. Estos paneles se colocan sobre un durmiente el cual apoya sobre la solera de hormigón y se protege de las humedades mediante una lámina EPDM, evitando de este modo su contacto directo y las patologías que ello podría conllevar. Para evitar el puente térmico que se produciría a través de la solera se instala una capa de aislamiento de celulosa sobre ella, cerrando así la línea de aislamiento y eliminando cualquier puente térmico que se podría producir. Gracias a la baja conductividad de la madera hace que sea muy fácil controlar los puntos críticos y se evitan con facilidad las pérdidas energéticas a través de puentes térmicos.

Una vez instalados los paneles estructurales se les insufla la celulosa, y se instala el trasdosado, compuesto por otra capa de celulosa y 2 placas de pladur PPF. Al exterior se instala el SATE compuesto por 60mm de Neopor® y, dependiendo de la fachada, se le aplica un revoco o una fachada ventilada mediante lamas de madera.

El resultado final de esta solución constructiva en cerramiento se traduce en un valor de transmitancia de solamente 0.146 W/m²K.

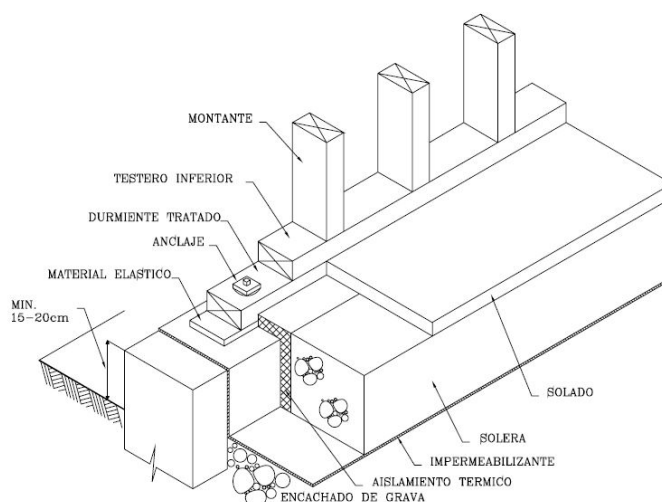


Fig. 48\_Detalle de unión sistema de entramado ligero con terreno y solera (<https://www.maderascasais.com>)



Fig. 45-47\_Proceso montaje del cerramiento horizontal, entramado ligero prefabricado, vivienda PassivPalau (<http://www.papik.cat>)

### Entramado pesado

Con bastante similitud en el concepto se presenta la solución por la que se opta en la Passivhaus **Estrella dels Vents**, en la cual se realiza una envolvente mediante entramado en madera, pero, en este caso, pesado. Las diferencias principales que se dan entre el entramado ligero y el pesado es en las dimensiones de los montantes, siendo en éste último mayores y en los sistemas de anclaje. Mientras que el sistema de entramado ligero soluciona las uniones mediante clavetería, en los nudos y conexiones del entramado pesado se realizan, gracias en parte a su mayor sección, a través de ensambles, los cuales han ido evolucionando y haciéndose más sofisticados para conseguir un mejor anclaje y una mayor superficie de contacto. El tipo más común de ensamble es el de caja y espiga, aunque como veremos, en la vivienda Estrella dels Vents las uniones entre montantes y travesaños se realizan mediante ensambles de cola de milano, ofreciendo un mejor anclaje al ser más restrictivo que la unión caja y espiga. Además, a los ensambles se les puede mejorar su comportamiento de unión mediante la inserción de clavijas de maderas más duras.

Para un perfecto encaje y solapamiento, todos los módulos de los que se compone la envolvente de la vivienda Estrella dels Vents son diseñados y prefabricados, de tal modo que, en primer lugar, se mecanizan todas las maderas que formarán el entramado mediante corte numérico, consiguiendo así unos ensambles muy exactos, con tan solo 2mm de tolerancia. Tras ser numeradas se procede al montaje en taller de todos los módulos, consiguiendo un mayor control que si se hiciera a pie de obra y evitando las inclemencias atmosféricas. En este caso en particular cobra especial interés el montaje en taller debido a la utilización de paja como material aislante en el interior del entramado (360mm), ya que cualquier humedad que pudiera entrar provocaría la putrefacción del material. Para evitarlo las balas de paja se encapsulan entre montantes y se procede al cerramiento mediante paneles OSB por la cara interior y paneles de fibra de densidad media (MDF) al exterior, los cuales cierran herméticamente el interior gracias a la incorporación de bandas de corcho entre los paneles y la estructura que ajustan el cierre al ser comprimidas por ellos.

Para reducir aún más la transmitancia de la envolvente se incorpora un trasdosado conformado por 80mm de lana de roca y una placa de Fermacell (fibra de yeso) de 12.5mm que servirá como base del acabado. Este trasdosado será el encargado de alojar las instalaciones, evitando así cualquier perforación y ruptura de la estanqueidad del interior del entramado y las patologías que esa acción podría conllevar en la paja.

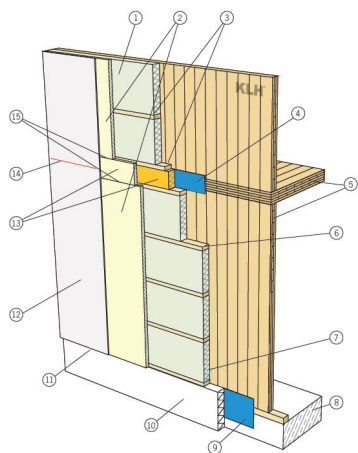
Al exterior se cubren todos los módulos con una lámina impermeabilizante y hermética y se instalan rastreles de madera para la colocación de la fachada ventilada, la cual se realiza en unas caras mediante lamas de madera y en otras mediante aplacado de piedra.

Tras la instalación de todos los componentes la transmitancia del muro se queda en un valor de  $0.127 \text{ W/m}^2\text{K}$ , consiguiendo así el más bajo de todos los casos de estudio, además de una emisión de  $\text{CO}_2$  por parte de los materiales muy baja, debido a su carácter natural y respetuoso con el medio ambiente y a la escasa energía embebida que poseen.



Fig. 49-55\_Proceso construcción y montaje de los paneles de entramado pesado prefabricado, vivienda Estrella dels Vents (<http://www.facebook.com>)





- ① Aislamiento blando entre los listones de madera
- ② Adaptar la capa de soporte del revoco a la distancia entre listones
- ③ Listones de madera conforme a los requisitos estáticos. Prestar atención a las cargas verticales (tanto el revoco como las capas de soporte de revoco son relativamente pesadas) y a la succión del viento
- ④ Sellar los encuentros de forjado, o bien sellar convenientemente las juntas entre los componentes KLH, conforme a las características de permeabilidad al vapor del material de revoco
- ⑤ Tableros de muros y forjados KLH de acuerdo con los requisitos estáticos
- ⑥ Listones como base para el soporte del revoco. En caso necesario, colocar un 2.º nivel de listones (casas pasivas)
- ⑦ Disponer uniones atornilladas en diagonal ya que las capas de revoco son relativamente pesadas
- ⑧ Base de hormigón
- ⑨ Sellar también las juntas en la zona de transición hasta el hormigón; el sellado se enlazará con el sistema de impermeabilización del hormigón
- ⑩ Aislamiento del zócalo conforme a los requerimientos; por ejemplo, aislamiento de XPS en la zona de salpicadura de agua
- ⑪ Proteger los bordes con perfiles adecuados (según el sistema de revoco)
- ⑫ Adaptar la configuración de capas del muro a la permeabilidad al vapor del revoco.
- ⑬ En caso de montaje prefabricado, completar in situ la capa de aislamiento y el soporte de revoco
- ⑭ Prever una posible junta de asiento en la zona del techo
- ⑮ Rellenar las juntas entre las placas de soporte de revoco de forma que queden bien ajustadas. Esto reducirá la posibilidad de que se formen asentamientos.

Fig. 56\_Esquema envolvente mediante paneles contralaminados (KLH, 2013)



Fig. 57-59\_Construcción vivienda el Plantío (<http://www.sergiotorre.es>)

## Madera contralaminada

La evolución de la técnica inicial de las construcciones que seguían el sistema “Blockbau” ha dado lugar a la solución de viviendas mediante paneles de madera laminada o contralaminada. Un ejemplo que aplica este sistema en la envolvente opaca es la vivienda **el Plantío**, la cual goza de uno de los valores más bajos de transmitancia térmica de entre las viviendas estudiadas,  $0.155 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Los tableros macizos de madera contralaminada ofrecen una gran resistencia y ejercen de muros de carga, permitiendo realizar una estructura más liviana, de tan solo 10cm de espesor, al mismo tiempo que sirve ligeramente como aislante, debido a que la madera tiene una conductividad térmica de  $0.13 \text{ W/mK}$ , un valor muy inferior al de la cerámica de los ladrillos,  $0.8 \text{ W/mK}$ .

El interés por la realización de una casa pasiva con un gasto ínfimo de energía suele ir de la mano de una concienciación sobre el medio ambiente. Se evidencia en esta vivienda en la elección del material estructural, madera obtenida de bosques de tala controlada con certificado PEFC, garantizando un balance de  $\text{CO}_2$  positivo al ser procedente de explotaciones sostenibles. También se muestra en la decisión de utilizar como aislante fibra de madera (20cm) en la cara exterior del muro, mucho más sostenible y reciclable que cualquier poliestireno. Esto unido a la prefabricación y la obra en seco permite un ahorro adicional de agua, una reducción de residuos y, por tanto, un reciclaje más sencillo. Ésta será la solución adoptada en la fachada que da al espacio interno de la vivienda, realizando una fachada ventilada mediante lamas de madera. Por otro lado, la fachada principal ejecuta su cara superficial mediante ladrillos macizos, manteniendo así la relación con el contexto.

La instalación de estos paneles en la solera se realiza mediante un durmiente el cual, separado por una lámina impermeable para evitar humedades y, por tanto, la putrefacción del material, se ancla a la estructura horizontal. Sobre el durmiente se coloca una banda de sellado y los paneles de madera contralaminada. Los paneles se encajan entre sí y adoptan la rigidez mediante su unión en ángulo.

El muro resultante consta, finalmente, de la siguiente distribución de interior a exterior: Una placa de yeso laminado de 13mm, una placa de madera contralaminada de 100mm, barrera de vapor, 200mm de aislamiento de fibra de madera, lámina hermética al viento, pero transpirable a la humedad y cobertura final mediante fábrica de ladrillo de 70mm, obteniendo un valor de transmitancia térmica de  $0.155 \text{ W/m}^2\text{K}$ .



Fig. 60\_Colocación de paneles de madera contralaminada KLH sobre la solera en la vivienda el Plantío (<https://www.plataforma-pep.org>)

### Cerramiento opaco horizontal

El tratamiento de la cubierta y su correcta ejecución y concepción tiene una muy alta influencia en la eficiencia del edificio debido a que, en climas con veranos cálidos, como lo son en muchos territorios de España, el impacto solar que recibe es mucho mayor en verano que en el resto de la envolvente. Es por ello por lo que los cerramientos opacos horizontales suelen tener un valor de transmitancia más bajo que los verticales, para poder contrarrestar este plus de energía.

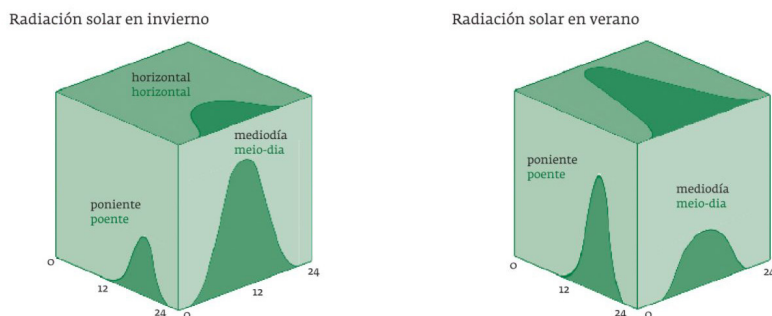


Fig. 61\_Impacto de radiación solar en las diferentes caras de un edificio en el hemisferio norte en periodo invernal y estival (Wassouf, 2014)

En el caso de la vivienda de **Darmstadt** vemos como la cubierta ofrece una mayor resistencia a las pérdidas energéticas que la envolvente vertical, obteniendo un valor de transmitancia de  $0.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , frente a los  $0.14 \text{ W/m}^2\text{K}$  del cerramiento opaco. Al igual que en el caso previo, esta vivienda obtendrá un valor más bajo de transmitancia que el resto de viviendas analizadas salvo la misma que en el caso anterior la superó, la vivienda Estrella dels Vents.

Para conseguir estos valores la vivienda del Dr. Wolfgang soluciona su cubierta mediante un sistema de entramado ligero en madera el cual se rellena con una capa de 445mm de lana de roca. Esto unido a la inclusión de una cubierta ajardinada consigue arrojar un valor muy bajo como es el que obtiene. De esta forma se realiza una cubierta con un sistema de **entramado ligero in situ**, al estilo del que se seguirá en la vivienda **PassivPalau** en la cual, tras el montaje de los cerramientos verticales mediante paneles de entramado ligero prefabricado se procede a la construcción de la cubierta de modo similar a la vivienda en Darmstadt, es decir, mediante un entramado ligero in situ. En este caso el cerramiento horizontal no se finaliza con una cubierta vegetal, sino que se instalan tejas avejentadas árabes, al estilo del contexto. En cuanto a los componentes que conforman la cubierta, ésta responde a los mismos criterios que la envolvente vertical explicada en el punto anterior, insuflando celulosa en el interior del entramado (145mm) e instalando sobre él un SATE compuesto por Neopor® (140mm) el cual vendrá cubierto por la lámina hermética, que unida a la instalada en el cerramiento vertical garantizará la hermeticidad de la vivienda. Por último, se instala un rastrelado sobre el que se colocarán las tejas. La transmitancia arrojada por esta solución será de  $0.115 \text{ W/m}^2\text{K}$ , inferior que la conseguida en el cerramiento vertical debido al mayor espesor de SATE utilizado en cubierta.

Sin embargo, éste no es el único sistema con el que se puede dar solución a la cubierta utilizando la madera como elemento estructural ya que, como se ha explicado anteriormente, se presentan diferentes soluciones posibles en función de cómo ésta es utilizada.

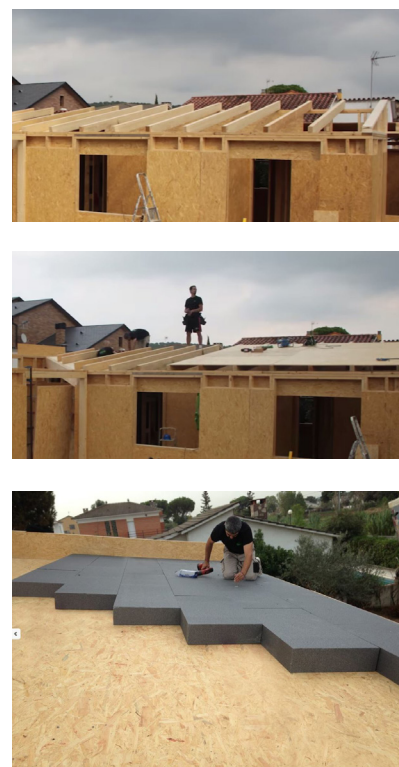


Fig. 62-64\_Proceso montaje de cubierta entramado ligero in situ, vivienda PassivPalau (<http://www.papik.cat>)





Fig. 65\_Montaje de paneles de entramado ligero prefabricados para la vivienda Bunyesc (Bunyesc, 2009).

### Entramado ligero

Éste es el sistema utilizado en la vivienda PassivPalau. Sin embargo, en la vivienda **Bunyesc** también se apuesta por esta construcción, pero con una diferencia principal, la **prefabricación**. A diferencia de la vivienda PassivPalau la cual ejecutaba sus cerramientos verticales con paneles prefabricados pero la cubierta se realizaba in situ, la casa Bunyesc Arboretum da solución a sus envolventes opacas, tanto horizontales como verticales, mediante paneles prefabricados de entramado ligero.

Los paneles se conforman con similitud a los realizados para la casa Passivpalau, dos paneles de OSB que encierran la estructura con un intereje de 650 mm y el aislamiento, en este caso 260mm de lana de oveja. La utilización de estos materiales estructurales, unido al aislamiento mediante lana hace que sean todos productos de proximidad, minimizando al máximo la energía embebida y dejando un balance de CO<sub>2</sub> positivo. Sobre estos paneles se instala la lámina impermeabilizante y una chapa inclinada ligeramente separada que será la encargada de evacuar las aguas y proteger a la vivienda del impacto directo del sol. Finalmente se consigue una transmitancia de cubierta de 0.147 W/m<sup>2</sup>K, un valor muy logrado si tenemos en cuenta su año de construcción (2009), un momento en el que las viviendas pasivas empezaban a aparecer muy discretamente en el marco español.

Este sistema de forjado que se aplica en la cubierta es similar al que se utiliza en el resto de forjados, con la diferencia de que a estos últimos no se les añade aislamiento. Sin embargo, sí se les incorporan unos conectores para formar un forjado mixto hormigón madera, conformando una capa de compresión por donde transcurre el suelo radiante, además de aportar inercia térmica al conjunto y aumentar la rigidez del total de la vivienda.

Gracias al sistema prefabricado se consiguió ejecutar la totalidad de la obra en tan solo 5 meses, permitiendo el proceso de prefabricación la realización simultanea de diferentes procesos constructivos.



