

# Monitorización y seguimiento del comportamiento energético de una vivienda con certificación Passivhaus

Hidalgo Betanzos, Juan María<sup>a</sup>, Escudero-Revilla, Cesar<sup>b</sup>, García-Gáfaró, Carlos<sup>c</sup>, Odriozola Maritorea, Moises<sup>a</sup>, Millan Garcia, José Antonio<sup>a</sup>, Uriarte Gonzalo-Bilbao, Adelina<sup>d</sup>

<sup>a</sup> ENEDI Group, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Escuela Universitaria Politécnica de Donostia-San Sebastián, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Plaza Europa 1, 20018 Donostia-San Sebastián, [juanmaria.hidalgo@ehu.es](mailto:juanmaria.hidalgo@ehu.es); <sup>b</sup> ENEDI Group, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Alameda Urquijo sn., 48013, Bilbao, [cesar.escudero@ehu.es](mailto:cesar.escudero@ehu.es); <sup>c</sup> ENEDI Group, Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación del Gobierno Vasco, Área Térmica, Aguirrelanda 10, 01013, Vitoria-Gasteiz, [carlos.garciaga@ehu.es](mailto:carlos.garciaga@ehu.es); <sup>d</sup> Técnico de promoción, Construcciones Urrutia S.A., Avenida de los derechos humanos, 17, 01015, Vitoria-Gasteiz, [adelina@urrutiap.com](mailto:adelina@urrutiap.com).

## RESUMEN

Se presenta el seguimiento y estudio del comportamiento energético real de una vivienda con certificación PassivHaus. La monitorización se ha articulado en torno a unos objetivos específicos, orientados al control de los principales puntos de transferencia de calor. Incluyendo los datos obtenidos del sistema de ventilación, caudales y recuperación de calor. Se monitoriza en detalle el comportamiento higrotérmico de esta vivienda de baja demanda de energía de climatización, midiendo con alta precisión en 59 puntos de la envolvente, los encuentros de fachada-cubierta, la estructura, las carpinterías y las particiones interiores; así como 27 puntos del confort ambiental interior. La medición analizada contempla 2 meses de invierno y 2 de primavera, y se están registrando datos de verano para estudiar ampliarla a un año. Los datos registrados permiten generar un modelo energético grey-box que permite determinar la demanda energética para un año meteorológico tipo y unas condiciones de uso normalizadas. Se discute el grado de cumplimiento de los objetivos térmicos de los componentes monitorizados, todo ello con un enfoque práctico que permite avanzar hacia sistemas constructivos optimizados para el objetivo EECN actual.

**PALABRAS CLAVE:** Passivhaus, monitorización energética, edificios de consumo de energía casi nula, nZEB, eficiencia energética.

## 1. INTRODUCCIÓN

El horizonte actual de Edificios de Consumo de Energía Casi Nula (EECN o nZEB) nos enfrenta a todos los profesionales a unas dificultades técnicas, económicas y de gestión de todo el proceso constructivo. Las dificultades y retrasos en la trasposición de las Directivas Europeas, como la EPBD 2010/31/CE, han evidenciado que es necesario dar un impulso mayor para desarrollar los nZEB.

El potencial de la monitorización energética para el ahorro energético es amplio, incluso para mejorar los hábitos de los usuarios (Healy, 2010) (Spataru, 2010). Algunos estudios recientes se centran en el ahorro económico de las viviendas pasivas a lo largo de su ciclo de vida (Johnstone, 2011), que subrayan el ahorro global obtenido entre los costes iniciales superiores y el uso diario que compensa ampliamente dicha inversión inicial. Numerosos proyectos europeos como “Passiv-On” o “Build with care” han creado entregables sobre las barreras y claves del proceso hacia nZEB (Tofield, B. 2012).

Sin embargo, nuestra sociedad cercana mira escéptica tanto los edificios pasivos, como las expectativas de Europa. En gran parte se debe al contexto socioeconómico local de la cuenca mediterránea, pero más allá de esta situación, la desconfianza se basa en la falta de información cercana sobre las ventajas y garantías de estos edificios. Por ello, cobra más relevancia que nunca la medición de los consumos reales de energía de una de las primeras viviendas pasivas de España en condiciones de uso normales para poder verificar su certificación.

Se presenta el estudio energético de una vivienda unifamiliar pasiva en nuestro entorno, con unas condiciones climatológicas específicas y teniendo en cuenta su uso diario. Un edificio local, diseñado y ejecutado por gremios profesionales locales, que han sabido trasladar y adaptar las experiencias centro europeas de los últimos treinta años en un edificio acorde al mercado local.

## 2. OBJETIVO

Se desea caracterizar energéticamente una vivienda pasiva en el norte de la península Ibérica y comprender los aspectos más importantes que pueden permitir que un edificio se considere de consumo de energía casi nulo (EECN / nZEB).

## 3. DESCRIPCIÓN DEL CASO

### 3.1. Edificio monitorizado

El edificio monitorizado pertenece a un conjunto de tres viviendas unifamiliares diseñadas por CLIM arquitectos acorde a los requisitos del Passivhaus Institut. Construida en los primeros seis meses de 2012, obtuvo la certificación passivhaus definitiva a principios de 2013. El estudio de monitorización se ha implantado en la vivienda de mayores dimensiones.

