



Evaluación de las infiltraciones en la edificación y aplicación al edificio del Solar Decathlon

Autor: Eduardo José Garcilópez Gracia

Director: Luis Miguel Romeo Jiménez

Máster Universitario en Energías
Renovables y Eficiencia Energética
POP en ingeniería eléctrica y energética

Curso 2009/2010
20 de Noviembre de 2010

Memoria 1/2



Índice

1. Introducción	1
2. Experimentación y medidas	5
2.1 Procedimiento experimental	6
2.2 Resultados del experimento	9
3. Cuantificación demandas de climatización	11
3.1 Posibilidad de satisfacer demandas	12
3.2 Consideraciones previas a los cálculos	13
3.3 Cálculos de las demandas de calefacción y refrigeración	14
<u>3.3.1 Tasa infiltración: resultados experimentales CIRCE</u>	16
<u>3.3.2 Tasa infiltración: caudal de ventilación establecido por el CTE</u>	22
<u>3.3.3 Tasa infiltración: la establecida para una Passivhaus</u>	25
3.4 Discusión de resultados	27
<u>3.4.1 Tasa infiltración: resultados experimentales CIRCE</u>	27
<u>3.4.2 Tasa infiltración: caudal de ventilación establecido por el CTE</u>	31
<u>3.4.3 Tasa infiltración: la establecida para una Passivhaus</u>	32
<u>3.4.4 Tabla comparativa</u>	33
3.5 Valoración de la incorporación de un recuperador de calor	34
<u>3.5.1 Definición</u>	34
<u>3.5.2 Datos de partida y consideraciones preliminares</u>	36
<u>3.5.3 Proceso de cálculo</u>	36
4. Conclusiones	39
5. Bibliografía	42
6. Anexos	46

1. Introducción

El intercambio de energía que tiene un edificio con el medio ambiente exterior que lo rodea, se produce a través de todos los elementos que componen la envolvente. Además la legislación actual (Código Técnico de la Edificación) establece cual debe ser el caudal de ventilación mínimo, pretendiendo unas renovaciones/hora a todas luces incongruentes con el concepto de ahorro energético que pretende en su primer documento (CTE HE 1) [1]. A este caudal de ventilación que en cierto modo es conocido y controlado hay que sumarle además el caudal de aire debido a las infiltraciones, flujos descontrolados del aire exterior que ingresan en el edificio por rendijas u otras aberturas no intencionales. En un edificio moderno, las pérdidas por ventilación pueden suponer más del 50% de las perdidas térmicas totales [2].

Por un lado, las causas esperables de que se produzcan infiltraciones de aire a través de la envolvente, tienen que ver con la calidad de la carpintería que se haya colocado; así pues se tendrán en cuenta los criterios establecidos por el CTE HE 1 en su apartado 2.3, en el que rigiéndose por las normas correspondientes [3,4], indica cual debe ser la permeabilidad al aire de la carpintería según la zona climática en la que nos encontremos.

Por otro lado, las causas indeseables, son debidas a posibles vicios constructivos relacionados con la calidad del trabajo realizado y la supervisión de este. Los lugares típicos donde aparecen dichas infiltraciones y que han sido descritos en diversas tesis doctorales y artículos son: el empalme del techo/suelo con el muro exterior, el empalme de las paredes interiores con el muro exterior y el techo, el paso de las instalaciones eléctricas y de fontanería a través de la pared, el paso de la chimenea y conductos de ventilación a través de la pared, alrededor y a través de enchufes eléctricos e interruptores, alrededor y a través de ventanas y puertas [5, 6 y 7].

Aunque son numerosas las consecuencias debidas a la infiltración del aire exterior (rendimiento higrotérmico, salud, consumo energético, rendimiento de los sistemas de ventilación, confort térmico, ruido y resistencia al fuego) [5], el objetivo de este trabajo es realizar un análisis del efecto que provocan dichas infiltraciones de aire en las demandas

energéticas de la vivienda, con el fin de determinar que medidas o tecnologías deberemos incorporar para garantizar el confort climático dentro de nuestro edificio.

El dato que va a diferenciar una vivienda hermética al aire de otra que no lo es tanto, es la tasa de infiltración o intercambio de aire a través de la envolvente n_{50} , que es el número de renovaciones-hora (ren/h) del volumen de aire interior del edificio a una diferencia de presión de 50Pa entre el exterior y el interior. Este valor se ve influenciado por diferentes factores; Jokisalo et al. [7] realiza un estudio centrándose en factores como el clima, las condiciones del viento, el balance del sistema de ventilación y la distribución de las fugas. Por otro lado Mattsson B. [8] analiza la influencia de la velocidad del viento, el terreno y el sistema de ventilación utilizado. Otro estudio realizado en Estados Unidos por Chan et al. [9] que contempla más de 70,000 mediciones, considera que los factores más significantes son el año de construcción del edificio y el área de suelo útil. Sin embargo, Kalamees T. [5] concluyo, gracias a su trabajo de investigación, que el número de plantas del edificio junto con la calidad y supervisión del trabajo juegan un papel significativo en el hermetismo de la vivienda.