Fig. 66\_Construcción en taller de los paneles de entramado ligero. Colocación de la lana de oveja en el interior (<https://www.construction21.org>)

### Entramado pesado

Un buen ejemplo de este sistema lo volvemos a encontrar en la vivienda **Estrella dels Vents**, donde se realiza una solución con mucha similitud al explicado anteriormente en el apartado de cerramiento vertical. La estructura de los paneles prefabricados de cubierta sigue exactamente los mismos pasos que los verticales con una única diferencia, y es que en estos se sustituye el aislamiento, utilizando lana de roca (360mm) en vez de paja. Incorpora también la subestructura exterior mediante rastreles sobre la cual se instalarán las tejas y guardando así un lenguaje similar al contexto rural y de montaña en el que se inserta. Tiene especial interés en esta solución el anclaje de los paneles a la estructura principal, el cual se realiza a través de unos engastes mecanizados previamente en taller, como ya se había comentado en el caso de los paneles verticales, de tal modo que, únicamente dejándolo apoyar sobre las vigas es más que suficiente para su funcionamiento estructural. La exactitud en el diseño y ejecución permiten su rápida y fácil construcción, quedando ésta relegada a un “puzzle arquitectónico”.

Al igual que en los cerramientos verticales se incorpora un trasdosado de 80mm de lana de roca por el que discurrirán las instalaciones y evitará que el núcleo de los paneles sea perforado perdiendo su estanqueidad.

Finalmente, debido a la modificación en el aislamiento, la cubierta obtiene un valor de transmitancia U de  $0.086 \text{ W/m}^2\text{K}$ , un valor considerablemente inferior con respecto al obtenido en los paneles verticales ( $0.127 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) debido a la diferencia existente entre la conductividad térmica de la paja ( $0.055 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) y la lana de roca ( $0.034 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ). Este valor, del mismo modo que sucedía con los paneles estructurales verticales, será el más bajo de todos los casos de estudio debido a ser la que se emplaza en el clima más frío, siendo la única que mejora la transmitancia obtenida en la vivienda de Darmstadt.



Fig. 68-69\_Construcción en taller de los paneles de entramado pesado. Lana de roca al interior (<https://www.facebook.com>)



Fig. 70\_Subestructura mediante rastreles para colocación de tejas (<https://www.facebook.com>)



Fig. 67\_Colocación del panel prefabricado de cubierta. Detalle de los engastes en paneles y viga de cumbrera para perfecto anclaje (<https://www.facebook.com>)

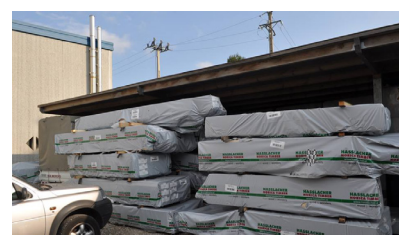


Fig. 71\_Empaquetado de paneles para perfecta conservación durante el transporte y tiempo de espera para el montaje (<https://www.facebook.com>)



### Madera contralaminada

La solución de cubierta mediante paneles macizos de madera contralaminada la encontramos en la vivienda **EntreEncinas**, en la cual además también se utiliza este sistema en la estructura vertical. Para su construcción se opta por paneles fabricados por la empresa KLH y certificada por la PEFC (Asociación Española para la Sostenibilidad Forestal), siendo obtenida a partir de talas controladas, como no podía ser de otro modo en el marco europeo.

La baja densidad de la madera, si la comparamos con otros materiales constructivos típicos como el acero o el hormigón, sumado a su gran resistencia, la cual se ve acrecentada por el proceso del contralaminado, haciendo que trabaje bien no solamente en una dirección, sino en las dos principales en las que se expande el panel, permite que se puedan utilizar estas placas como forjados con un espesor muy reducido, de 182mm en el caso de la cubierta. Sobre estas placas, y debido a la concienciación por la sostenibilidad que suele ir de la mano de las casas pasivas, se instala el aislamiento, el cual está formado por 160mm de corcho natural, una primera capa de 80mm y sobre ésta, otra entre rastreles de madera de otros 80mm. Entre los paneles estructurales y las placas de corcho se introduce una lámina de estanqueidad al aire, garantizando la hermeticidad a infiltraciones indeseadas al tiempo que regula la salida de vapor permitiendo la transpiración de la vivienda. Por otro lado, sobre la capa de aislamiento se coloca una lámina estanca al viento e impermeable al agua, por lo que permite el flujo de aire y de vapor hacia el exterior. Finalmente, una subestructura de rastreles sirve como anclaje para las tejas planas que terminarán de proteger la cubierta y crean una pequeña cámara ventilada evitando así el impacto directo del sol en la estructura.

La transmitancia térmica que se obtiene tras la ejecución de esta solución de cubierta es de  $0.19 \text{ W/m}^2\text{K}$ , el valor más elevado de todos los casos de análisis, sin embargo, no se puede obviar el clima templado en el que se sitúa, en el cual, a pesar de tener no solamente el valor de cubierta superior, sino todos en general más altos que las demás viviendas analizadas, se consiguen unas demandas energéticas de calefacción muy bajas, de tan solo  $12 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ , un valor que se sitúa en la media de las demás viviendas.

Esta vivienda es el ejemplo perfecto de lo comentado al inicio del punto, ya que no es necesario conseguir siempre el valor más bajo de transmitancia térmica en los componentes constructivos para lograr la certificación, sino el justo y necesario para cumplir los requisitos de demandas energéticas, pudiendo ser estos valores más flexibles en climas moderados, abaratando así costes en materiales y elementos al mismo tiempo que se logra una eficiencia energética ejemplar.

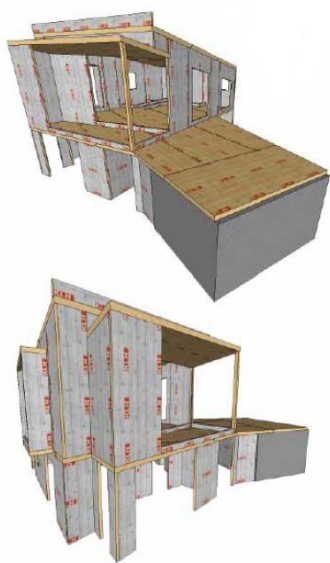


Fig. 72\_Levantamiento de la estructura mediante paneles de madera contralaminada realizada por la empresa KLH (AITIM Boletín de Información Técnica nº 281, 2013)



Fig. 73\_Montaje cubierta vivienda EntreEncinas (<https://estudioduqueyamora.com>)



Fig. 74\_(<http://casaentreencinas.blogspot.com.es>)

## Hermeticidad

El control de la hermeticidad en un edificio es fundamental para conseguir reducir las exigencias energéticas al mínimo, ya que de poco sirve la instalación de gran cantidad de aislamiento y la correcta resolución de los puntos críticos si posteriormente se producen filtraciones indeseadas generando pérdidas energéticas. Aunque no siempre hay que hacer que el edificio sea lo más hermético posible, ello dependerá del clima, al igual que lo comentado anteriormente sobre la necesidad de una determinada cantidad de aislamiento. Se da el caso en climas tropicales en los que, al ser la temperatura exterior muy similar a la interior, la baja hermeticidad se transmite en unas demandas energéticas muy reducidas, similares a las de una Passivhaus. El contexto es el que dictaminará las necesidades del proyecto.

En los casos de estudio, debido a los diferentes climas que se dan en España, todas las viviendas optan por una alta hermeticidad. Además, se debe recordar que uno de los requisitos para obtener la certificación Passivhaus es conseguir un valor de hermeticidad que no sobrepase las 0.6 renovaciones/hora ( $\text{h}^{-1}$ ) bajo una diferencia de presión de 50 Pascales. Éste dato se calcula a partir del test Blower door, el cual calcula el caudal de aire que se escapa en la vivienda cuando se le somete a dicha diferencia de presión.

Para conseguir una perfecta hermeticidad tiene que pensarse su solución desde el momento de proyecto. Para ello se utiliza la llamada “regla del lápiz”, la cual consiste en trazar una línea que represente la capa hermética al aire en planta y sección, además de en los detalles constructivos. Se solucionará la hermeticidad si se consigue hacer una línea cerrada evitando así cualquier infiltración indeseada.

En el proceso de hermeticidad del proyecto deben tenerse en cuenta dos conceptos diferentes, la hermeticidad al aire y la hermeticidad al viento. Es recomendable la incorporación de las dos barreras en la envolvente del proyecto ya que la implantación de una barrera hermética al aire en la cara interna del cerramiento evita cualquier infiltración, la hace completamente estanca, mientras que la barrera hermética al viento en la cara exterior evita la infiltración de viento al interior al mismo tiempo que permite la transpiración de la envolvente, evitando así las condensaciones intersticiales y manteniendo saneada la vivienda.

Un buen ejemplo en el que podemos ver el proceso de hermeticidad desde su pensado en proyecto es la **Rivas Passivhaus**, donde, como bien se recomienda, se empieza por hacer un primer estudio en fase de proyecto para solucionar y dar una envolvente hermética continua.



Fig. 75\_Test Blower door  
(<https://www.carolinahomeperformanceinc.com>)



Fig. 76\_Sellado hermético mediante bandas en conductos que penetran la envolvente. Rivas Passivhaus (Natural Concept, 2015)



Fig. 77\_Sellado hermético en montaje de los paneles prefabricados. Rivas Passivhaus (Natural Concept, 2015)





Fig. 78\_Instalación de bandas herméticas en carpintería previa a colocación en pared (Natural Concept, 2015)



Fig. 79\_Sellado de juntas entre paneles OSB mediante bandas herméticas (Natural Concept, 2015)



Fig. 80\_Detalle de sellado. Bandas en las juntas de los paneles y en unión carpintería- envoltiente opaca (Natural Concept, 2015)



Fig. 81\_Colocación exterior de la capa hermética al viento (Natural Concept, 2015)

En la sección se puede apreciar cómo se consigue una continuidad tanto en la envolvente térmica (sombreado en rojo) como en la estanca (línea roja discontinua).

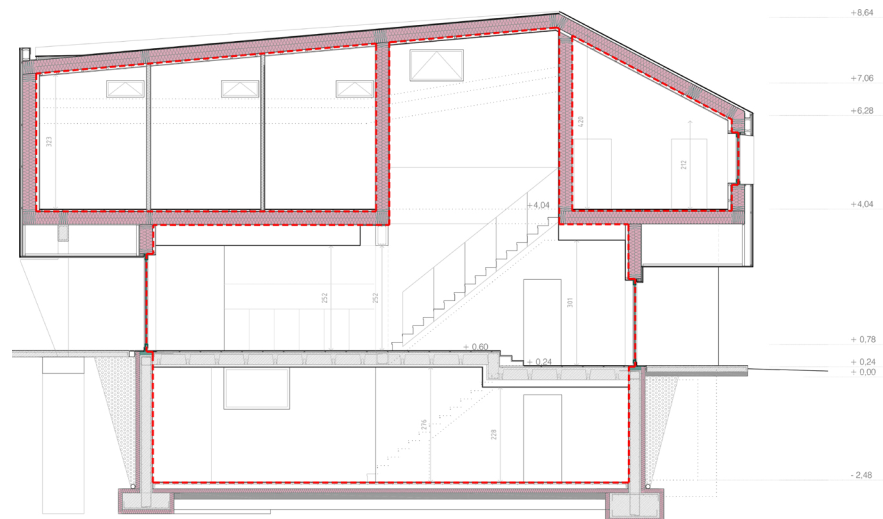


Fig. 82\_Sección transversal Rivas Passivhaus. Pensado de la hermeticidad y aislamiento en fase de proyecto (Natural Concept, 2015)

Para conseguir la hermeticidad se pueden utilizar diferentes materiales que ofrecen dicha cualidad como lo son las telas cortavientos, láminas de PVC (barreras de vapor), enyesado interior, hormigón, etc.

Para el caso concreto de la vivienda pasiva Rivas la estanqueidad se consigue con paneles OSB, los cuales se conforman a base de virutas de madera orientadas, prensadas y encoladas. Debido a este proceso se consigue un material que garantiza la hermeticidad. Los puntos críticos para estos paneles es la unión entre los mismos, en las cuales se disponen cintas herméticas especiales, terminando de sellar las juntas y evitando así cualquier penetración indeseada. Estas cintas vienen a resolver todos los puntos críticos de uniones, ya sea en uniones coplanarias de paneles de OSB como en las esquinas y también la unión entre diferentes elementos como las carpinterías. En estas últimas no solo es necesario la colocación de las cintas herméticas, sino que también deben utilizarse los materiales adecuados para garantizar la unión de toda la carpintería a la envolvente al mismo tiempo que evita las infiltraciones. Para ello se utilizan bandas precomprimidas o espumas especiales de baja expansión y celda cerrada.

Con la instalación de estos elementos se consigue crear en la vivienda una capa hermética al aire en la capa interior de la vivienda, sin embargo, para conseguir el mejor resultado posible se debe instalar otra capa exterior que envuelva la envolvente térmica por completo y que sea hermética al viento. De este modo la envolvente transpirará expulsando el vapor de agua y evitando condensaciones intersticiales.

Gracias a la instalación de estos elementos en la vivienda Rivas, se consigue un valor de hermeticidad para una diferencia de presión de 50 Pascales a través del test "Blower door" de  $0.6h^{-1}$ , el valor límite establecido por el Passivhaus Institut.

## Eliminación de puentes térmicos

Los puentes térmicos son aquellas zonas en las que se produce una variación en la uniformidad de los elementos constructivos. Estas variaciones o puentes térmicos pueden ser puntuales o lineales, siendo estos último los más desfavorables debido a la mayor superficie afectada. Dichas irregularidades entran en conflicto con la eficiencia de la envolvente térmica, produciendo a través de ellas pérdidas o ganancias indeseadas que, así como en una construcción que requiera de poca energía debido al clima no supondría apenas un problema, no sucedería lo mismo en una casa pasiva localizada en un clima más agreste, produciendo, debido a la diferencia térmica, escapes energéticos y aumentando la demanda de energía del proyecto. Es por ello por lo que hay que intentar mantener una envolvente térmica continua, sin rupturas que le creen conflictos y en caso de que ésta pierda la continuidad, procurar que el material que supla el hueco disponga de una alta resistencia térmica.

La solución de ruptura de puentes térmicos para garantizar una continuidad en la envolvente térmica no suele ser siempre sencilla en la arquitectura convencional ya que materiales como el ladrillo, cemento, hormigón o acero disponen de una conductividad térmica elevada. Sin embargo, no sucede lo mismo con la madera, ya que, gracias a su baja conductividad térmica la hace ideal para cualquier punto en la construcción, pudiendo llegar a haber continuidad matérica interior exterior sin que presente problemas energéticos. Esta cualidad simplifica considerablemente la construcción con ella evitando la ejecución de complejos detalles constructivos para garantizar una envolvente térmica continua. Dicha simplicidad la encontramos en diferentes puntos de las viviendas analizadas, mostrándonos una de las principales ventajas de construir con este material.

Un ejemplo de esto se puede ver en la vivienda **Estrella dels Vents**, en la cual se aprecia cómo las vigas de cubierta que sustentan el alero y la totalidad del tejado tienen continuidad al interior y es en la zona exterior donde se les aplica el tratamiento pertinente para la resistencia a la intemperie. La realización de este mismo sistema mediante vigas de acero u hormigón debería implicar la inclusión de una capa aislante que separe las propias vigas del espacio interior, sin embargo, mediante este sistema, no solamente no es necesario, sino que se consiguen sumándole las demás capas, los mejores valores de transmitancia en envolvente de todos los casos analizados.