La vivienda es de una sola planta rectangular y se orienta para favorecer la captación solar. Su cubierta a dos aguas define un alero perimetral e incluye vuelos de sombreamiento adicionales sobre las ventanas de la orientación sur. La estructura es tradicional de pórticos de hormigón armado, cimentada sobre solera de hormigón armado y cubierta por dos losas inclinadas que forman el tejado. Las fachadas se ejecutan con una hoja principal de bloque de hormigón aligerado con arcilla expandida, con 16cm de aislamiento térmico exterior de EPS y trasdosado interior de placa de yeso laminado con lana mineral en su interior. Las características de los principales materiales y componentes de la envolvente se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1 - Envolvente térmica, secciones constructivas y componentes

<b>FACHADA</b> <b>U = 0,143 W/m<sup>2</sup>K</b>	$\lambda$ [W/(mK)]	<b>Espesor</b> [mm]	<b>SOLERA</b> <b>U = 0,160 W/m<sup>2</sup>K</b>	$\lambda$ [W/(mK)]	<b>Espesor</b> [mm]
Revoco exterior	0,870	6	EPS Neopor	0,036	160
EPS Neopor	0,032	160	Solera de hormigón	2,400	300
Adhesivo	0,870	5	EPS Neopor	0,036	50
Raseo hidrófugo	1,300	15	Recrecido	1,300	50
Arliblock	0,460	200	Tarima flotante	0,130	15
Yeso proyectado	0,570	15			
Lana de roca	0,036	50			
Placa yeso laminado	0,250	15			
<b>CUBIERTA</b> <b>U = 111 W/m<sup>2</sup>K</b>	$\lambda$ [W/(mK)]	<b>Espesor</b> [mm]	<b>CARPINTERÍAS</b>	<b>U</b> [W/(m <sup>2</sup> K)]	<b>F. solar</b> [%]
EPS Neopor	0,032	120	Marco mixto madera/aluminio	1,00	-
Losa de hormigón	2,400	220	Vidrio triple argón/B.Emisivo	0,60	50
EPS Neopor	0,032	160	Conjunto carpintería tipo	0,9	-

Los usos principales de la vivienda se alinean en el lado sur. El porche de entrada da acceso al comedor que funciona como distribuidor central y conecta el salón con la cocina, el estudio y los dormitorios. Los usos secundarios como cocina, aseos, vestidor y cuarto de instalaciones se organizan en el lado norte, como puede verse en la Figura 1. Las distintas orientaciones tienen usos diferentes y los huecos mayores están en las orientaciones sur y oeste. La envolvente térmica del edificio mantiene la continuidad y el solape de los aislamientos, como puede verse en la sección constructiva de la Figura 2.

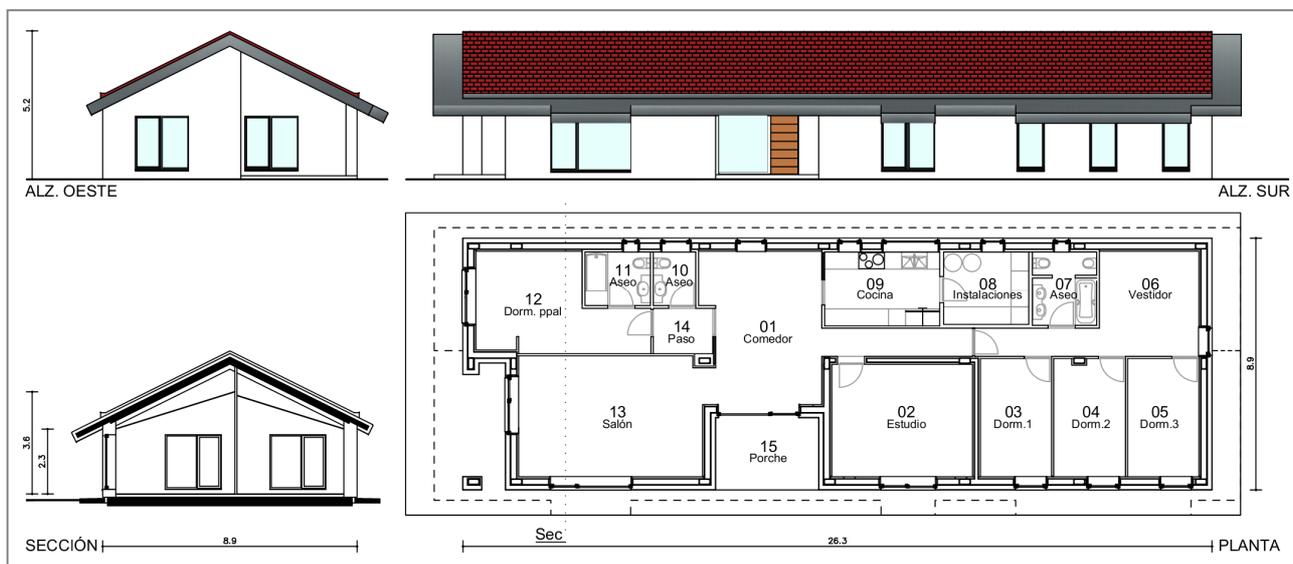


Figura 1 - Planta, sección y alzados de la vivienda

A nivel de instalaciones o sistemas activos, el edificio tiene una demanda reducida de calefacción, que se cubre con una estufa puntual de pellets ubicada en el salón. La estufa estanca toma el aire necesario directamente a través de un conducto integrado en la fachada y expulsa los gases de combustión directamente en la cubierta a través de una chimenea vertical por tiro natural.

La renovación de aire se produce de forma controlada con un sistema de ventilación mecánica controlada (VMC) con recuperación de calor y regulación de caudal variable, con posibilidad de bypass. Durante el periodo monitorizado se ha mantenido la posición del caudal de renovación en 0,7 renovaciones por hora.

La generación de Agua Caliente Sanitaria (ACS) se apoya en un colector solar térmico dotado de un acumulador de agua precalentada que se introduce en una bomba de calor de aire de alta eficiencia para almacenar el agua a la temperatura de servicio final.