En el caso de estudio también se establecen unos grados de hermetismo para los edificios y así valorar las demandas de climatización que se requiere en cada uno de ellos. De mayor a menor número de renovaciones-hora (ren/h), empezamos evaluando la vivienda en un primer grado (hermeticidad al aire baja) que corresponde con el caudal de ventilación mínimo exigido por la actual legislación (CTE), que como ya se comentó anteriormente y cuyo cálculo aparece en el **Anexo B** adjunto, es de 2.64 ren/h ($594\text{m}^3/\text{h}$) dependiendo de la configuración y superficie de la vivienda. El segundo grado (hermeticidad al aire media-alta), corresponde a los valores obtenidos en los diversos ensayos realizados en el edificio CIRCE, los cuales están entre las 3-4 ren/h a 50Pa ($97.68\text{m}^3/\text{h}$). Para ello, se hizo uso del método estandarizado de presurización (Blower Door), un sistema de determinación que permite cuantificar el caudal de aire que fluye a través de la envolvente de un recinto. Por ultimo, el tercer grado (hermeticidad al aire alta) con una tasa de infiltración de 0.6 ren/h a 50Pa ($16.74\text{m}^3/\text{h}$), que es el valor fijado para una Passivhaus [10]. Una edificación con esta denominación se refiere a una vivienda construida bajo el estándar elaborado por el Passivhausinstitut (Alemania), el cual se define como un edificio que consigue un confort climático muy alto a través de la ventilación mecánica, reduciendo el consumo energético en un mínimo posible [w1].

A su vez existen otros estándares técnicos de edificación sostenible, como por ejemplo, MINERGIE ® que es un distintivo de sostenibilidad para los edificios nuevos y rehabilitados, conjuntamente respaldado por la Confederación Suiza, los cantones suizos, junto con Industria y Comercio. El confort de los usuarios que viven o trabajan en el edificio es su principal prioridad y se hace posible gracias a un alto aislamiento de los edificios y la renovación continua del aire. El consumo específico de energía se utiliza como el principal indicador para cuantificar la calidad de la construcción. Sólo la energía final consumida es relevante [11, 12 y w2]. También existe el Sistema de Clasificación de Edificios Sostenibles LEED® (Líder en Eficiencia Energética y Diseño sostenible) desarrollado por el U.S. Green Building Council (USGBC), que es un sistema estándar internacional voluntario, basado en el consenso y en criterios de mercado para desarrollar edificios sostenibles de alta eficiencia [13, 14 y w3].

. A partir de los valores calculados y los resultados obtenidos, se pueden calcular las demandas de climatización asociadas a ese flujo de aire a través de la envolvente, para así realizar las conclusiones oportunas en cuanto a que medidas tomar, como que equipos colocar y cual es el efecto de su incorporación.

Por lo tanto, los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Determinar los grados de hermetismo al aire que se van a establecer para el cálculo de las demandas de climatización.
- Medir experimentalmente la tasa de infiltración de aire en un caso real (despachos edificio CIRCE) y tomarla como uno de los grados de hermetismo al aire.
- Calcular las demandas de climatización asociadas a cada uno de los grados de hermetismo establecidos.
- Analizar para cada caso cuales son las medidas y equipos que se deben incorporar para satisfacer las demandas de calefacción y refrigeración.

En el capítulo 2, se expondrán los sistemas de determinación más utilizados a la hora de efectuar un análisis de las infiltraciones de aire en los edificios. Una breve descripción del análisis termográfico, así como de los inconvenientes más relevantes de este método. Por

ultimo, se explicara la metodología de ensayo a seguir en la ejecución del método estandarizado de presurización Blower Door, junto con los parámetros a introducir en el software encargado de controlar el experimento y la hoja de resultados que devuelve este tras el procesamiento de los datos adquiridos en el ensayo.

En el capítulo 3, se detallan los grados de hermetismo establecidos para el cálculo de las demandas de climatización y se introducen las posibles soluciones a llevar a cabo para satisfacer dichas demandas. Tras una serie de consideraciones previas a los cálculos, se muestra el proceso a seguir en la cuantificación de las demandas de calefacción y refrigeración. Finalmente se discuten los valores de ambas demandas, explicando y comparando los resultados obtenidos en los cálculos anteriores.