Fig. 84\_Montaje del panel prefabricado de cubierta, vivienda Estrella dels Vents. Continuidad exterior-interior de las vigas estructurales (<https://www.facebook.com>)



Fig. 83\_Paneles prefabricados de cubierta, vivienda Estrella dels Vents. Tratamiento y tinto de la madera solo a la parte que permanece al exterior en el conjunto (<https://www.facebook.com>)

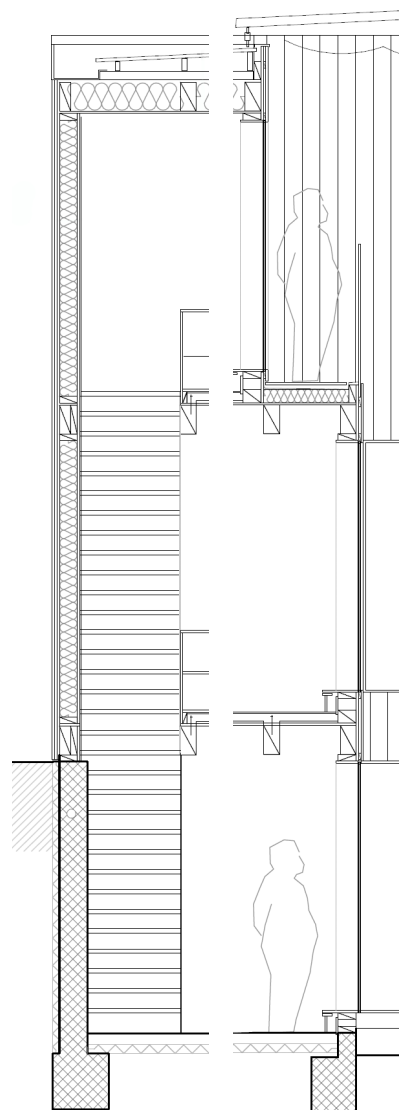


Fig. 85\_Sección vivienda **Bunyesc**. Se aprecia cómo el entramado da una solución sencilla a la envolvente opaca, libre de puentes térmicos. (Bunyesc, 2009)

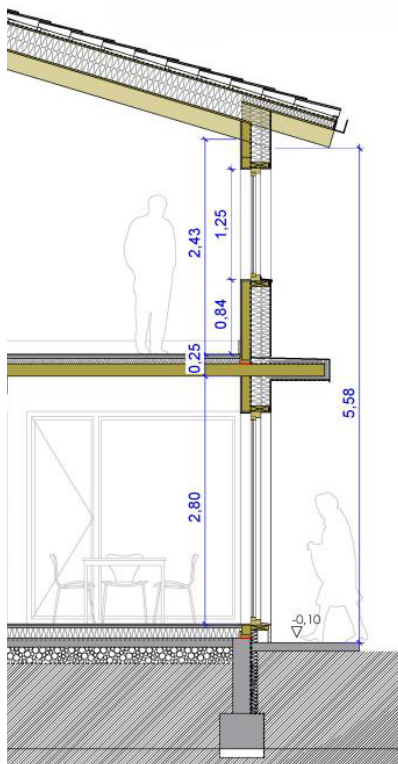


Fig. 87\_Tal como se muestra en la termografía, la madera laminada ofrece cierto carácter aislante, aunque no todo el deseado. Por ello en el alero que se realiza en la vivienda **el Plantío** a través del forjado que sale al exterior se recubre el panel con una capa de aislante, reduciendo de este modo el ligero puente térmico que podría generar (<https://sergiotorre.es>)

Esta cualidad se hace presente directamente en el propio sistema constructivo del entramado, tanto ligero como pesado, ya que los montantes encierran entre sí el aislamiento y ellos están prácticamente en contacto con exterior e interior, únicamente les separa los elementos que encierran el aislamiento en la otra dirección. Si éstos fuesen realizados mediante ladrillos, hormigón o acero supondrían un puente térmico lineal importante, el cual recorrería la fachada de abajo a arriba cada 60cm en el caso de la vivienda **Rivas**.

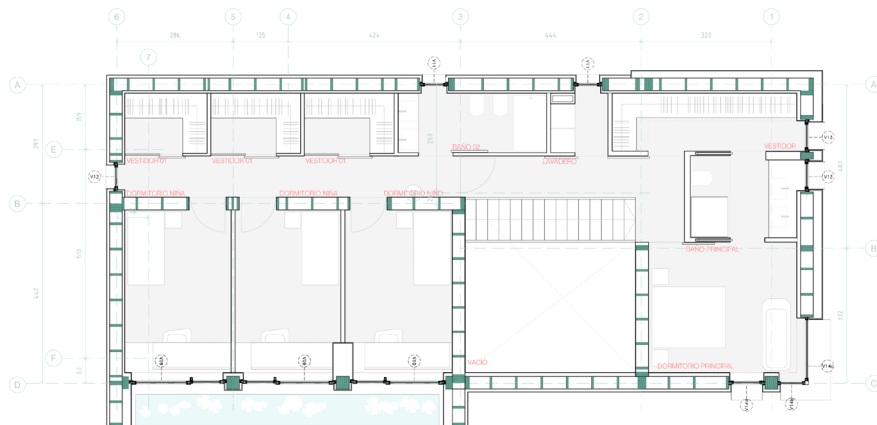


Fig. 86\_Planta vivienda **Rivas**. En verde los montantes estructurales del entramado prefabricado. Casi se realiza el contacto exterior-interior (Natural Concept, 2015)

En la vivienda **EntreEncinas** podemos apreciar como los paneles de madera contralaminada (conductividad térmica  $\lambda=0.13 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) mantienen con cierto interés la temperatura en la siguiente termografía. Lógicamente el aislante, corcho ( $\lambda=0.05 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) en su caso, consigue unos mejores resultados, pero no por ello se debe despreciar el buen comportamiento de los paneles estructurales.

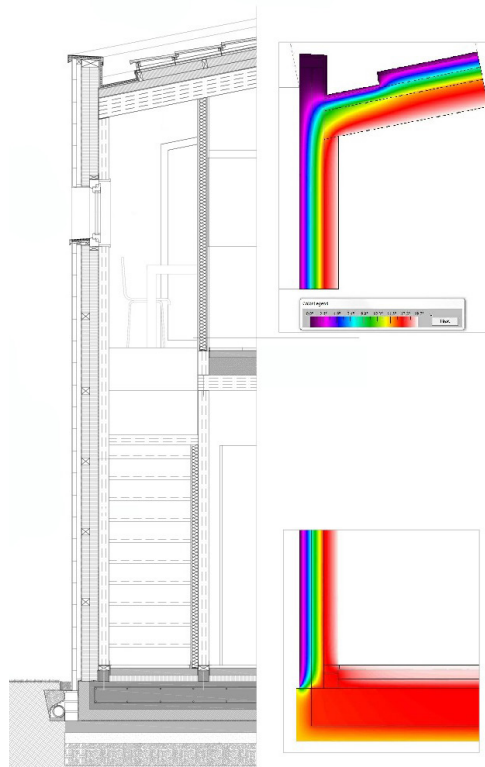


Fig. 88\_Sección y termografía de la envolvente opaca. Vivienda EntreEncinas ([www.plataformaarquitectura.cl](http://www.plataformaarquitectura.cl))



Fig. 89\_Paneles de corcho de cubierta. Detalle de esquina de cubierta. Rastrelado para anclaje de la subestructura portante de las tejas (<http://casaentreencinas.blogspot.com.es>)



Fig. 90\_Paneles de corcho en fachada. Rastrelado en capa exterior para anclaje de fachada ventilada. (<http://casaentreencinas.blogspot.com.es>)



## Carpinterías de alta calidad

Las carpinterías representan el punto de la envolvente térmica más débil energéticamente. Es por ello por lo que las ventanas y puertas tienen que ser de una alta calidad, garantizando unos valores de transmitancias muy bajos, siendo de  $0.8 \text{ W/m}^2\text{K}$  el valor recomendado por el Passivhaus Institut. De nuevo hay que tener en consideración el contexto en el que se emplaza el proyecto, ya que no es la misma necesidad de aislamiento la que se requiere en Alemania que la necesaria en España, es por ello por lo que las únicas viviendas que aproximan ese valor o incluso lo mejoran en carpintería son las que se sitúan en los climas más fríos (El Plantío, Estrella dels Vents y Rivas).

Para conseguir la alta eficiencia energética en carpinterías hay que conseguir una buena transmitancia en el plano de vidrio, al igual que en el marco, pero también se debe realizar una correcta instalación, sellando completamente su unión con la envolvente opaca y enrasándola a la línea del aislamiento. Cumpliendo con estas cualidades se obtendrá una transmitancia térmica óptima para el hueco.

Las carpinterías más utilizadas para la resolución de casas pasivas son mediante perfiles de PVC, ya que debido a su rigidez y a su moderada conductividad térmica permite, junto a la creación de varias cámaras de aire en las cuales se puede incluir aislamiento, la obtención de una muy baja transmitancia térmica en el marco de la ventana. También son muy utilizadas las carpinterías de madera, a las cuales, para climas fríos, se les puede añadir en la cara exterior una capa de aislamiento y recubrimiento de PVC para mejorar sus cualidades térmicas o incluso aluminio, mejorando su resistencia a las inclemencias atmosféricas.

Un ejemplo de vivienda que resuelve las carpinterías mediante perfilera de **PVC** es la **Rivas Passivhaus**. La principal ventaja de estas carpinterías con respecto a las construidas con madera es el apartado económico, teniendo éstas un coste menor. La carpintería utilizada en esta vivienda es el modelo Veka Softline 82MD de la casa Inrialsa, ofreciendo un valor de transmitancia del marco de solamente  $1.05 \text{ W/m}^2\text{K}$ , la cual unida al acristalamiento triple con cámara de Argón ( $U_g=0.621 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) consigue un valor final de transmitancia de la ventana  $U_w=0.96 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

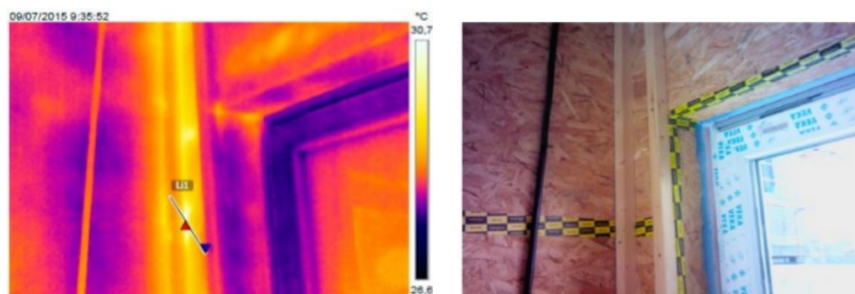


Fig. 91\_Detalle de encuentro cerramiento opaco-transparente. Se aprecia como la carpintería es el elemento más débil, ofreciendo una menor temperatura que el resto de la envolvente. Aun así la diferencia de temperatura entre los puntos máximos es únicamente de  $4^\circ\text{C}$ . (Natural Concept, 2015)

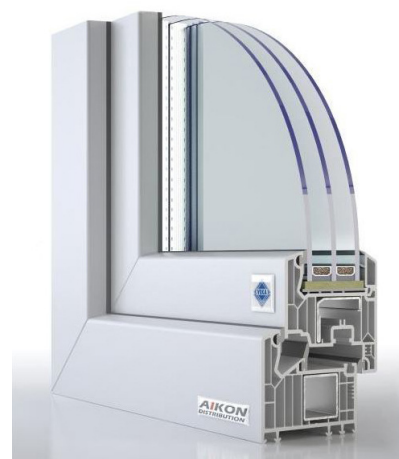


Fig. 92\_Carpintería en PVC Veka Softline 82MD con triple acristalamiento utilizada en la Passivhaus Rivas (<https://www.construction21.com>)



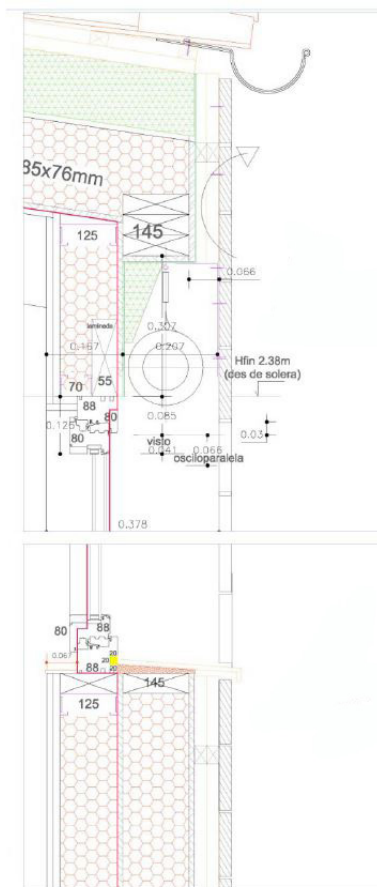


Fig. 93\_Detalle constructivo envoltorio vertical, vivienda Passivpalau.  
(<https://www.construction21.org>)

Sin embargo, será la solución adoptada en la vivienda **Passivpalau** la que interese en este análisis debido a la resolución de todo el perfil de la carpintería mediante **madera maciza**. El modelo elegido en este caso concreto es el Elegance de 88mm de sección de hoja de la casa Ortal. Esta carpintería encierra un doble acristalamiento Planitherm ultra N cuya transmitancia térmica es de  $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ . El valor final  $U_w$  obtenido es de  $1.52 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Muy acertadamente, la carpintería se instala en la línea de aislamiento, mejorando las características térmicas globales de la envoltorio y evitando el mínimo puente térmico que pudiera producirse al colocarse desplazada de esta alineación. Se instala además el sistema de persiana alicantina en la cara exterior de la fachada, ocultándose detrás de las lamas de madera que conforman la fachada ventilada y protegiendo el interior del impacto directo de la radiación solar cuando ésta no sea necesaria.

Se aprecia una primera desventaja cuando se procede al análisis de la transmitancia del componente si la comparamos con la solución anterior ya que, a pesar de no facilitar los datos de transmitancia térmica del marco ni la base de datos <http://www.passivhausprojekte.de> ni el propio fabricante, éste se puede extrapolar teniendo en cuenta los valores del ejemplo anterior, de tal modo que se estima un valor de transmitancia de marco de  $1.7 \text{ W/m}^2\text{K}$  aproximadamente. Éste valor no representa a la totalidad de la periferia en madera, ya que dependiendo de qué especie se use y cómo ésta haya sido tratada se obtendrán unos valores u otros, siendo el caso, por ejemplo, de la carpintería en pino macizo del fabricante Casas Carpintería, el cual logra un valor de transmitancia de  $1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Aun así, se ve cómo una carpintería en madera maciza únicamente, obtiene un valor térmico más desfavorable que si estuviera realizado en PVC, al mismo tiempo que cuenta, generalmente, con un coste mayor para el comprador. Por otro lado, se trata de un material más sostenible y noble, con un impacto medioambiental inferior, factor muy importante de cara a una construcción respetuosa con el entorno y la naturaleza.

No obstante, al estar la vivienda Passivpalau emplazada en Palau de Plegamans, muy próximo a la ciudad de Barcelona, hace que ésta se sitúe en un clima mediterráneo poco agreste, pudiendo permitirse valores de transmitancia mayores y cumpliendo aun así con los criterios de exigencia energética del Passivhaus Institut.



Fig. 94\_Carpintería Elegance88 del fabricante Ortal, realizada en madera laminada con triple acristalamiento utilizada en la Passivhaus Rivas  
(<https://ortal.es>)



Fig. 95\_Ventanas instaladas en la envoltorio. Selladas mediante bandas a interior y exterior para conseguir la mayor hermeticidad. Retranqueadas de la fachada para protegerse del sol y las inclemencias atmosféricas.  
(<https://www.construction21.org>)

En el caso de la vivienda **Estrella dels Vents**, al situarse en un clima más frío, sí que necesita introducir un material de apoyo a la carpintería, realizada también con madera laminada, para bajar su transmitancia y cumplir los requisitos de exigencia energética que marca el estándar Passivhaus.

Las carpinterías por las que se opta en esta vivienda son unas fabricadas por la empresa constructora Farhaus en las cuales se intercala en el núcleo de la carpintería una banda de corcho, reduciendo el valor de transmitancia térmica del marco a un valor aproximado de  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , el cual sumado al triple acristalamiento con cámara de gas Argón ( $U_g=0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) arroja un valor final de transmitancia de la ventana  $U_w=0.92 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Para evitar cualquier tipo de problema en la instalación de las carpinterías ésta se hizo en taller, manteniendo una atmósfera controlada y permitiendo hacerla de este modo lo mejor posible. Aun así, mediante este proceso se presenta un problema, ya que los vidrios de grandes dimensiones no son instalados hasta que no se colocan los paneles prefabricados en obra para evitar cualquier rotura indeseada, por lo que su montaje será un proceso delicado, debido a los grandes paños y su peso, ya que una instalación poco precisa provocaría infiltraciones indeseadas y por tanto una drástica pérdida energética a través de un elemento que podría ofrecer un comportamiento destacable.



Fig. 96-97\_Detalle de carpintería Farhaus. Banda intercalada de corcho para mejorar el valor de  $U_f$ . (<https://www.facebook.com>)



Fig. 98\_Montaje de carpinterías en el panel prefabricado en taller (<https://www.facebook.com>)



Fig. 100\_Colocación de los vidrios en las carpinterías ya ancladas a la envolvente (<https://www.facebook.com>)



Fig. 99\_Incorporación de lámina de aluminio en vierteaguas para proteger la carpintería (<https://www.facebook.com>)



## Ventilación mediante recuperador de calor

La ventilación en una Passivhaus es un elemento a controlar tan importante como los anteriores, ya que, a lo largo del análisis se ha ido explicando cómo conseguir una vivienda súper aislada y hermética para evitar las pérdidas o ganancias energéticas indeseadas. Sin embargo, los edificios deben disponer de un sistema de ventilación para evitar la acumulación de aire viciado, el cual, reduce la sensación de confort e incluso perjudica la capacidad intelectual del ser humano, y para expulsar la humedad que los habitantes generan, llegando a producirse moho u hongos si se mantiene un valor superior al 80% durante semanas.

La solución que recoge el estándar Passivhaus es la inclusión de sistemas de ventilación de doble flujo con recuperador de calor, de tal modo que la vivienda absorbe aire fresco del exterior, lo precalienta, gracias al intercambiador, con el aire viciado del interior y lo va sustituyendo con un caudal de 0.3 renovaciones a la hora, de tal modo que el ambiente interior va renovando el aire sin apenas pérdidas energéticas, gracias a la alta eficiencia obtenida por los recuperadores de calor, los cuales llegan a alcanzar un valor del 95%. Este sistema es utilizado por todas las viviendas analizadas a través de componentes y aparatos de diferentes fabricantes, los cuales deben ser elegidos en función de las necesidades y los cálculos pertinentes para suplir las necesidades específicas de cada una de ellas.

Estos sistemas, tal y como se puede apreciar en la vivienda Bunyesc, se pueden complementar con otros elementos para mejorar aún más su funcionamiento como lo es un pozo canadiense, a través del cual, el aire antes de introducirse en el circuito hace un primer recorrido por un conducto enterrado, estabilizando su temperatura y minimizando el diferencial existente entre exterior e interior.