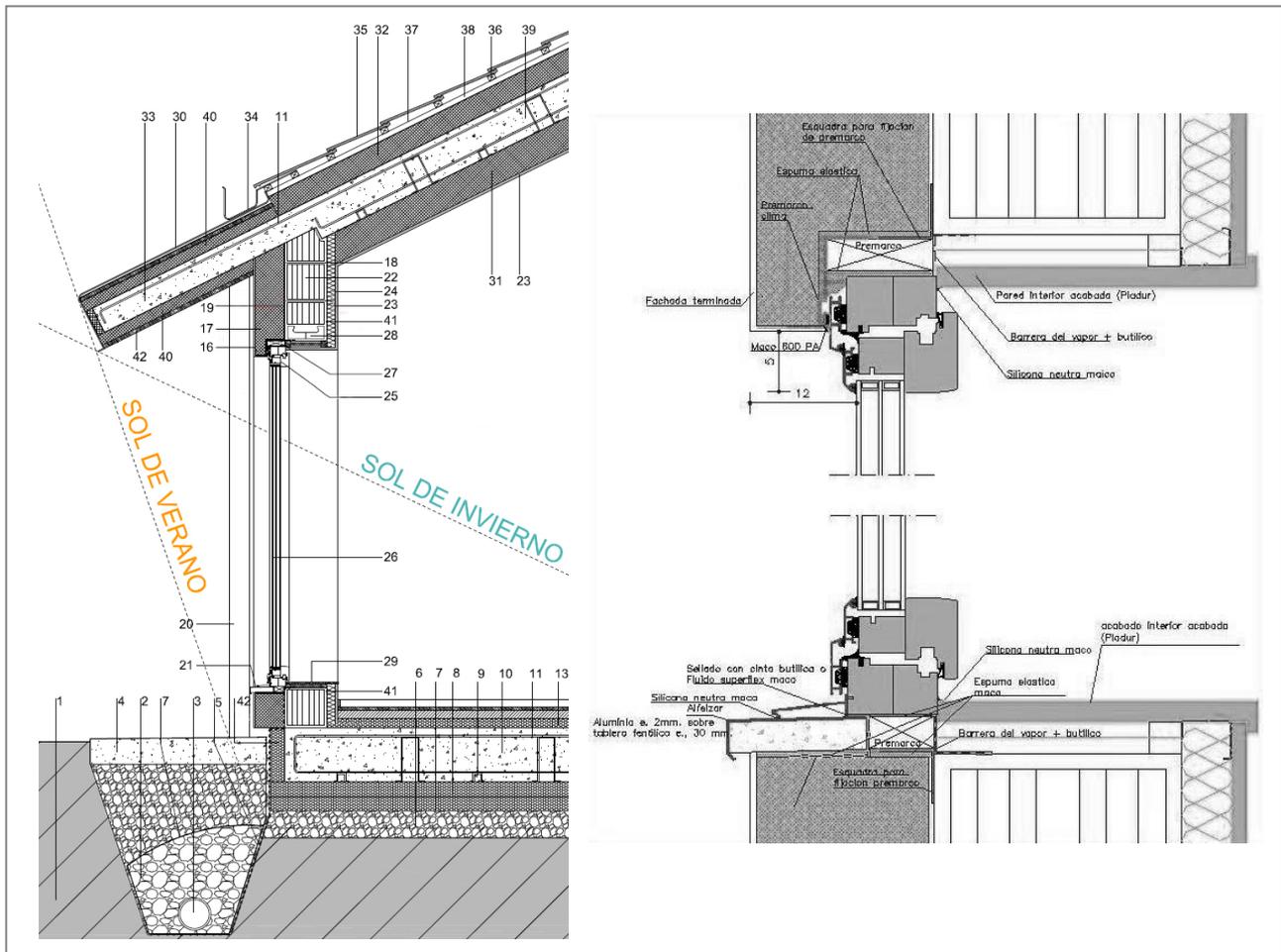


Figura 2 - Sección constructiva de envolvente térmica y detalle de carpintería

### 3.2. Sistema de monitorización

Una vez conocido el edificio y sus componentes, se definió una estrategia para controlar los distintos aspectos que afectan al comportamiento energético: envolvente, puentes térmicos, calefacción, ventilación, infiltraciones y actividad interna. Controlar esos aspectos en detalle ha requerido definir unos objetivos específicos y atender a los condicionantes más importantes recogidos en la Tabla 2 – Objetivos y condicionantes específicos de la monitorización Tabla 2, para desarrollar un sistema preciso que ofrecía las mayores posibilidades. La monitorización tuvo en cuenta la optimización de recursos, los breves plazos y la versatilidad de los equipos. El sistema ha sido objeto de un seguimiento continuo y reajustes durante el proceso.

Tabla 2 – Objetivos y condicionantes específicos de la monitorización

OBJETIVOS	CONDICIONANTES
Comportamiento higrotérmico del aire interior (horizontal y vertical)	Ocupación de la vivienda (organización y seguridad)
Comportamiento térmico de la envolvente térmica	Envolvente hermética (conexiones exteriores)
Efecto de la estructura y su aislamiento térmico	Falsos techos inaccesibles (mediciones de cubierta)
Efecto de los puentes térmicos y su aislamiento térmico	La VMC cuenta con sensores de T. en el intercambiador
Comportamiento de las carpinterías exteriores	
Efecto de las particiones interiores	
Nivel de infiltraciones	
Ventilación efectiva y recuperación de calor de la VMC	

En base a los objetivos específicos y los condicionantes estudiados, se planteó medir aspectos del interior y del exterior de la vivienda. En el interior se miden la Temperatura Seca y Humedad Relativa (HR) del aire en la mayor parte de las estancias. Además, se mide la temperatura superficial de la fachada, los pilares trasdosados, las particiones interiores y las carpinterías. En el exterior se controlan tanto las temperaturas superficiales de las fachadas, como las condiciones ambientales de radiación, temperatura, humedad, presión y viento por medio de una estación meteorológica. Del mismo modo, se estudian las condiciones ambientales del porche de entrada y su efecto invernadero.

A nivel de equipos, el sistema se basa en un único adquisidor de datos central que recoge los datos analógicos de un conjunto de sensores conectados por cables de extensión. El adquisidor o Convertidor Analógico-Digital (ADC) transforma las lecturas analógicas de los sensores en valores digitales que se registran en el disco de almacenamiento de un ordenador portátil. Para mayor seguridad, se equipa el adquisidor y el ordenador con un Sistema de Alimentación

Independiente (SAI) para evitar subidas de tensión y poder cubrir pequeños cortes de energía de hasta 1 hora. En la Tabla 3 pueden verse los principales equipos de medida y en la Figura 3 hay un esquema del sistema de monitorización.

Tabla 3 - Instrumentación instalada

EQUIPO / PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES MEDIDAS	NÚM.
Sensor de Temperatura Ambiente	RTD, PT100 (varilla)	°C	21
Sensor de Temperatura superficial	RTD, PT100 (pletina, bola)	°C	57
Sensor de Humedad Relativa	HIH-4000-001	%	6
Sensor de Radiación horiz. global	Kipp&Zonnen, CMP11	W/m <sup>2</sup>	1
Estación meteorológica	VAISALA, WXT520	°C, mm, mbar, m/s, %.	1
Sensor de Flujo de calor	Ahlborn, Wärmefluss	W/m <sup>2</sup>	3
Watímetro + Controlador	JUMO, dTron 304	W	2
Adquisidor de datos	AGILENT, Measure Unit 34980A	Analógico-Digital	1
Ordenador portátil	ASUS, Eee Pc	Digital	1
S.A.I.	CEGASA, Danubio 700	-	1

El sistema cuenta con un software de gestión que incluye la definición de canales de lectura, los filtrados y el periodo de muestreo. El ordenador ha contado con conexión a internet y se configuró el envío de copias de seguridad diarias a través de correo electrónico. Se ha empleado además un sistema de acceso y control remoto al ordenador instalado en la vivienda para realizar operaciones de seguimiento y mantenimiento sin necesidad de desplazarse.

El funcionamiento del sistema es continuo y se establecieron periodos de muestreo multiplexado de 1 minuto, con una medición prácticamente simultánea de todos los canales. Cabe destacar que al obtener datos de la medición cada minuto se pueden ver la mayor parte de las acciones de los usuarios y comprender la incidencia del factor humano.

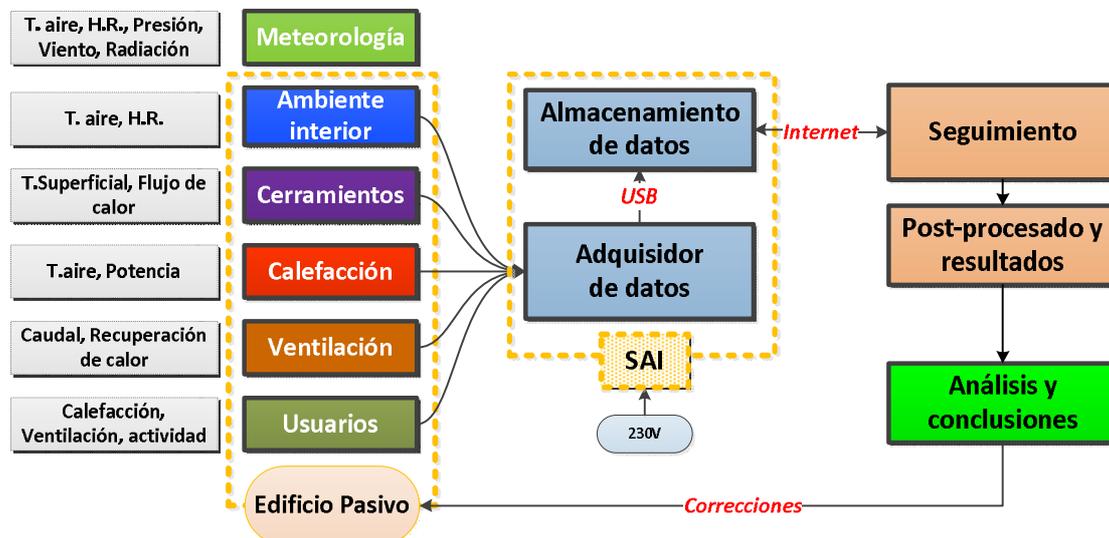


Figura 3 - Esquema del sistema de monitorización

Por último, además de los parámetros registrados por el adquisidor se han realizado otros ensayos puntuales para alcanzar algunos de los objetivos específicos citados anteriormente:

Ensayo de gases trazadores para conocer el comportamiento del sistema de ventilación y las infiltraciones de la envolvente, con el método acorde a norma UNE EN ISO 12569:2000.

Estudio con cámara termográfica de puentes térmicos y envolvente, desde interior y exterior, norma EN 13187:1998.

Estudio de confort ambiental en el salón y un dormitorio en periodo calefactado. Se realizan de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 7730:2006 que establece los criterios de bienestar térmico local o grado de confort de los ocupantes de una vivienda. Cada equipo se forma con un trípode que sostiene tres instrumentos: una bola radiante, un sensor de temperatura y humedad, y un sensor del movimiento del aire. El periodo de medición del confort fue de dos semanas, la primera en la etapa con estufa puntual y la segunda con los calefactores distribuidos.