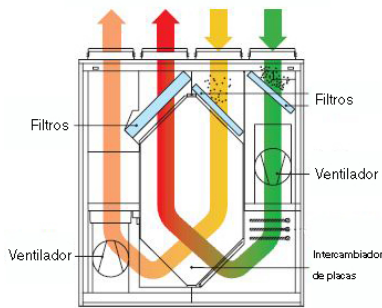


Fig. 101\_Esquema funcionamiento del recuperador de calor (<https://www.plataformaarquitectura.cl>)



Fig. 102\_Distribución de conductos de ventilación (<https://www.plataformaarquitectura.cl>)



Fig. 103-104\_Instalación del sistema de ventilación mecánica de doble flujo, vivienda EntreEncinas (<https://www.plataformaarquitectura.cl>)



## Diseño para optimizar las ganancias solares

Garantizar unas óptimas ganancias solares no debe traducirse en la búsqueda de la máxima radiación solar, que podría ser el caso en climas centroeuropeos. De nuevo hay que tener en cuenta el clima contextual en el que se implanta el proyecto, el cual nos dictaminará que estrategias seguir, ya que, por norma general en el marco español, interesa maximizar las ganancias solares en invierno todo lo posible al mismo tiempo que se reduzcan al mínimo en periodos estivales. Debido a esto, suele ser común la colocación de huecos, siempre que sea posible, retranqueados al máximo al interior, de tal modo que el propio espesor de la fachada haga como primer protector solar.

El diseño del proyecto es la piedra angular de toda casa pasiva, tanto de las primeras construcciones que ya buscaban métodos para mejorar la habitabilidad a partir de los medios de que disponían, como los edificios más actuales que pretenden alcanzar el objetivo ZEB (Zero-Energy Building), ya que es el encargado de adaptar y aprovechar al máximo todos los recursos que entran en juego en el contexto en el que se implanta.

En la vivienda **Rivas** vemos cómo el arquitecto, David Marsinyach, realiza un diseño acorde a la incidencia solar para que ésta sea aprovechada al máximo, bloqueando su entrada al interior en verano a través del retranqueo que genera, pero ajustándolo lo suficiente para permitir la entrada solar en el periodo invernal, calentando de este modo las estancias y los forjados, los cuales irán desprendiendo la energía a lo largo de la noche gracias a la inercia térmica y manteniendo de este modo la temperatura más estable. Gracias a las ganancias solares obtenidas por el correcto aprovechamiento, esta vivienda únicamente demanda 14 kWh/m<sup>2</sup>a para la calefacción, situándose por debajo del máximo de 15 kWh/m<sup>2</sup>a impuesto por el Passivhaus Institut.

Sin embargo, a pesar de la protección solar ofrecida por el diseño, no se consigue mantener en época estival temperaturas de confort debido al cálido clima de la zona de Madrid, es por ello por lo que la vivienda no podrá ofrecer el confort a sus habitantes únicamente mediante métodos pasivos, quedando reflejado en la demanda de 8 kWh/m<sup>2</sup>a para la refrigeración de la vivienda, un valor inferior al marcado como límite por el Passivhaus Institut, 15 kWh/m<sup>2</sup>a. Éste es el único caso de todos los analizados en el que se da una demanda energética de refrigeración.



Fig. 106\_ Exterior Rivas Passivhaus. Protección solar mediante el retranqueo de la geometría. (<https://www.plataforma-pep.org>)

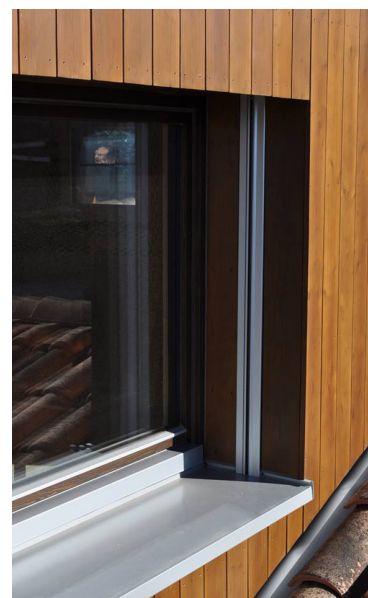


Fig. 105\_Detalle carpintería en la vivienda Estrella dels Vents. Espesor del muro como primer protector solar (<https://www.facebook.com>)

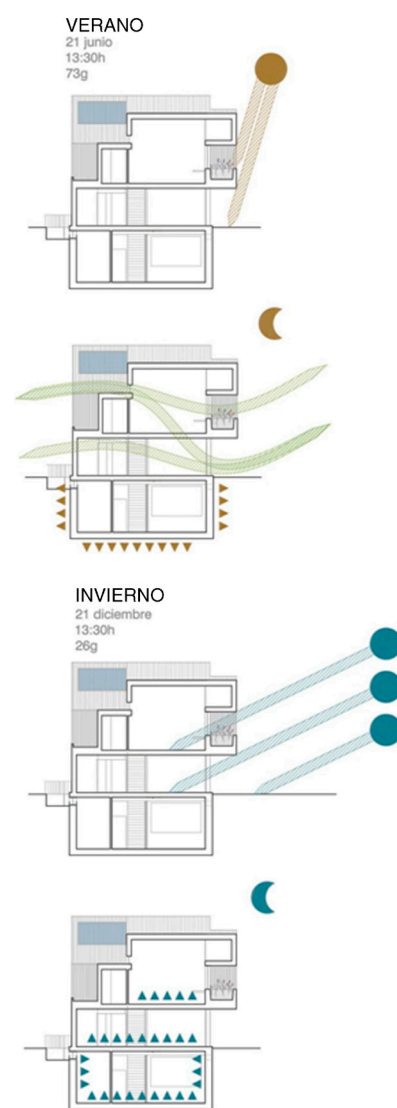


Fig. 107\_Esquema incidencia solar según estación. Vivienda Rivas (Natural Concept, 2015)

DIA ENERO SIN CALEFACCIÓN  
JANUARY DAY WITHOUT HEATING  
21 enero 2010 consumo energético calefacción  
0,0 kWh  
21st January 2010 heating consumption 0,0  
kWh

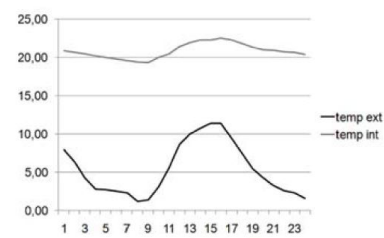


Fig. 108\_(Bunyesc, 2009)



Fig. 109\_Fachada sur. Protección solar mediante alero y lamas (https://www.plataforma-pep.org)



Fig. 110\_Cubierta vidriada cerrando el espacio interior (https://www.plataforma-pep.org)

De igual modo, en la vivienda **Bunyesc** se realizan previamente diseños de aprovechamiento energético, para conseguir reducir al mínimo posible las demandas energéticas. La apertura de grandes huecos en fachada permite el calentamiento completo de la vivienda en los periodos fríos a través de la incidencia solar directa, la cual es bloqueada por elementos tanto fijos, como móviles en los periodos cálidos, para evitar sobrecalentamientos. Esto se produce gracias a los aleros instalados en la fachada sur sobre los grandes ventanales y a las lamas orientables retráctiles que bloquean el impacto solar directo indeseado, regulando las ganancias energéticas en función de la necesidad.

Posteriormente se instaló una cubierta retráctil vidriada en el retranqueo que realiza la casa para aportar energía y luz al espacio central del proyecto. Esta hendidura se produce fruto de ser una futura vivienda entre medianeras, motivo por el cual no se realizan aberturas en las fachadas este y oeste. Mediante esta envolvente se logra crear una cámara caliente que aportará un plus energético al mismo tiempo que en verano es desplazada y sustituida por una lona, proporcionando sombra y permitiendo la ventilación a través de ella.

Estas estrategias energéticas harán que la vivienda demande únicamente 7 kWh/m<sup>2</sup>a para calefacción, a pesar de situarse en un clima relativamente fresco, siendo éste el valor más reducido de todas las viviendas analizadas, incluida la del Dr. Wolfgang.

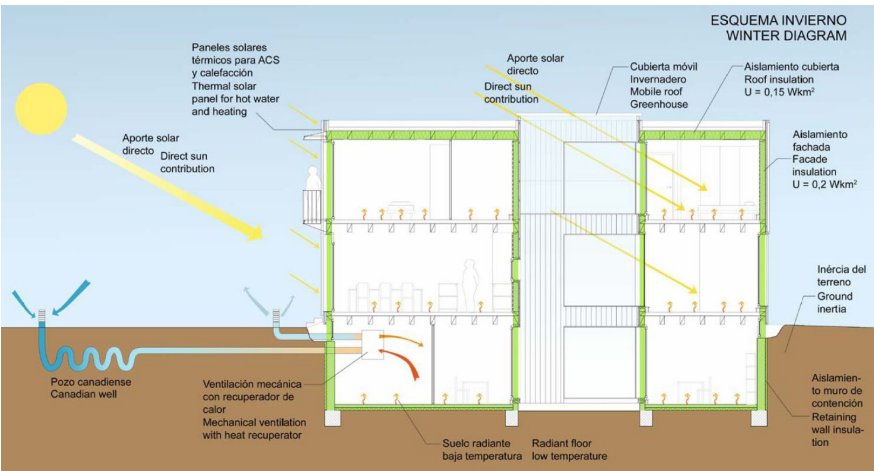
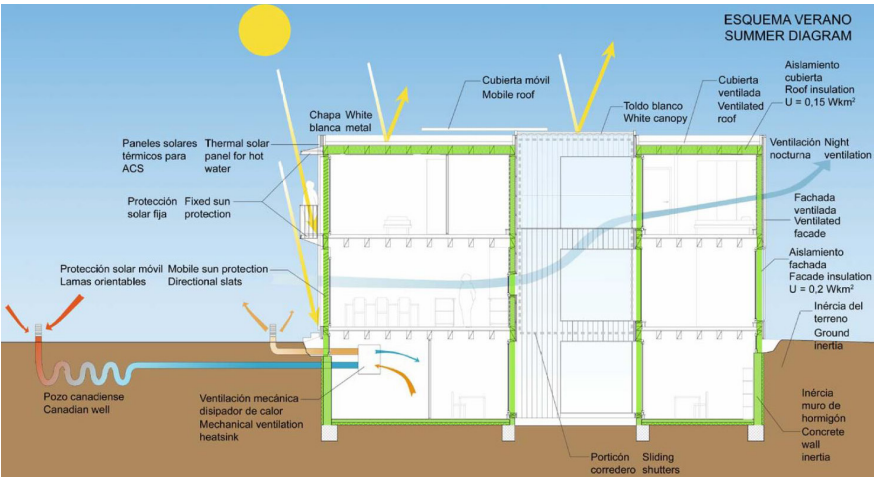


Fig. 111-112\_Esquemas explicativos estrategias energéticas por estación (Bunyesc, 2009)



El diseño de la vivienda **EntreEncinas** también parte del aprovechamiento energético pasivo para conseguir la mayor eficiencia posible. Prueba de ello es la incorporación de una galería acristalada a sur, la cual sirve como captadora solar en las temporadas frías y permite la incidencia solar directa al interior de la vivienda, calentando los diferentes elementos más masivos que, gracias a su inercia térmica, irán desprendiendo poco a poco la energía retenida manteniendo la temperatura más estable. Por otro lado, en temporada estival, la incidencia solar directa es bloqueada por las lamas de madera horizontales que se colocan en la parte superior de la abertura y por la vegetación caduca, la cual regenera su follaje y aporta frescura al ambiente. Un estor opaco colocado en la cara exterior de la carpintería interior sirve como última barrera para evitar de este modo que no entre nada de radiación directa al interior de la vivienda. Además, la inclusión de las lamas de madera en la fachada ventilada protege a la vivienda del impacto directo del sol en la envolvente opaca, reduciendo de este modo la energía que ésta absorbe. Aprovecha también las capacidades energéticas del terreno semienterrando una proporción de la vivienda, aportando éste cierta estabilidad térmica gracias a su inercia.

Finalmente, y gracias a los sistemas pasivos de captación energética, la vivienda EntreEncinas requiere únicamente de 12 kWh/m<sup>2</sup>a para suplir las demandas de calefacción y, debido a su cuidado diseño y estrategias, al igual que en la casa Bunyesc, no demanda ni un ápice de energía para su refrigeración en los periodos cálidos.

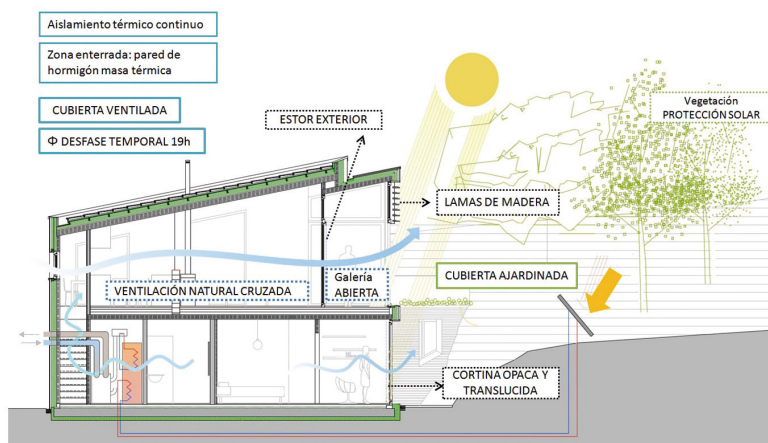
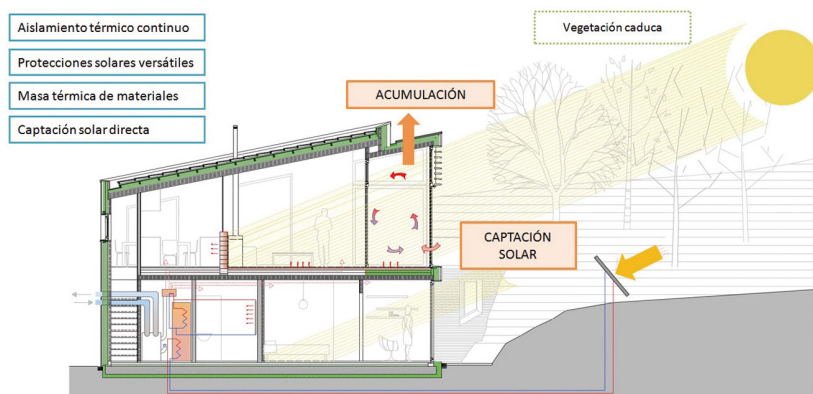


Fig. 115-116\_Esquemas explicativos estrategias energéticas por estación (Bunyesc, 2009)



Fig. 113\_Galería a sur. Estor en carpintería interna para evitar la incidencia solar indeseada al interior de la vivienda (<https://estudioduqueyzamora.com>)

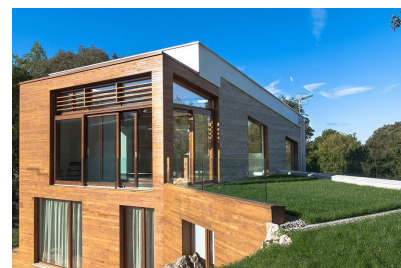


Fig. 114\_Fachada sur. Lamas horizontales para control solar en periodos de máxima incidencia y cubierta ajardinada del bloque inferior mejorando su aislamiento (<https://estudioduqueyzamora.com>)



Fig. 117\_Entrada solar en periodo invernal. (<https://www.plataformaarquitectura.cl>)




## Modelización energética de ganancias y pérdidas mediante la herramienta PHPP

La simulación del proyecto mediante la herramienta aportada por el Passivhaus Institut es una pieza fundamental para obtener la mayor eficiencia posible, ya que gracias a ella se llegan a conocer las demandas energéticas para calefacción y refrigeración que requerirá la vivienda en función de cómo se construya, debido al análisis dinámico que realiza con los datos climáticos del contexto en el que se sitúa. Mediante estos datos, que tienen que ser cuidadosamente introducidos, la herramienta puede llegar a calcular máximos de calefacción y refrigeración y sobrecalentamiento en periodos estivales, así como puede dimensionar el sistema de ventilación, de captación solar, tanto pasiva como por placas solares térmicas, fotovoltaicas, tubos de vacío... para obtener finalmente la demanda energética primaria, la cual no debe ser superior a 120 kWh/m<sup>2</sup>a.

La fiabilidad de esta herramienta está altamente comprobada gracias a la monitorización de gran cantidad de edificios, los cuales han demostrado tener el comportamiento simulado por el programa, así como la primera vivienda Passivhaus, la cual fue construida previamente al desarrollo de la herramienta y posteriormente, cuando ésta fue creada, realizó una simulación fiel a la realidad.

Todas las viviendas estudiadas han sido objeto de análisis con esta herramienta para ajustar los valores de aislamiento, carpinterías, captación y protección solar, ventilación, hermeticidad, etc. con el fin de conseguir una eficiencia energética sobresaliente cumpliendo de este modo con los restrictivos criterios que la certificación Passivhaus sostiene.

**Comprobación Passivhaus**



Edificio:		RIVAS PASSIVHAUS	
Calle:		LUTIS GARCIA BERLANGA N°9	
CP / Ciudad:		28521 RIVAS VACIAMADRID - MADRID	
País:		ESPAÑA	
Tipo de edificio:		VIVIENDA UNIFAMILIAR	
Clima:		[ES] - Madrid	
		Altitud del sitio del edificio (en [m] sobre el nivel del mar): 614	
Propietario / cliente:			
Calle:			
CP / Ciudad:			
Arquitectura:		TALLER PLAN (T) ED (DAVID NARSINYACH)	
Calle:		ALEJANDRO SAINT ROBIN N°2	
CP / Ciudad:		MADRID	
Instalaciones:		ALTECHNICA (JESÚS SOTO)	
Calle:		FERNANDEZ LADREDA N°10	
CP / Ciudad:		40001 BÉGOVIA	
Año construcción:	2014	Temperatura interior invierno:	20,0 °C
Nº de viviendas:	1	Temperatura interior verano:	25,0 °C
Nº de personas:	6,9	Cargas internas de calor invierno:	2,1 W/m²
Cap. específica:	1,15 W/m² por m² SHG	Altem verano:	4,1 W/m²
		Volumen exterior V <sub>ext</sub> m³:	1178,5
		Refrigeración mecánica:	X

Valores característicos del edificio con relación a la superficie de referencia energética y año			
Superficie de referencia energética		243,0 m²	
Calefacción	Demanda de calefacción	14 kWh/(m²a)	15 kWh/(m²a)
	Carga de calefacción	11 W/m²	10 W/m²
Refrigeración	Demanda total refrigeración	8 kWh/(m²a)	15 kWh/(m²a)
	Carga de refrigeración	8 W/m²	-
	Frecuencia de sobrecalentamiento (> 25 °C)	%	-
Energía primaria	Calef. int., aerum., ACS, ACS, ACS, ACS, ACS, ACS	108 kWh/(m²a)	120 kWh/(m²a)
	ACS, calefacción y electricidad auxiliar	61 kWh/(m²a)	-
	Ahorro de EP a través de electricidad solar	11 kWh/(m²a)	-
Hermeticidad	Resultado ensayo de presión n <sub>50</sub>	0,6 1/h	0,6 1/h

\* Campo vacío: fallen datos. - sin requerimiento

Passivhaus?
SI

Fig. 118\_Comprobación para certificación Passivhaus. Vivienda Rivas (<https://es.slideshare.net>)

## Passive House verification



Building:	Casa Entreencinas		
Street:	Parcela nº2, El Bosque		
Postcode/City:	Villanueva de Pría, Llanes, Asturias		
Country:	Spain		
Building Type:	Detached family house		
Climate:	Llanes (closest Meteostation) : Meteonorm		
Home Owner(s) / Client(s):	EntreEncinas Promociones Bioclimáticas SLU		
Street:	Avenida de la Argentina 132		
Postcode/City:	E-33213 / Gijón (Asturias)		
Architect:	DUQUEYZAMORA arquitectos		
Street:	C/ La Muralla nº9 - 3ª planta, oficina 1		
Postcode/City:	33401 - Avilés (Asturias)		
Mechanical System:			
Street:			
Postcode/City:			
Year of Construction:	2012	Interior Temperature:	20,0 °C
Number of Dwelling Units:	1	Internal Heat Gains:	2,1 W/m²
Enclosed Volume V <sub>e</sub> :	384,0		
Number of Occupants:	3,8		

Specific building demands with reference to the treated floor area				use: Monthly method	
		Treated floor area		Requirements	Fulfilled?*
Space heating		133,1	m²		
	Annual heating demand	13	kWh/(m²a)	15 kWh/(m²a)	yes
	Heating load	11	W/m²	10 W/m²	-
Space cooling	Overall specific space cooling demand		kWh/(m²a)	-	-
	Cooling load		W/m²	-	-
	Frequency of overheating (> 26 °C)	0,6	%	-	-
Primary Energy	Space heating and cooling, dehumidification, household electricity.	116	kWh/(m²a)	120 kWh/(m²a)	yes
	DHW, space heating and auxiliary electricity	83	kWh/(m²a)	-	-
	Specific primary energy reduction through solar electricity		kWh/(m²a)	-	-
Airtightness	Pressurization test result n <sub>50</sub>	0,3	1/h	0,6 1/h	yes

EnerPHit (retrofit): according to component quality					
Building envelope average U-Values	Exterior insulation to ambient air	0,21	W/(m²K)	-	-
	Exterior insulation underground	0,24	W/(m²K)	-	-
	Interior insulation to ambient air		W/(m²K)	-	-
	Interior insulation underground		W/(m²K)	-	-
	Thermal bridges ΔU	0,00	W/(m²K)	-	-
	Windows	1,29	W/(m²K)	-	-
Ventilation System	External doors	0,61	W/(m²K)	-	-
	Effective heat recovery efficiency	79	%	-	-

\* empty field: data missing; '-': no requirement

Passive House?

yes

Fig. 119\_Comprobación para certificación Passivhaus. Vivienda EntreEncinas. Si se realiza un correcto diseño y cálculo mediante la herramienta PHPP, se deberían obtener los mismos valores siempre y cuando la construcción se haya realizado apropiadamente (www.plataformaarquitectura.cl)

## CONCLUSIONES

Tal y como se ha introducido el trabajo, el contexto actual se caracteriza por una situación en la que la búsqueda de la eficiencia es el camino primordial, dada la necesidad de reducir los abusivos consumos energéticos que se están llevando a cabo. Muestra de ello es la preocupación por conseguir estas reducciones, quedando reflejada en el Acuerdo 20-20-20 impuesto por la Comisión Europea. Como respuesta, diferentes estándares constructivos dan solución y aportan herramientas y recursos para que dicho acuerdo se convierta en una realidad, siendo el Passivhaus Institut uno de los más importantes a nivel mundial.

El seguimiento de los principios que propone el Passivhaus Institut para el cumplimiento de sus criterios es un camino ideal para conseguir la reducción del consumo energético que requieren las viviendas para su manutención y contribuir al acuerdo impuesto por la Unión Europea. Sin embargo, uno de los puntos que el Passivhaus Institut no define como criterio es la sostenibilidad de los materiales que conforman el proyecto, lo cual provoca que se ahorre únicamente en uno de los tres procesos que contempla la construcción, el periodo de uso y manutención del proyecto. La ausencia de este criterio permite la construcción de obras mediante materiales cuya creación supone un gasto energético enorme, minimizando la capacidad de reducción energética que se podría llegar a conseguir si ésta se disminuyera.

Es en este punto en el que la madera, como se ha visto a lo largo del trabajo, viene a resolver y dar solución a la arquitectura actual, retomando el papel principal que una vez tuvo, el cual fue relegado por la novedad que supuso en su momento el hormigón y el acero y que ha permanecido hasta nuestros días. Sin embargo, poco a poco, la madera está volviendo a retomar el protagonismo que merece debido a la pérdida de los prejuicios y la desconfianza que provocaba este material, al que se veía como débil y perecedero, comparado con los que se venían utilizando.



Este cambio de mentalidad se está dando gracias a los avances tecnológicos logrados con este material que está demostrando ser capaz de competir con cualquier otro sin mostrar signo de debilidad y también gracias a la “predicación con el ejemplo” a través de obras como las que se presentan en el análisis. Estas construcciones han demostrado ser el casamiento perfecto entre eficiencia y sostenibilidad, consiguiendo unas demandas energéticas muy por debajo de la media, las cuales podrían ser suplidas fácilmente con generadores de energía renovable al mismo tiempo que para su construcción se ha gastado una ínfima parte de energía, siendo naturales los principales materiales de construcción, como lo es la lana de oveja o la paja.

El uso de la madera obtenida de explotaciones controladas como elemento principal en las viviendas (estructura, envolvente, tabiquería, cubierta...) reduce al mínimo la energía embebida de la construcción, ya que, para la extracción de ésta únicamente bastan 640kw/h por tonelada, un valor muy inferior al requerido por el hormigón, el cual es 5 veces mayor, y mucho más aún si lo comparamos con el acero, el cual requiere de 24 veces la cantidad de energía necesaria para obtener la misma cantidad en madera (Frampton, Sainz & Romaguera i Ramió, 2009). Además, su facilidad de trabajo y adecuada resistencia térmica hacen que la construcción con ella sea mucho más simple y eficiente, como se ve en las viviendas analizadas, suprimiendo con facilidad la creación de cualquier puente térmico y reduciendo los tiempos de construcción, así como el gasto de recursos como el agua para llevar a cabo la misma. Es debido a todas estas ventajas que de las 54 viviendas registradas en la Plataforma Edificación Passivhaus (PEP), 20 de ellas cuentan con la madera como el material principal de su construcción.

Este análisis muestra cómo es posible la realización de viviendas en cualquier parte del país, por muy variado que sea su clima, mediante la utilización de la madera a través de diferentes técnicas y se pretende mostrar con el ejemplo no solamente que se pueden realizar, sino que además cumplen con su función de una manera sobresaliente, reduciendo al mínimo las necesidades energéticas y suponiendo un ahorro considerable para el habitante.



Fig. 120\_Localización de las viviendas analizadas (Elaboración propia. Fuente: <https://www.google.es/maps>)

Estas conclusiones se leen en las siguientes tablas, las cuales muestran para cada vivienda, los elementos constructivos que las componen y finalmente, y gracias a ellos, los valores térmicos y demandas energéticas que se obtienen, siendo así viviendas ejemplares en el marco arquitectónico español, las cuales han hecho de la madera el material principal y fundamental para su existencia, conformando tanto el esqueleto de la estructura, como la piel de su envolvente.

1\_Bunyesc | 2\_EntreEncinas | 3\_PassivPalau | 4\_El Plantío | 5\_Rivas Passivhaus | 6\_Estrella dels Vents

NOMBRE		Darmstadt	Bunyesc	Entre Encinas	Passiv Palau	El Plantío	Rivas Passivhaus	Estrella dels Vents
AÑO CONSTRUCCIÓN		1991	2009	2012	2013	2014	2015	2016
INFO CONSTR	Estructura	Mixta: Hormigón madera	Entramado ligero prefabr. madera	Panel madera contra-laminada	Entramado ligero modular. madera	Panel madera contra-laminada.	Entramado ligero prefabr. madera	Entramado semipesado prefabr. madera
	Aislamiento	EPS	Lana de oveja	Corcho	Celulosa	Fibra de madera	EPS	Paja + lana de roca
TRANSMITANCIAS (W/m²K)	Cerramiento opaco (U)	0.14	0.215	0.2	0.146	0.155	0.145	0.127
	Solera (U)	0.13	0.35	0.24	0.395	0.229	0.395	0.10
	Cubierta (U)	0.10	0.147	0.19	0.115	0.153	0.124	0.086
	Ventana (U <sub>w</sub> )	0.78	1.65	1.3	1.52	0.73	0.96	0.92
	Vidrio ventana (U <sub>g</sub> )	0.70	1.2	1.1	1.10	0.5	0.621	0.60
	Puerta acceso (U <sub>d</sub> )	0.78	1.8	0.76	0.789	0.69	1.21	0.75
HERMETICIDAD n <sub>50</sub> (h <sup>-1</sup> )		0.22	0.6	0.4	0.21	0.4	0.6	0.6
DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m²a)	Calefacción	10	7	12	9	13	14	14
	Refrigeración	-	-	-	-	-	8	-
	Energética primaria	61	52	104	117	92	108	68

Fig. 121\_Tabla resumen de las características térmicas y físicas de las viviendas (Elaboración propia. Fuente:<https://www.passivhausprojekte.de>)

VIVIENDAS			Darmstadt	Bunyesc	Entre Encinas	Passiv Palau	El Plantío	Rivas Passivhaus	Estrella dels Vents
ENVOLVENTE	Vertical	Entramado ligero pref.		•		•		•	
		Entramado pesado pref.							•
		Panel contralaminado			•		•		
	Horizontal	Entramado ligero in situ	•			•			
		Entramado ligero pref.		•				•	
		Entramado pesado pref.							•
		Panel contralaminado			•		•		
AISLAMIENTO	Lana de oveja			•					
	Corcho				•				
	Celulosa					•			
	Fibras de madera						•		•
	Paja								•
	Lana de roca		•						•
	Neopor®					•			
	Vidrio celular				•			•	
	EPS		•	•				•	
	XPS						•		•
CARPINTERÍA	Madera		•	•	•	•	•		
	Madera y Aislamiento								•
	PVC							•	
	Protección ext. aluminio						•		•
VIDRIO	Doble			•	•	•			
	Triple		•				•	•	•
	Kriptón		•						
	Argón			•	•	•	•		•
AHORRO ENERGÉTICO	Placas fotovoltaicas		•	•					•
	Captación solar térmica ACS		•	•	•		•	•	
	Recolección aguas pluviales		•	•	•				•

Fig. 122\_Tabla conceptual de elementos constructivos de las viviendas analizadas (Elaboración propia. Fuentes: <https://www.passivhausprojekte.de> y <http://www.plataforma-pep.org>)



Gracias a la realización de estas viviendas pasivas con madera y otros materiales naturales se está ahorrando energía en todos los procesos que conforman un proyecto de arquitectura: construcción, mantenimiento y derribo, debido a su capacidad reciclable y a ser respetuosos con el medio ambiente, teniendo un impacto positivo en el marco ecológico y reduciendo su balance de CO<sub>2</sub>, llegando a ser positivo en algunas construcciones como es el caso de la vivienda Bunyesc. Además, estas viviendas sirven como escaparate de lo que se puede llegar a conseguir con una concienciación por el medio ambiente, y todo ello sin apenas sobrecoste en construcción, ya que la media de precio por metro cuadrado de las viviendas analizadas asciende a 1140€/m<sup>2</sup>, un valor muy próximo a los 1100€/m<sup>2</sup> que cuesta de media una vivienda de nueva planta, a lo cual habría que sumar los gastos por energía para su mantenimiento, mucho mayores que los que requieren los casos analizados, resultando finalmente éstos, más baratos que el modo habitual de construir.

Todas éstas son las razones por las que la madera debe volver a ser el material ligado al hombre que una vez fue, presente en cada capítulo de su vida y aportándole calidez y cobijo.



Fig. 123\_Interior vivienda Bunyesc, espacio vivencial (<https://www.construction21.org>)

## BIBLIOGRAFÍA

### Libros y textos

- Cárdenas, y. C., Maldonado Ramos, L., Barbero Barrera, M. del Mar, & Gil Crespo, I. J. (2008). Sostenibilidad y mecanismos bioclimáticos de la arquitectura vernácula española: El caso de las construcciones subterráneas. Spain, Europe: E.T.S. Arquitectura (UPM).
- Cobo Arias, F. (1986). Los hórreos asturianos: Tipologías y decoración (1a ed.). Oviedo: Principado de asturias, Servicios de Publicaciones.
- Ellis, K. (2016). Thallon, rob. graphic guide to frame construction Library Journals, LLC.
- Fernández Rodríguez, L., & Soler Monrabal, C. (26-29 de Octubre de 2011). El General Panel System de Konrad Wachsmann y Walter Gropius, 1941. Actas del séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Santiago de Compostela, España.
- Frampton, K., Bozal, A., Calatrava, J., & Cava, J. (1999). Estudios sobre cultura tectónica: Poéticas de la construcción en la arquitectura de los siglos XIX y XX. Madrid: Akal.
- Frampton, K., Sainz, J., & Romaguera i Ramió, J. (2009). Historia crítica de la arquitectura moderna (4ª rev y amp, 3ª tirada ed.). Barcelona: Gustavo Gili.
- Giedion, S. (1982). Espacio, tiempo y arquitectura: (el futuro de una nueva tradición) (6ª ed.). Madrid etc.: Dossat.
- Henderson, J. (Febrero de 2009). Brettstapel. An investigation into the properties and merits of Brettstapel construction within the UK market. Glasgow.
- Jacobo, G. (2004). Edificación con madera: prehistoria de una tecnología ecológica. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. Universidad Nacional del Nordeste. Provincia del Chaco, Argentina.
- Jiménez-Landi Martínez, A. (1985). Arquitectura popular española. Estudios Turísticos, ( 86), 3.
- Jodidio, P. (2011). Architecture now!: Wood = arquitectura hoy: Madera = architettura oggi: Legno = arquitectura dos nossos dias: Madeira. Cologne Alemania: Taschen.
- Kelly, B., & Albert Farwell Bemis Foundation. (1951). The prefabrication of houses :A study by the albert farwell bemis foundation of the prefabrication industry in the united states. Cambridge: Technology Press of the Massachusetts Institute of Technology.
- Korvenmaa, P. (1990). The Finnish Wooden House Transformed: American prefabrication, war-time housing and Alvar Aalto. In R. Thorne, C. Powell, & S. Pepper (Eds.), Construction History. Journal of the Construction History Society, vol.6. Cambridge: Carfax publishing company.



- Kostof, S., & Jiménez Blanco Carrillo de Albornoz, María Dolores. (2007; 1988). Historia de la arquitectura (reimp ed.). Madrid: Alianza.
- Laugier, M., Maure Rubio, L., & Veuthey Martínez, M. (1999). Ensayo sobre la arquitectura. Madrid: Akal.
- McLeod, V. (2010). El detalle en la arquitectura contemporánea en madera. Barcelona: Blume.
- Mestre, O. (2016). Efficient offices. Barcelona: Monsa.
- Natural Concept (2015). Desarrollo y construcción vivienda unifamiliar industrializada ad-hoc NZBE (near zero building energy). Aplicación de sistema industrializado al estándar passivhaus.
- Pryce, W. (2006). Arquitectura de madera: Historia universal. Barcelona: Blume.
- Slavid, R. (2005). Arquitectura en madera. Barcelona: Blume.
- Trachtenberg, M., & Hyman, I. (1990). Arquitectura: De la prehistoria a la postmodernidad, la tradición occidental. Los Berrocales del Jarama, Madrid: Akal.
- Traín Pérez, M. (2016). *Madera, material tradicional, una nueva tecnología para la construcción en altura*. Trabajo fin de grado, Universidad de Zaragoza UNIZAR, Zaragoza, España.
- Turan, M. (2009). Reconstructing the balloon frame: a study in the history of architectonics. METU Journal of the Faculty of Architecture.
- Urbán Brotóns, P. (2013). Construcción de estructuras de madera. San Vicente Alicante: Ecu.
- Wachsmann, K. & Gropius, W. (1945). EE.UU. Patente N°. 2,421,305. New York: U.S. Patent Office.
- Wassouf, M. (2014). Passivhaus: De la casa pasiva al estándar : La arquitectura pasiva en climas cálidos = da casa passiva à norma : A arquitetura passiva em climas quentes. Barcelona: Gustavo Gili.