#### 4. DATOS EXPERIMENTALES

El periodo monitorizado comenzó el 4 de febrero, se divide en tres etapas y se extiende en la actualidad durante el periodo de verano. La primera etapa de la monitorización se destinó a medir el comportamiento de la vivienda con la estufa puntual en funcionamiento y con la programación habitual de temperaturas acorde a los usuarios. Se instalaron los equipos de medición del confort y se tomaron mediciones de días singulares como un periodo no calefactado.

La segunda etapa se modificó la calefacción. El 11 de marzo se instalaron tres calefactores distribuidos, con una doble función, por un lado medir la potencia exacta de calefacción aportada a la vivienda, y por otro establecer una temperatura interior estable con variaciones cercanas a 1°C; ya que la baja inercia térmica y los tiempos de respuesta cortos permiten una regulación por temperatura más ajustada que la estufa puntual de pellets.

La tercera etapa corresponde con el fin del periodo calefactado y la retirada de los calefactores. Además, tras haber caracterizado la envolvente y algunos aspectos de la vivienda se desmontó parte de la instrumentación como fluxímetros y sondas del estudio, para reducir la presencia de los equipos y facilitar la actividad diaria a los residentes.

El proceso de tratamiento de datos es gradual, tanto en su complejidad como en el volumen de información analizado. En un calendario general se incluyen datos de la climatología, acciones de los usuarios, tareas de mantenimiento de la monitorización y situaciones relevantes del comportamiento energético. Es un resumen de las incidencias más importantes a lo largo de las semanas que dura la monitorización.

En un primer paso se transforma el archivo diario de mediciones que genera el adquisidor en un archivo de análisis del comportamiento diario y comprobación del sistema. Para ello hay una plantilla que recoge las calibraciones de cada sensor y ordena los canales para generar grupos de información relacionados con los objetivos específicos. En la Tabla 4 se señalan los grupos de información de la plantilla de análisis diario.

Tabla 4 - Plantilla de análisis diario

GRUPO DE INFORMACIÓN DIARIO	PARÁMETROS	PUNTOS
Datos de origen	Valores sin calibrar, muestreo cada 1 minuto	91
Calibración y orden de canales	-	91
Promedio cada 10 minutos	-	91
Calefacción	Potencia, horas y T.media interior	6
Meteorología	T., H.R., Radiación, Viento	6
Seguridad en caja	T. aire en caja del adquisidor, T.media	2
Ambiente interior	T. aire por espacios, T.media int. y T.ext	17
Aire, estratificación en altura	T. aire por estratos en salón y vestidor, Potencia calef.	8
Humedad Relativa	H.R. por espacios, HR.media, HR. porche	7
Evolución del porche	T. aire porche, T.ext, T.int., HR. porche, int. y ext.	7
Suelos y techos	T.Sup por zonas y T.media	13
Estructura	T.Sup en pilares y T.media	16
Particiones	T.Sup por zonas y T.media	19
Carpinterías	T.Sup marcos y T.Sup. vidrios	4
Fachadas	T.Sup por orientaciones, Flujo de calor, T.Sup	10

El segundo paso es un análisis más general, que compara periodos de una o dos semanas. El objetivo es comparar la evolución de los valores a lo largo de periodos climáticos más largos. Los grupos de información varían respecto al análisis diario y se analizan los valores medios obtenidos a partir de los valores medidos. Estas medias han sido ponderadas con factores de corrección por superficie, volumen del espacio o longitud del elemento correspondiente.

Tabla 5 - Plantilla de análisis semanal

GRUPO DE INFORMACIÓN SEMANAL	PARÁMETROS	FACTOR
Datos de origen	Valores calibrados, muestreo cada 10 minutos	-
Agrupación y factores corrección	-	-
Calefacción	Energía total y horas de funcionamiento diarias	-
Meteorología	Temp., H.R., Radiación, Viento	-
T. Aire	T.int. medias EyW, máx, mín, T. porche y T.ext	Vol. espacio
T. Aire, estratificación en altura	T. aire salón y vestidor, Potencia calef.	-
Humedad Relativa	H.R. media, máx, mín, porche y exterior	Espacios
T. suelos y techos	T.Sup media, máx y mín	Sup. Útil
Estructura	T.Sup media, máx y mín	Posición
Particiones	T.Sup media, máx y mín	Long. tabique
Carpinterías	T.Sup marcos y vidrios	-
Fachadas	T.Sup por orientaciones, Flujo de calor, T.int., T.ext.	Long. fachada

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Calefacción

Uno de los objetivos más importantes era conocer la demanda de calefacción del edificio y el consumo asociado. Para ello, se analizó en primer lugar el funcionamiento de la estufa puntual según la programación habitual de los residentes. Se controlaron los ciclos de encendido y apagado de la estufa con un sensor de temperatura en el cuerpo exterior. Se constató que el funcionamiento propio de la estufa puntual favorece diferencias de temperatura en el aire, tanto en altura como entre los espacios de la vivienda. Más adelante, en los resultados del confort ambiental veremos cómo varían los niveles de confort con dicha calefacción.

En la segunda etapa de la monitorización se instalaron tres calefactores de 400W distribuidos, que suponen una potencia instalada total de 1,2kW para los 176m<sup>2</sup> útiles de la vivienda. Los watímetros permiten conocer la energía exacta aportada de calefacción (la potencia eléctrica se convierte en potencia térmica de acuerdo con el efecto joule).

Aplicando el cálculo de los grados día de calefacción de vitoria durante este periodo monitorizado, se ha extrapolado a los grados día de un año meteorológico tipo. El resultado indica que la demanda de calefacción es de 14,2kW/m<sup>2</sup>a. En nuestro caso, el consumo registrado y la demanda coinciden debido al sistema de calefactores eléctricos.