## Revistas y artículos

- Acosta Jaramillo, L. (Diciembre de 2014). La incorporación de materiales sostenibles en el proceso constructivo. AITIM Boletín de Información Técnica nº 292, 44-47.
- Casa Entreencinas. El contralaminado entra en el mundo de las casas pasivas. (Enero de 2013). AITIM Boletín de Información Técnica nº 281, 12-18.
- Cuchí, A. (2016, Octubre). Un nZEB para la rehabilitación. Conarquitectura, 60, 93-95.

- Echaide, R. (Julio de 1990). La cabaña primitiva en la arquitectura actual. Revista de Edificación nº 7, 57-66.
- Kaila, P. (Noviembre de 1998). ARQUITECTURA. Tratados e historia de la construcción en Finlandia. AITIM Boletín de Información Técnica nº 196, 29-36.
- Martínez, L. A. (2017, Enero). El Estándar Passivhaus: una hoja de ruta fiable hacia el edificio de consumo casi nulo, también para los componentes cerámicos. Conarquitectura, 61, 87-92.
- Serra Soriano, B. ( 1 ), Díaz Segura, A. ( 1 ), & Meri de, I. M. (2017). Study and application of the balloon frame system to the industrialization of housing: The case of the american system-built houses of frank lloyd wright. Informes De La Construcción, 69(546).

### **Artículos digitales**

- AITIM. (18 de Julio de 2011). Madera laminada encolada.
- Bastian, Z. & Arnautu, D (2017). Building Certification Guideline. Darmstadt: Passive House Institut.
- Bunyesc, J. (2009). Casa Pasiva Arboretum, Lleida. Extraído el 4 de agosto de 2017 desde <https://www.gbce.es>
- Casa pasiva mediterránea de muy bajo consumo. Passiv Palau. Extraído el 27 de Agosto de 2017 desde <https://www.construction21.org>.
- Casas de entramado ligero. Extraído el 25 de Agosto de 2017 desde <https://www.maderascasais.com>
- Casas de entramado pesado. Extraído el 25 de Agosto de 2017 desde <https://www.maderascasais.com>
- Criterios y algoritmos para componentes certificados Passivhaus: Sistemas constructivos opacos. Extraído el 30 de Agosto de 2017 desde <https://www.passivehouse.com>.
- Documento Básico HE. Ahorro de energía. (Junio de 2017). Código Técnico de la Edificación.
- Edificio Passivhaus certificado. Criterios de certificación para edificios residenciales según el estándar Passivhaus. Extraído el 30 de Agosto de 2017 desde <https://www.passivehouse.com>.
- EnerPHit y EnerPHit+i. Criterios de certificación para rehabilitaciones energéticas con componentes Passivhaus. Extraído el 30 de Agosto de 2017 desde <https://www.passivehouse.com>.
- Entrevista al Dr. Wolfgang Feist. "25 Years of Passive House". Extraído el 27 de Agosto de 2017 desde <https://passiv.de>

- KLH (Enero de 2012). Catálogo de elementos de construcción para casa pasiva. Extraído el 25 de Agosto de 2017 desde <https://www.klh.at>
- KLH (Enero de 2013). Catálogo de elementos de construcción para vivienda. Extraído el 25 de Agosto de 2017 desde <https://www.klh.at>
- Mekjian, S. (2014). Active for more comfort: Passive house. Darmstadt: Passive house Institut. Extraído el 30 de Agosto de 2017 desde <https://www.passivehouse.com>.
- Passive Architecture. Extraído el 2 de Septiembre de 2017 desde <https://www.bepassive.be>
- Requisitos energéticos mínimos – criterios de certificación. Extraído el 22 de Agosto de 2017 desde <https://www.energiehaus.com>.
- The ISOVER Multi-Comfort House. Extraído el 3 de Septiembre de 2017 desde <https://www.isover.es>

## **Páginas web**

- AislaHome.....<https://aislahome.es>
- BioArk, arquitectura biopasiva.....<https://www.bioarkestudio.com>
- Climate-Data.....<https://es.climate-data.org>
- Comisión Europea.....<https://ec.europa.eu>
- Construction21.....<https://www.construction21.org>
- DuqueyZamora Arquitectos.....<https://estudioduqueyzamora.com>
- Energiehaus.....<https://www.energiehaus.es>
- Facebook.....<https://www.facebook.com>
- FoodandAgricultureOrganizationoftheUnitedNations..<https://www.fao.org>
- InternationalPassiveHouseAssociation....<https://passivehouse-international.org>
- KLH.....<https://www.klh.at>
- Maderas Casais.....<https://www.maderascasais.com>
- PAPIK Cases Passives.....<https://www.papik.cat>
- Passipedia.....<https://passipedia.org>
- Passive House Database.....<https://www.passivhausprojekte.de>
- Passivhaus Institut.....<https://www.passiv.de>
- Plataforma Arquitectura.....<https://www.plataformaarquitectura.cl>
- Plataforma Edificación Passivhaus.....<https://www.plataforma-pep.org>
- Rothoblaas.....<https://www.rothoblaas.es>
- Sergio Torre, Arquitecto.....<https://www.sergiotorre.es>
- SlideShare.....<https://es.slideshare.net>





ANEXO

## **ÍNDICE**

BUNYESC	60
ENTREENCINAS	62
PASSIV PALAU	64
EL PLANTÍO	66
RIVAS PASSIVHAUS	68
ESTRELLA DELS VENTS	70

## VIVIENDA BUNYESC

**Arquitecto:**.....Josep Bunyesc

**Ubicación:**.....Lérida

**Superficie construida:** .....176m<sup>2</sup>

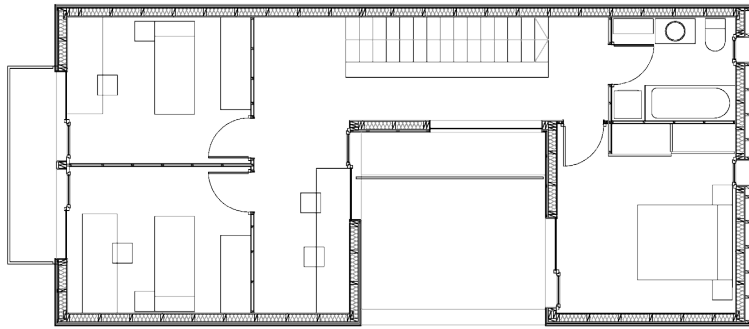
VIVIENDAS			Bunyesc
ENVOLVENTE	Vertical	Entramado ligero pref.	•
		Entramado pesado pref.	
		Panel contralaminado	
	Horizontal	Entramado ligero in situ	
		Entramado ligero pref.	•
		Entramado pesado pref.	
		Panel contralaminado	
AISLAMIENTO	Lana de oveja		•
	Corcho		
	Celulosa		
	Fibras de madera		
	Paja		
	Lana de roca		
	Neopor®		
	Vidrio celular		
	EPS		•
	XPS		
CARPINTERÍA	Madera		•
	Madera y Aislamiento		
	PVC		
	Protección ext. aluminio		
VIDRIO	Doble		•
	Triple		
	Kriptón		
	Argón		•
AHORRO ENERGÉTICO	Placas fotovoltaicas		•
	Captación solar térmica ACS		•
	Recolección aguas pluviales		•



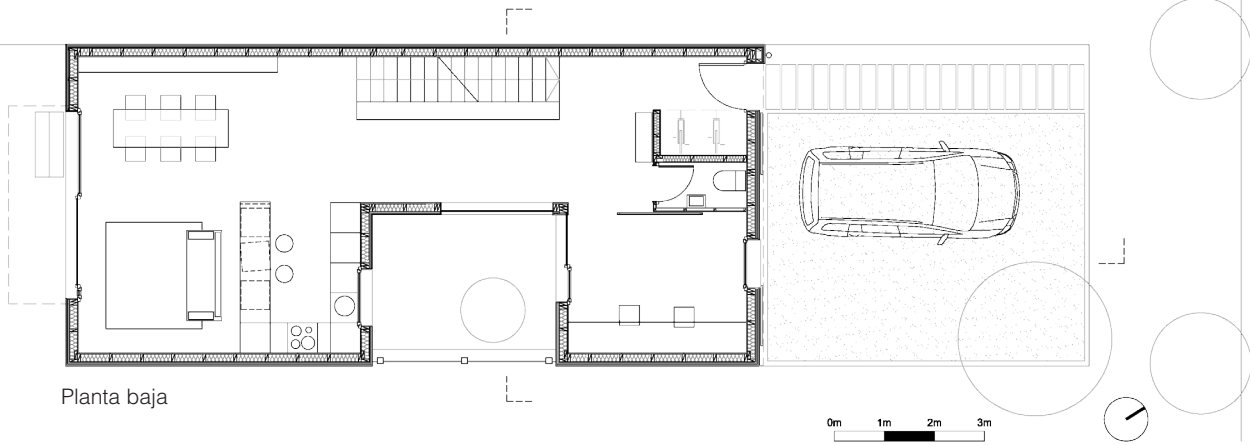
Vista exterior vivienda Bunyesc (<https://www.plataforma-pep.org>)

NOMBRE		Bunyesc
AÑO CONSTRUCCIÓN		2009
INFO CONSTR	Estructura	Entramado ligero prefabr. madera
	Aislamiento	Lana de oveja
TRANSMITANCIAS (W/m <sup>2</sup> K)	Cerramiento opaco (U)	0.215
	Solera (U)	0.35
	Cubierta (U)	0.147
	Ventana (U <sub>w</sub> )	1.65
	Vidrio ventana (U <sub>g</sub> )	1.2
	Puerta acceso (U <sub>d</sub> )	1.8
HERMETICIDAD n <sub>50</sub> (h <sup>-1</sup> )		0.6
DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m <sup>2</sup> a)	Calefacción	7
	Refrigeración	-
	Energética primaria	52

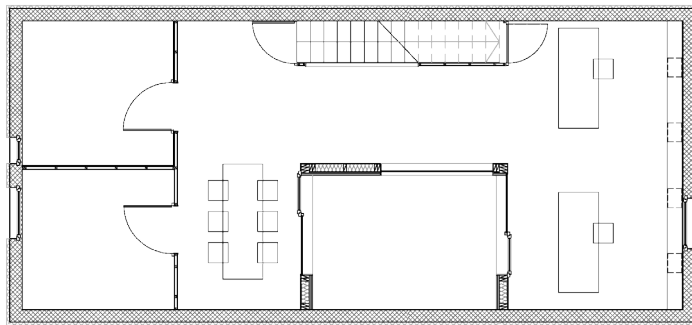




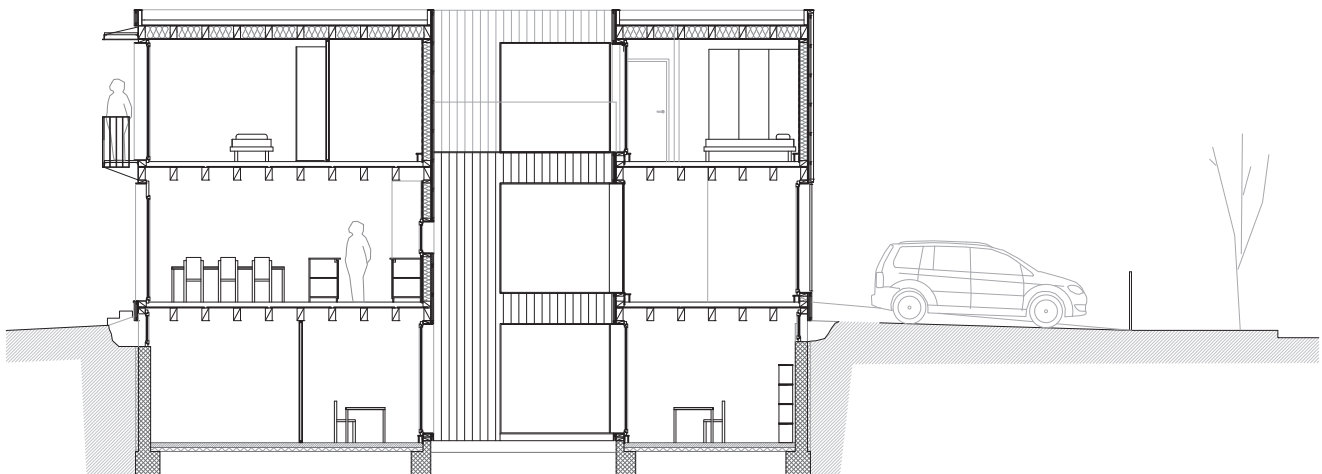
Planta primera



Planta baja



Planta sótano



Sección longitudinal Plantas y sección longitudinal (Bunyesc, 2009)

## VIVIENDA ENTREENCINAS

**Arquitecto:**.....DuqueyZamora Arquitectos

**Ubicación:**.....Villanueva de Pría, Asturias

**Superficie construida:** .....131m<sup>2</sup>

VIVIENDAS			Entre Encinas
ENVOLVENTE	Vertical	Entramado ligero pref.	
		Entramado pesado pref.	
		Panel contralaminado	●
	Horizontal	Entramado ligero in situ	
		Entramado ligero pref.	
		Entramado pesado pref.	
		Panel contralaminado	●
AISLAMIENTO	Lana de oveja		
	Corcho		●
	Celulosa		
	Fibras de madera		
	Paja		
	Lana de roca		
	Neopor®		
	Vidrio celular		●
	EPS		
	XPS		
CARPINTERÍA	Madera		●
	Madera y Aislamiento		
	PVC		
	Protección ext. aluminio		
VIDRIO	Doble		●
	Triple		
	Kriptón		
	Argón		●
AHORRO ENERGÉTICO	Placas fotovoltaicas		
	Captación solar térmica ACS		●
	Recolección aguas pluviales		●

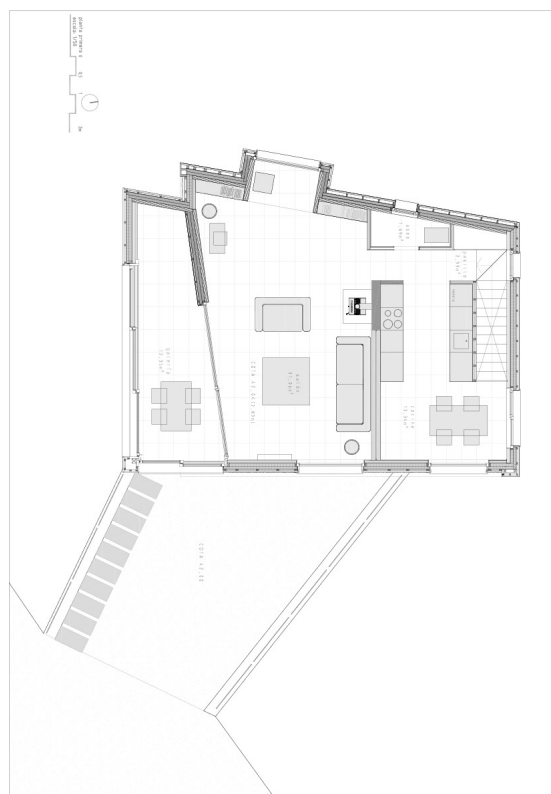


Vista exterior vivienda EntreEncinas (<https://www.plataforma-pep.org>)

NOMBRE		Entre Encinas
AÑO CONSTRUCCIÓN		2012
INFO CONSTR	Estructura	Panel madera contra-laminada
	Aislamiento	Corcho
TRANSMITANCIAS (W/m <sup>2</sup> K)	Cerramiento opaco (U)	0.2
	Solera (U)	0.24
	Cubierta (U)	0.19
	Ventana (U <sub>w</sub> )	1.3
	Vidrio ventana (U <sub>g</sub> )	1.1
	Puerta acceso (U <sub>d</sub> )	0.76
HERMETICIDAD n <sub>50</sub> (h <sup>-1</sup> )		0.4
DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m <sup>2</sup> a)	Calefacción	12
	Refrigeración	-
	Energética primaria	104