## 5.2. Confort ambiental interior

Para estudiar el confort interior, en primer lugar se estudian los niveles de temperatura y humedad relativa de los espacios acondicionados. Durante la primera etapa de calefacción puntual, se obtenían variaciones propias del funcionamiento inercial de la estufa de pellets y la distribución de calor era más lenta; sin embargo, los valores medios eran adecuados y la sensación térmica estaba dentro de los parámetros deseables para una vivienda.

En la segunda etapa, al implantar los calefactores distribuidos y con baja inercia, se consigue establecer unas condiciones interiores más regulares y así analizar las diferencias propias entre espacios y los grados de confort. Las variaciones de temperatura del aire interior entre los distintos espacios de la vivienda son menores de 2°C, a excepción del cuarto de instalaciones (Ta08) por no estar acondicionado. Se ha seleccionado un día frío de invierno, el 14/03/2013, por tener una temperatura media de 1,7°C y poca radiación solar. Como puede verse en la Figura 4, las temperaturas de aire de los distintos espacios se mantienen entre 19 y 21°C.

La HR de los espacios oscila en valores bajos de entre el 38 y 50%, como puede verse en la Figura 5. Teniendo en cuenta que los umbrales deseados de HR están entre 50-70%, los ambientes interiores son ligeramente secos en invierno. El reparto de HR en las zonas de la vivienda tiene pequeñas variaciones que responden a las diferencias de temperaturas de los espacios y los grados de ventilación. El salón (Ta13) y el comedor (Ta01) al ser los espacios de mayor temperatura cuentan con las HR más bajas; mientras que el vestidor (Ta06) y el dormitorio principal (Ta12) mantienen niveles un poco más altos.

Conviene recordar que aunque la HR exterior aparece en torno al 90%, el agua retenida en un aire a 2°C es muy baja y al introducir ese aire al interior calentado hasta los 20°C, su HR baja y seca el ambiente interior.

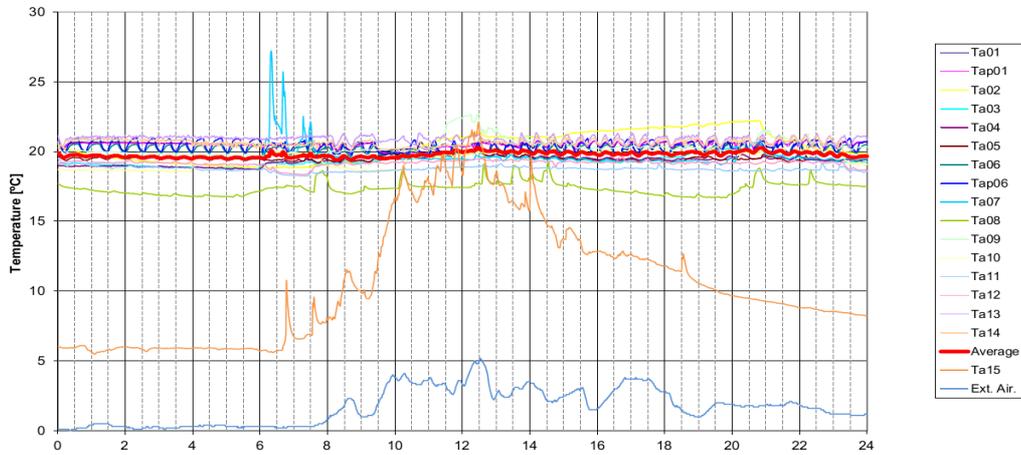


Figura 4 - Evolución de la T.aire en un día frío

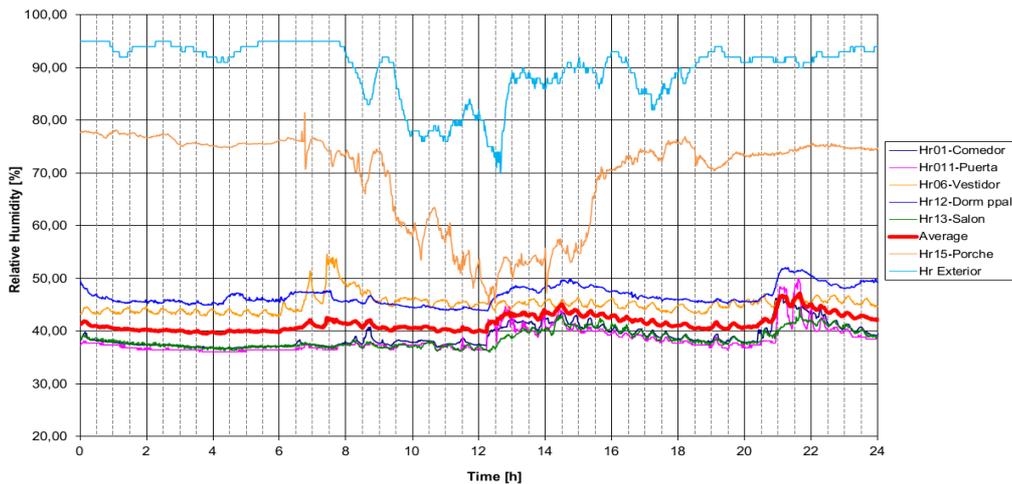


Figura 5 - Evolución de la HR en un día frío

Para estudiar el confort ambiental, además de estudiar los niveles de temperatura y HR se ha seguido el procedimiento de la norma UNE-EN ISO 7730:2006 que mide la calidad del confort interior. Se aplicó en el salón y en un dormitorio, durante la primera etapa y durante la segunda etapa, para comparar los efectos de la calefacción puntual y la distribuida. En la Tabla 6 se resume el porcentaje de horas en cada grado de confort ambiental, y se observa que la mayor parte del tiempo se encuentra en las categorías A y B (muy buena y buena). Se han detectado periodos puntuales de disconfort por sobrecalentamiento en el salón, algo poco habitual en invierno.

Tabla 6 – Porcentaje de horas por categorías de ambiente interior en cada tipo de calefacción

	A / Muy buena	B / Buena	C / Aceptable	Disconfort
Calefacción puntual	46,5%	39,4%	7,6%	6,5%
Calefacción distribuida	91,8%	6,2%	0,7%	1,4%

### 5.3. Envoltente

A partir de las mediciones de T. y flujo de calor en las fachadas de orientaciones N, E y W, se puede caracterizar la envoltente según diferentes metodologías con mayor o menor detalle. En primer lugar, se realizó un cálculo integrado según la norma ISO 9869, que acumula el salto de T.int-ext y el flujo de calor relacionado a cada instante. Partiendo de 50 días de valores promediados cada 10 minutos, la transmitancia obtenida es  $0,14\text{W/m}^2\text{K}$ , véase la Figura 6. Para mayor detalle se empleó un modelo de identificación de parámetros desarrollado por la red DYNASTEER, que aplica las mediciones de T. y flujo de calor junto en un modelo matemático R-C; para obtener una resistencia térmica y una conductancia del muro que reproduzcan el comportamiento horario medido. Dicha caracterización del muro es más real, pues incorpora la inercia térmica, y como puede verse en la Figura 7, la diferencia cálculo-medición es menor de  $0,4^\circ\text{C}$ .

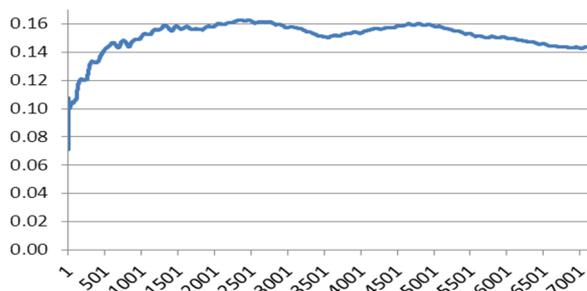


Figura 6 - Transmitancia de fachada calculada, según método integrado

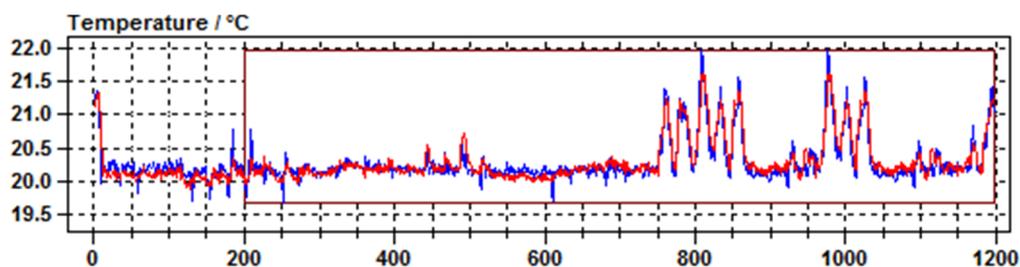


Figura 7 - Comparación de las T.int. calculada y medida, según modelo RC

### 5.4. Ventilación y recuperación de calor

El edificio superó el ensayo de puerta ventilador con  $n_{50} = 0,21\text{ h}^{-1}$ . Es un resultado que asegura unas infiltraciones muy bajas. Respecto a la ventilación, inicialmente se midieron los caudales en las bocas de ventilación y se corrigieron algunos desequilibrios; se decidió mantener la VMC en el nivel 4 de 7 durante la monitorización (es aproximadamente el 70% del caudal de diseño) y se procedió a la medición de las renovaciones de cada espacio por el método de gases trazadores. Se obtuvieron 0,7 renovaciones/hora en conjunto. A partir de las mediciones de T. en los caudales de ventilación a lo largo de 96 días de otoño-invierno y calculando el cociente del aumento de T. en la impulsión, frente al salto máximo T.int-T.ext, la eficiencia de trabajo del recuperador de calor es del 83% en periodo calefactado.

### 5.5. Puentes térmicos

En el exterior no se aprecian pilares ni diferencias significativas por puentes térmicos, véase Figura 8. El encuentro de fachada y terreno muestra un moderado aumento de T. El alero protege del viento y del intercambio radiativo con la bóveda celeste en la parte alta de fachadas. Las carpinterías son el punto más caliente de la envoltente.

### 5.6. Estructura

Los pilares están trasdosados por el interior, las sondas se ubicaron sobre la placa de acabado y se ha comprobado la diferencia de T. entre el aire y la fachada. Las variaciones aire-fachada oscilan entre  $1$  y  $2^\circ\text{C}$ , tanto en pilares como en tramos de fachada, con excepciones como pilares en esquina o pilares del cuarto de instalaciones. Los forjados no eran accesibles, pero las mediciones de suelos y techos indican que son unos elementos con gran inercia y que participan en la amortiguación de los cambios interiores.

### 5.7. Particiones interiores

Los tabiques de entramado ligero con placa de yeso laminado y relleno de aislamiento tienen poca capacidad térmica y en general se ha comprobado que los pilares centrales revestidos y el resto de tabiques tienen un comportamiento similar, con diferencias con el ambiente inferiores a  $1^\circ\text{C}$ .

## 5.8. Carpinterías

Las T. de los marcos y vidrios controlados se analizan en horario nocturno para evitar la radiación solar. Los valores obtenidos indican que los marcos y los vidrios están un 18% más fríos que la envolvente opaca. Además, el marco se ha mantenido por encima de 17°C durante las noches más frías del invierno, mostrando un alto grado de aislamiento.