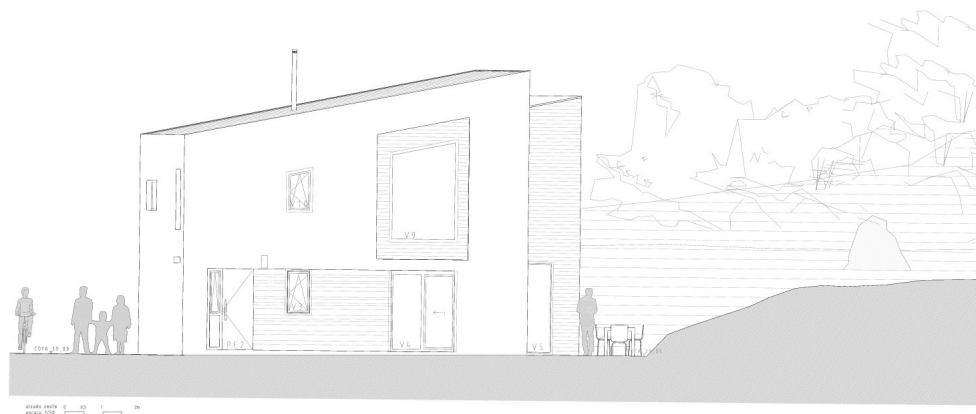
Planta baja



Planta primera



Alzado sur



Alzado oeste

Plantas y alzados (<https://www.plataformaarquitectura.cl>)



## VIVIENDA PASSIVPALAU

**Arquitecto:**.....Eva Jordan Guerrero

**Ubicación:**.....Palau de Plegamans, Barcelona

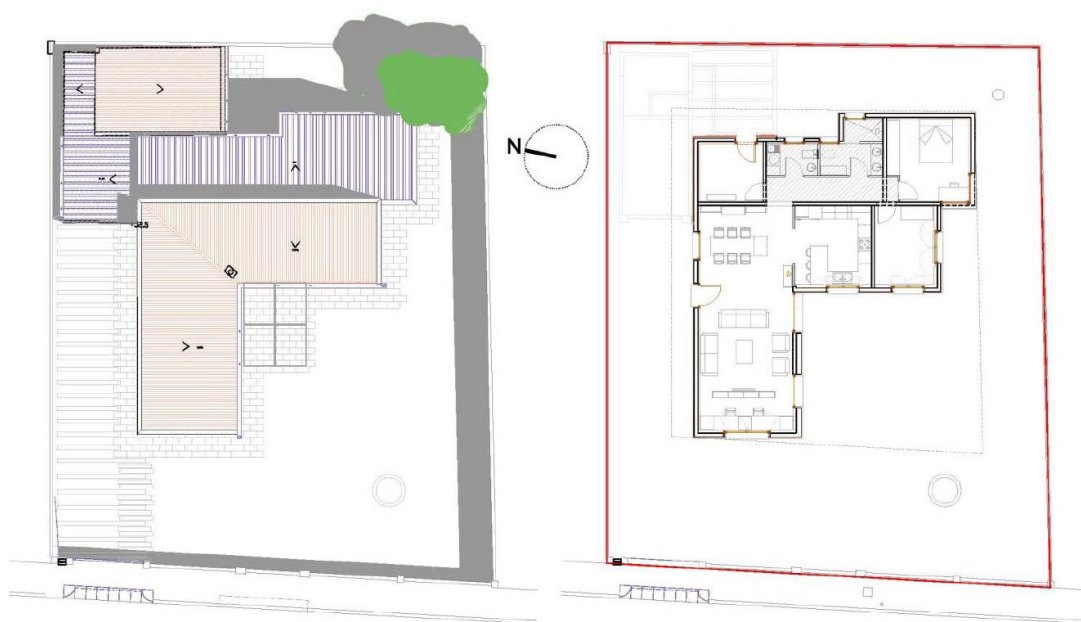
**Superficie construida:** .....106m<sup>2</sup>

VIVIENDAS			Passiv Palau
ENVOLVENTE	Vertical	Entramado ligero pref.	●
		Entramado pesado pref.	
		Panel contralaminado	
	Horizontal	Entramado ligero in situ	●
		Entramado ligero pref.	
		Entramado pesado pref.	
		Panel contralaminado	
AISLAMIENTO	Lana de oveja		
	Corcho		
	Celulosa		●
	Fibras de madera		
	Paja		
	Lana de roca		
	Neopor®		●
	Vidrio celular		
	EPS		
	XPS		
CARPINTERÍA	Madera		●
	Madera y Aislamiento		
	PVC		
	Protección ext. aluminio		
VIDRIO	Doble		●
	Triple		
	Kriptón		
	Argón		●
AHORRO ENERGÉTICO	Placas fotovoltaicas		
	Captación solar térmica ACS		
	Recolección aguas pluviales		



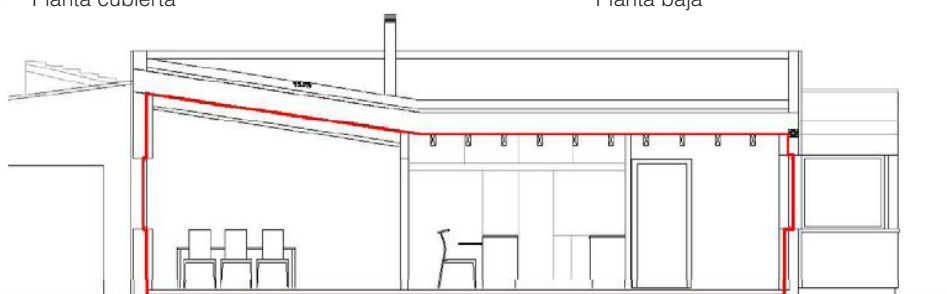
Vista exterior vivienda PassivPalau (<https://www.plataforma-pep.org>)

NOMBRE		Passiv Palau
AÑO CONSTRUCCIÓN		2013
INFO CONSTR	Estructura	Entramado ligero modular. madera
	Aislamiento	Celulosa
TRANSMITANCIAS (W/m <sup>2</sup> K)	Cerramiento opaco (U)	0.146
	Solera (U)	0.395
	Cubierta (U)	0.115
	Ventana (U <sub>w</sub> )	1.52
	Vidrio ventana (U <sub>g</sub> )	1.10
	Puerta acceso (U <sub>d</sub> )	0.789
HERMETICIDAD n <sub>50</sub> (h <sup>-1</sup> )		0.21
DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m <sup>2</sup> a)	Calefacción	9
	Refrigeración	-
	Energética primaria	117



Planta cubierta

Planta baja



Sección. Línea de estanqueidad en rojo

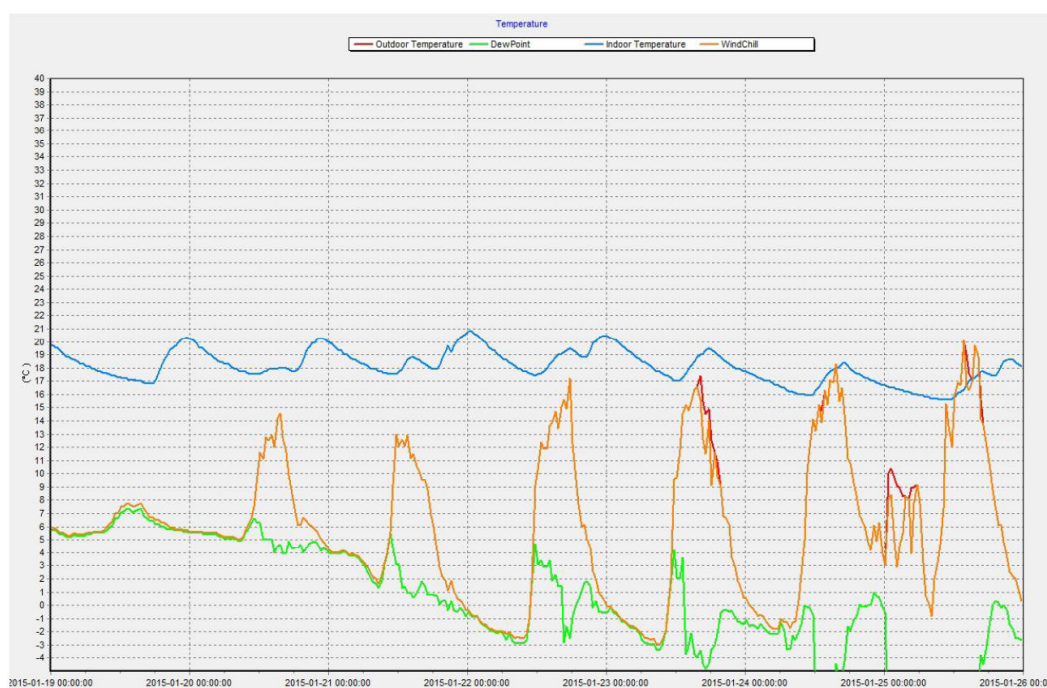


Tabla registro de temperaturas del 19/1/2015 al 26/1/2015.

En azul, temperatura interior.

En rojo, temperatura exterior.

En naranja, sensación térmica.

En verde, temperatura de punto de rocío.

Plantas, sección y tabla (<https://www.construction21.org>)

## VIVIENDA EL PLANTÍO

**Arquitecto:**.....Sergio Torre

**Ubicación:**.....Carrión de los Condes, Palencia

**Superficie construida:** .....282m<sup>2</sup>

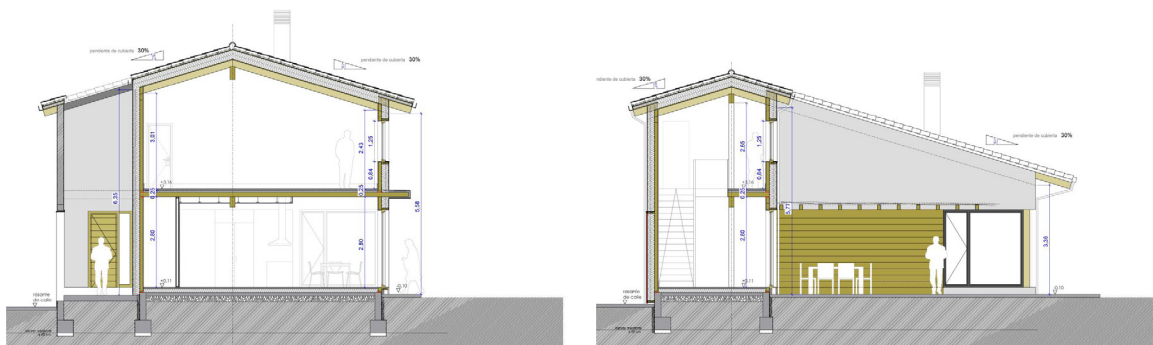
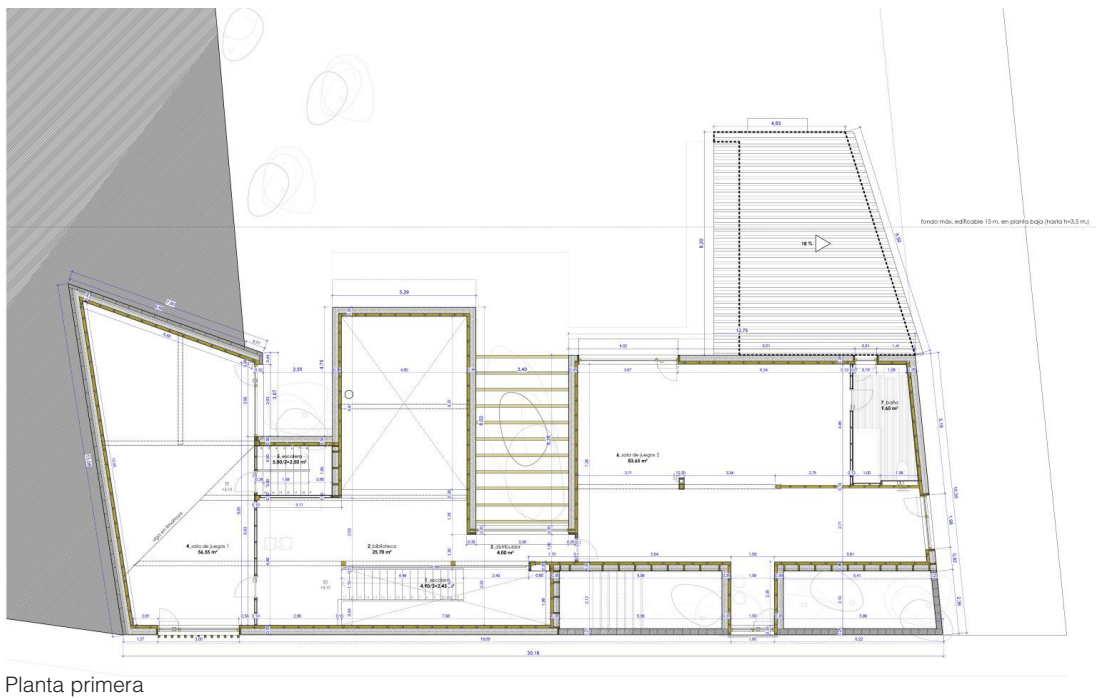
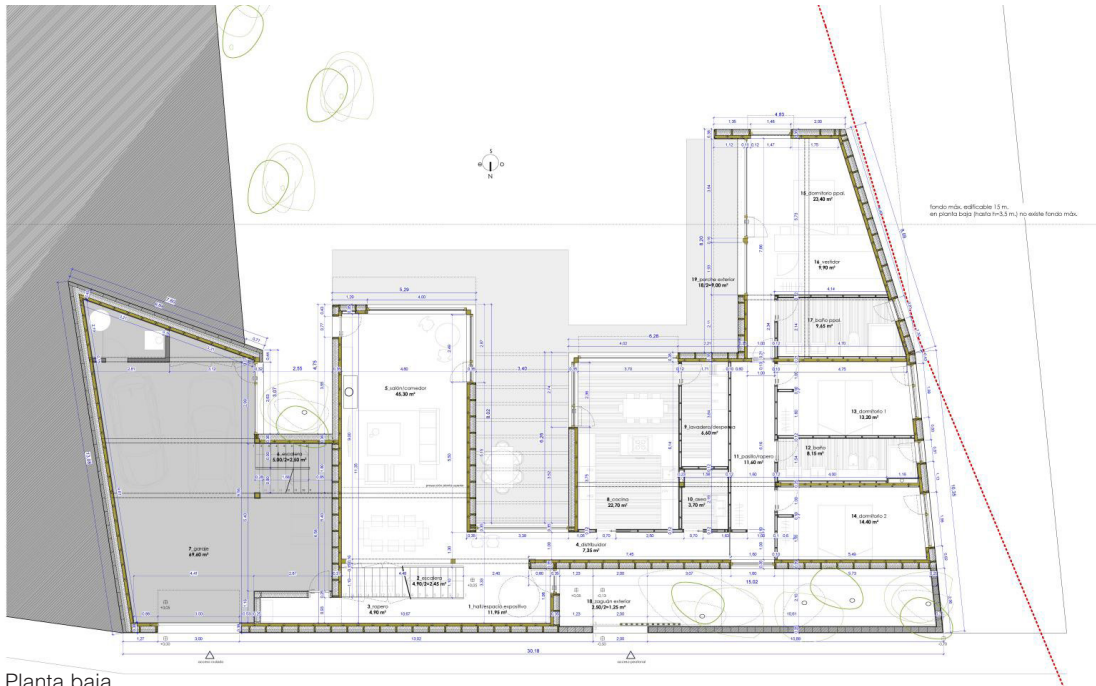
VIVIENDAS			El Plantío
ENVOLVENTE	Vertical	Entramado ligero pref.	
		Entramado pesado pref.	
		Panel contralaminado	•
	Horizontal	Entramado ligero in situ	
		Entramado ligero pref.	
		Entramado pesado pref.	
		Panel contralaminado	•
AISLAMIENTO	Lana de oveja		
	Corcho		
	Celulosa		
	Fibras de madera		•
	Paja		
	Lana de roca		
	Neopor®		
	Vidrio celular		
	EPS		
	XPS		•
CARPINTERÍA	Madera		•
	Madera y Aislamiento		
	PVC		
	Protección ext. aluminio		•
VIDRIO	Doble		
	Triple		•
	Kriptón		
	Argón		•
AHORRO ENERGÉTICO	Placas fotovoltaicas		
	Captación solar térmica ACS		•
	Recolección aguas pluviales		



Vista exterior vivienda El Plantío (<https://www.plataforma-pep.org>)

NOMBRE		El Plantío
AÑO CONSTRUCCIÓN		2014
INFO CONSTR	Estructura	Panel madera contra-laminada.
	Aislamiento	Fibra de madera
TRANSMITANCIAS (W/m <sup>2</sup> K)	Cerramiento opaco (U)	0.155
	Solera (U)	0.229
	Cubierta (U)	0.153
	Ventana (U <sub>w</sub> )	0.73
	Vidrio ventana (U <sub>g</sub> )	0.5
	Puerta acceso (U <sub>d</sub> )	0.69
HERMETICIDAD n <sub>50</sub> (h <sup>-1</sup> )		0.4
DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m <sup>2</sup> a)	Calefacción	13
	Refrigeración	-
	Energética primaria	92





Plantas y secciones (<https://www.sergiotorre.es>)