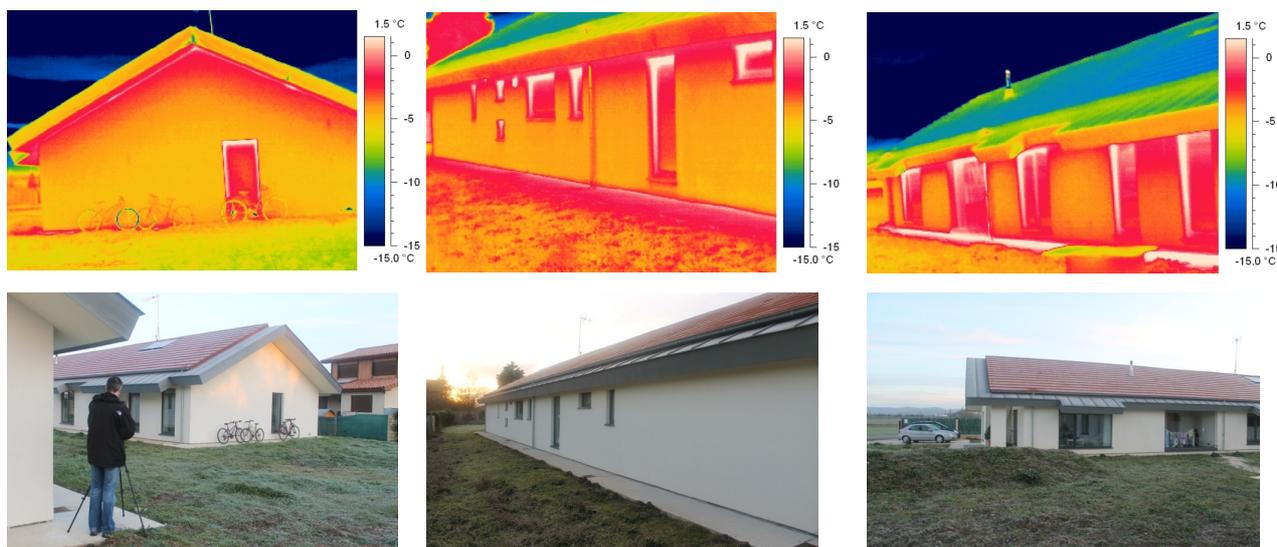


Figura 8 – Termografías exteriores

## 6. CONCLUSIONES

Se ha comprobado el consumo energético de la vivienda y la demanda medida cumple los requisitos del estándar PH. El grado de confort y la distribución del calor entre las estancias de la vivienda mejoran notablemente cuando se distribuye la potencia de calefacción en los extremos de la vivienda. La calefacción distribuida y de baja inercia térmica permite una regulación más controlada y acorde a las exigencias de los usuarios del edificio pasivo.

La envolvente ha mostrado un buen comportamiento, resultado de un buen diseño y una atención a los detalles ejecutados. El control de las infiltraciones ha sido posible con un conjunto de soluciones singulares a base de barreras aislantes de caucho en los encuentros y detalles constructivos tradicionales como la ejecución de un guarnecido de yeso interior. Esto combinado con un exhaustivo control de obra y la atención a los pasos de instalaciones ha permitido reducir las infiltraciones y las pérdidas térmicas asociadas.

El estudio de puentes térmicos ha comprobado que no hay anomalías constructivas significativas. Sin embargo, el encuentro de la fachada con el terreno podría ser mejorado con aislamiento adicional y se espera hacer un estudio posterior más detallado. La incidencia de los perfiles en el interior es en general baja, a excepción de las esquinas y los lugares de concentración de montantes metálicos. El trasdosado que aísla los pilares minimiza las pérdidas hacia la estructura y los falsos techos conservan aire caliente y amortiguan el comportamiento interior. Las particiones interiores no afectan significativamente al comportamiento térmico del edificio. Las carpinterías, pese a presentar transmitancias muy bajas, siguen siendo el punto más expuesto de la envolvente.

Se abren nuevas investigaciones del comportamiento térmico en verano. Así como profundizar en modelos de parámetros concentrados a nivel del edificio completo. Estudios que podrán comprobar la presencia de la inercia propia del edificio y desligar la actividad de los usuarios concretos para establecer patrones de uso genéricos.

## AGRADECIMIENTOS

Al Programa de Formación de Investigadores del DEUI del Gobierno Vasco, por su soporte económico como becario. Al equipo del Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación del Gobierno Vasco, por su guía, soporte y consejo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Spataru, C., Gillott, M. (2010). The Use of Intelligent Systems for Monitoring Energy Use and Occupancy in Existing Homes, *Springer Smart Innovation, Systems and Technologies series*. Robert J. Howlett and Lakhami C. Jain Heidelberg, (Ed.).
- Healy, W. 2010. Building sensors and energy monitoring systems. *Building America Meeting on Diagnostic Measurement and Performance Feedback for Residential Space Conditioning Equipment*. Retrieved from <http://www1.eere.energy.gov>
- Johnstone, C., Newman, N. 2011. Case study evidence for reduced whole life costs, in various price scenarios. *UK passivhaus conference 2011*. Retrieved from <http://ukpassivhausconference.org.uk/>.
- Tofield, B. 2012. *Delivering a low-energy building*. Retrieved from <http://www.adaptcbe.co.uk/CBE>
- Build With Care, Carbon Reduction & Energy saving buildings*. Retrieved from <http://www.buildwithcare.eu/DYNASTEENetwork>. Retrieved from <http://www.just-pm.eu/>
- Passiv-On projet*. IEE. Retrieved from <http://www.passive-on.org>