RIVAS PASSIVHAUS

Arquitecto:.....David Marsinyach Ros

Ubicación:.....Rivas-Vaciamadrid, Madrid

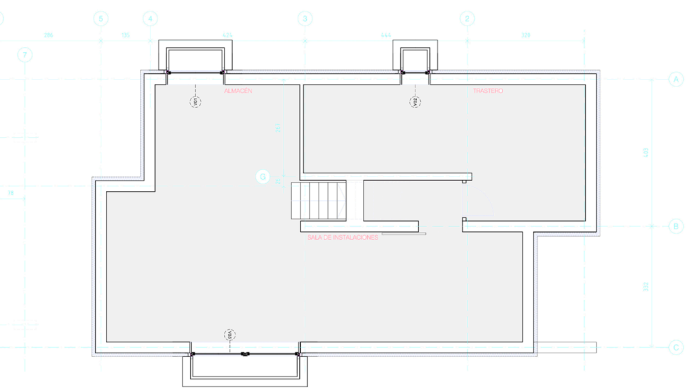
Superficie construida: .....241m²



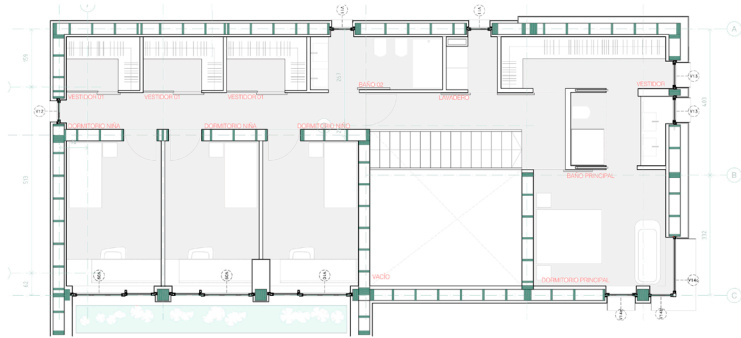
Vista exterior vivienda Rivas (<https://www.plataforma-pep.org>)

VIVIENDAS			Rivas Passivhaus
ENVOLVENTE	Vertical	Entramado ligero pref.	●
		Entramado pesado pref.	
		Panel contralaminado	
	Horizontal	Entramado ligero in situ	
		Entramado ligero pref.	●
		Entramado pesado pref.	
		Panel contralaminado	
AISLAMIENTO	Lana de oveja		
	Corcho		
	Celulosa		
	Fibras de madera		
	Paja		
	Lana de roca		
	Neopor®		
	Vidrio celular		●
	EPS		●
	XPS		
CARPINTERÍA	Madera		
	Madera y Aislamiento		
	PVC		●
	Protección ext. aluminio		
VIDRIO	Doble		
	Triple		●
	Kriptón		
	Argón		
AHORRO ENERGÉTICO	Placas fotovoltaicas		
	Captación solar térmica ACS		●
	Recolección aguas pluviales		

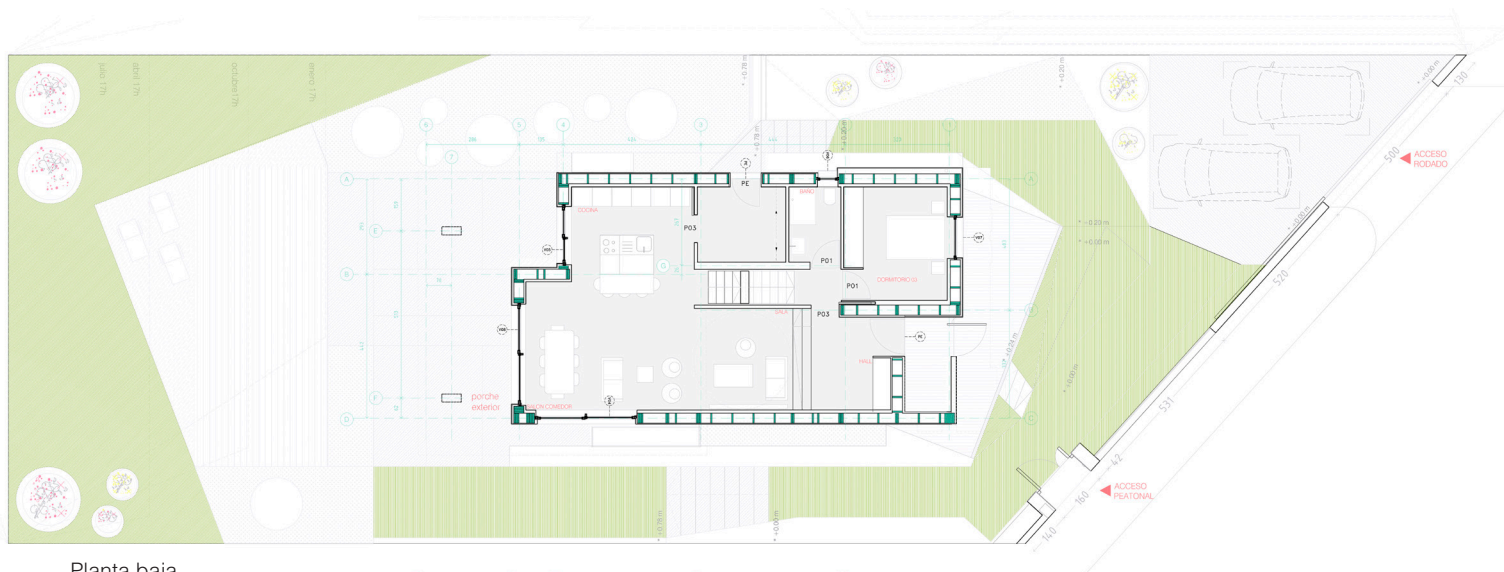
NOMBRE		Rivas Passivhaus
AÑO CONSTRUCCIÓN		2015
INFO CONSTR	Estructura	Entramado ligero prefabr. madera
	Aislamiento	EPS
TRANSMITANCIAS (W/m²K)	Cerramiento opaco (U)	0.145
	Solera (U)	0.395
	Cubierta (U)	0.124
	Ventana (U <sub>w</sub> )	0.96
	Vidrio ventana (U <sub>g</sub> )	0.621
	Puerta acceso (U <sub>d</sub> )	1.21
HERMETICIDAD n <sub>50</sub> (h <sup>-1</sup> )		0.6
DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m²a)	Calefacción	14
	Refrigeración	8
	Energética primaria	108



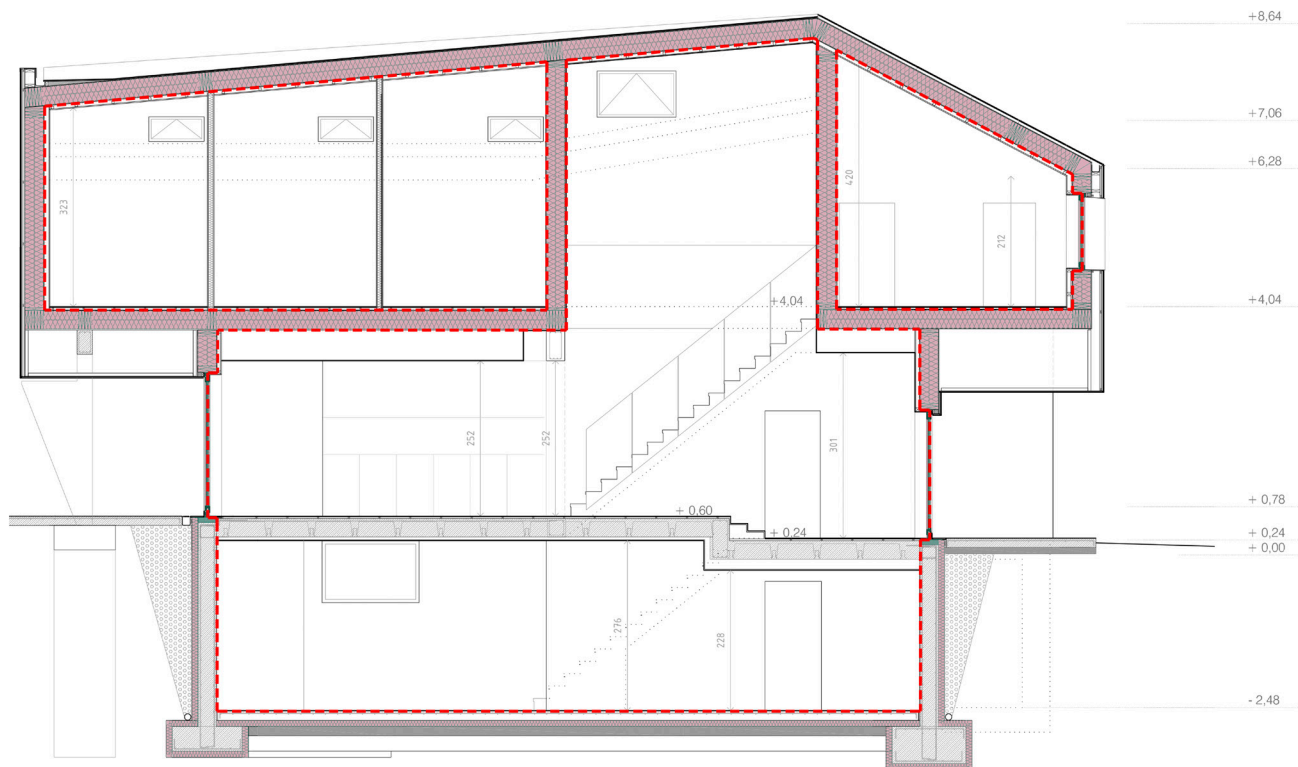
Planta sótano



Planta primera



Planta baja



Sección transversal  
Sombreado en rojo el aislamiento  
Línea de trazos roja capa hermética

Plantas y sección (Natural Concept, 2015)



## VIVIENDA ESTRELLA DELS VENTS

**Arquitecto:**.....Guillermo Allegrini

**Ubicación:**.....Cantonigròs, Barcelona

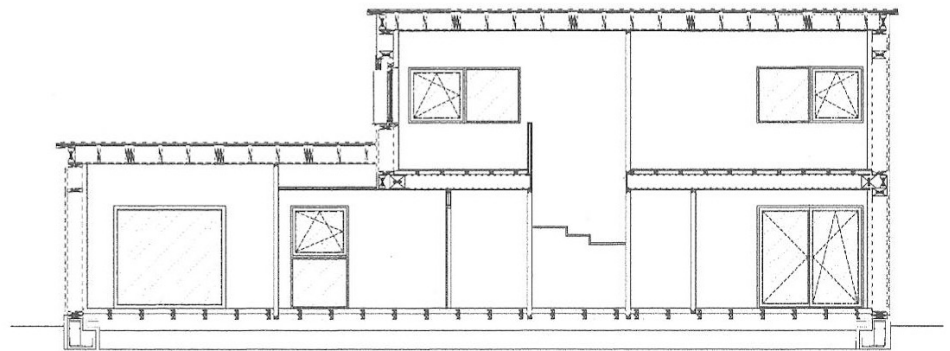
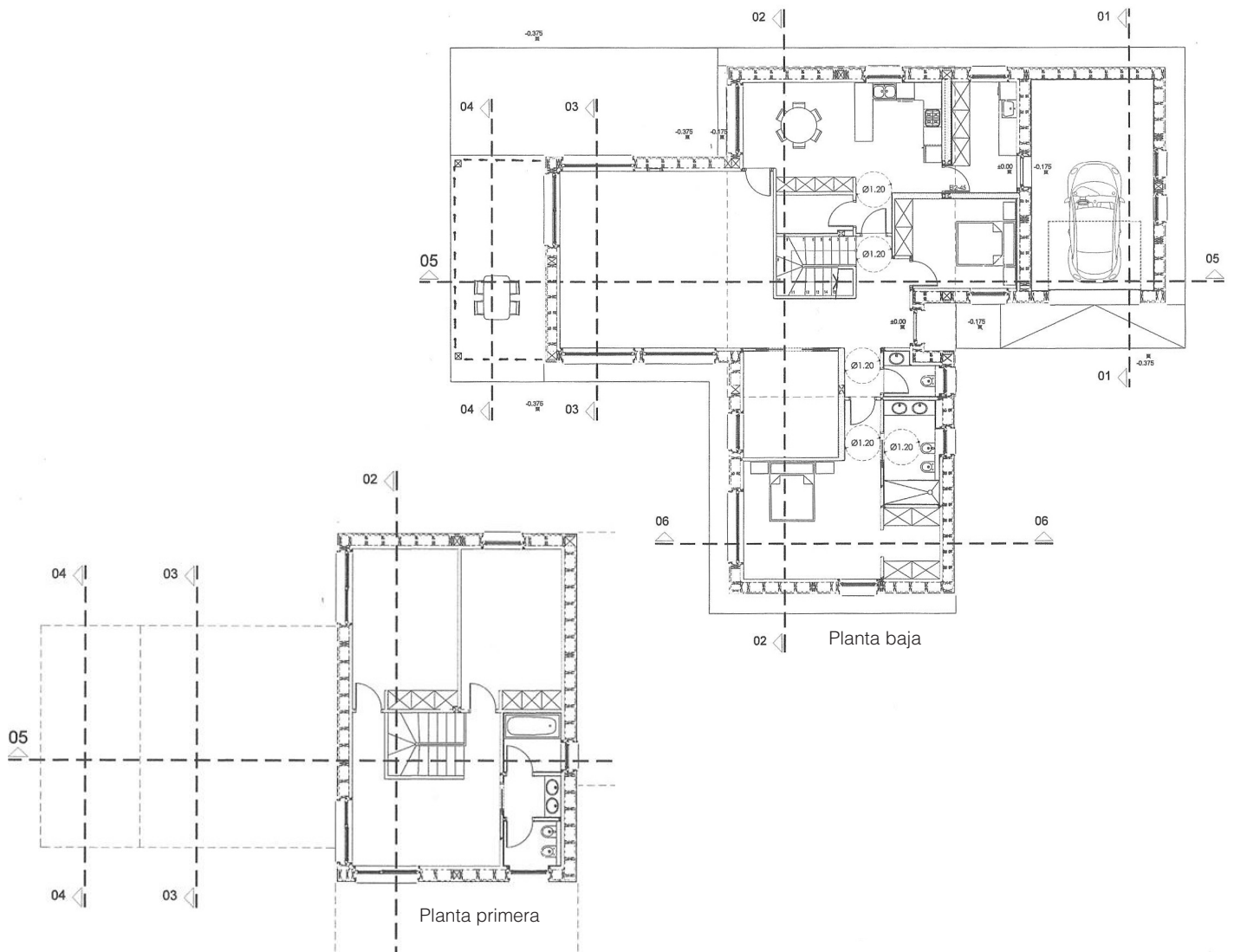
**Superficie construida:** .....212m<sup>2</sup>

VIVIENDAS			Estrella dels Vents
ENVOLVENTE	Vertical	Entramado ligero pref.	
		Entramado pesado pref.	●
		Panel contralaminado	
	Horizontal	Entramado ligero in situ	
		Entramado ligero pref.	
		Entramado pesado pref.	●
		Panel contralaminado	
AISLAMIENTO	Lana de oveja		
	Corcho		
	Celulosa		
	Fibras de madera		●
	Paja		●
	Lana de roca		●
	Neopor®		
	Vidrio celular		
	EPS		
	XPS		●
CARPINTERÍA	Madera		
	Madera y Aislamiento		●
	PVC		
	Protección ext. aluminio		●
VIDRIO	Doble		
	Triple		●
	Kriptón		
	Argón		●
AHORRO ENERGÉTICO	Placas fotovoltaicas		●
	Captación solar térmica ACS		
	Recolección aguas pluviales		●

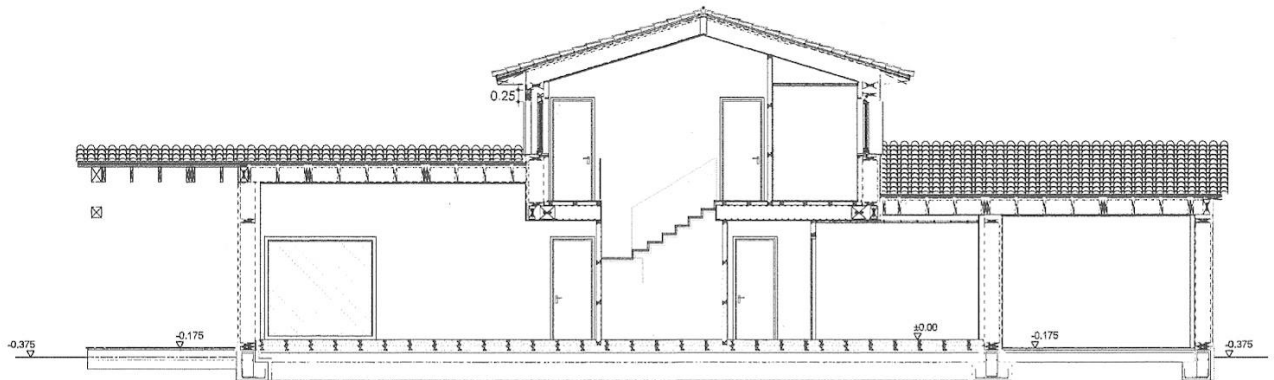


Vista exterior vivienda Estrella dels Vents (<https://www.plataforma-pep.org>)

NOMBRE		Estrella dels Vents
AÑO CONSTRUCCIÓN		2016
INFO CONSTR	Estructura	Entramado semipesado prefabr. madera
	Aislamiento	Paja + lana de roca
TRANSMITANCIAS (W/m <sup>2</sup> K)	Cerramiento opaco (U)	0.127
	Solera (U)	0.10
	Cubierta (U)	0.086
	Ventana (U <sub>w</sub> )	0.92
	Vidrio ventana (U <sub>g</sub> )	0.60
	Puerta acceso (U <sub>d</sub> )	0.75
HERMETICIDAD n <sub>50</sub> (h <sup>-1</sup> )		0.6
DEMANDA ENERGÉTICA (kWh/m <sup>2</sup> a)	Calefacción	14
	Refrigeración	-
	Energética primaria	68



Sección 02



Sección 05

Plantas y secciones (<https://www.facebook.com>)