Por ultimo, en el capítulo 4 se recogen las conclusiones a las que se han llegado tras el análisis realizado en el trabajo y se dan una serie de recomendaciones para el diseño de la Casa Sana destinada al concurso Solar Decathlon.

2. Experimentación y medidas

Es necesario llevar a cabo un análisis experimental mediante la ejecución de ensayos, que permitan localizar las aberturas o rendijas a través de las cuales tienen lugar las infiltraciones. Un sistema de determinación muy utilizado es el análisis Termográfico [15], la radiación infrarroja emitida por los cuerpos es captada gracias a una cámara termográfica y sabiendo que la temperatura está directamente relacionada con la potencia emisiva superficial según la ley de Stefan-Boltzmann ($P = \sigma A \epsilon T^4$), una inspección de este tipo permite observar las diferencias de temperatura de los materiales que componen la envolvente del edificio.

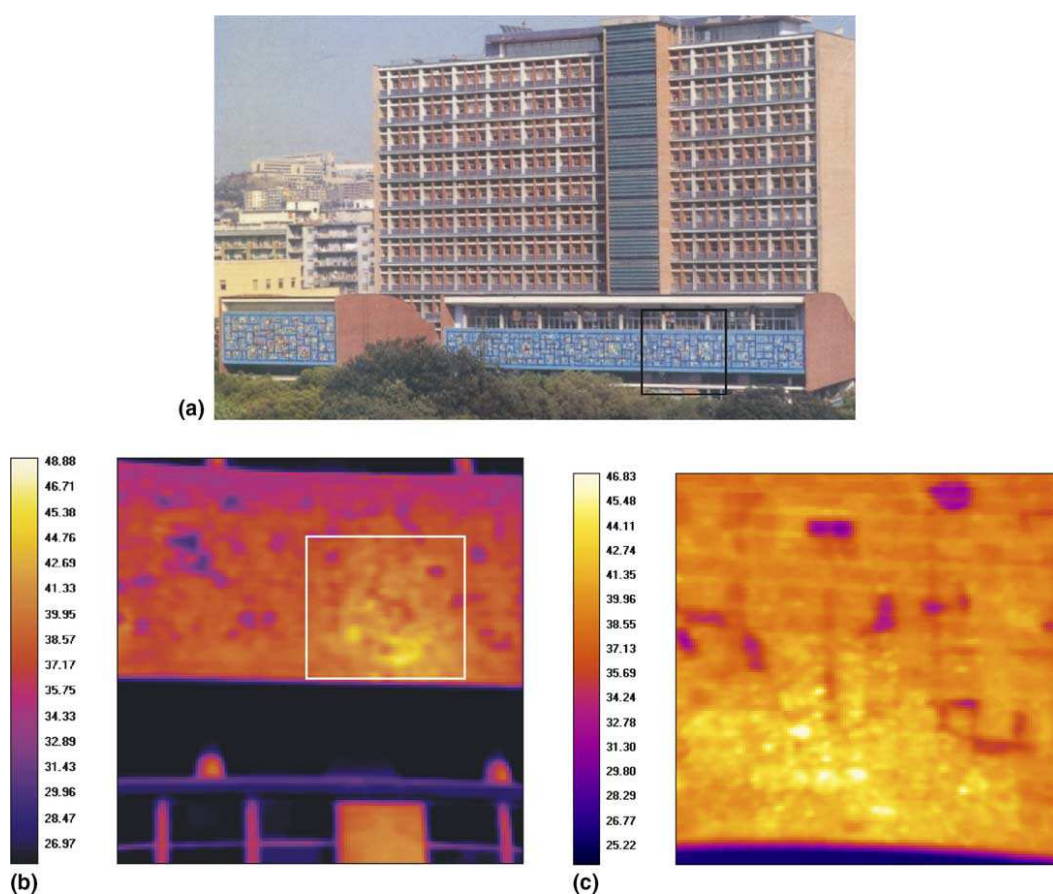


Figura 1 – Inspección de mosaicos; (a) imagen de la fachada del edificio; (b) imagen térmica de la zona interior del rectángulo de (a); (c) vista en primer plano de la zona interior del rectángulo de (b). [18]

Este método es significativamente útil, ya que gracias a las imágenes que devuelve la cámara es posible detectar fallos en el aislamiento de una vivienda sin necesidad de dañarla. Es una tarea compleja, pero a la vez muy importante a la hora de tomar medidas correctoras

que mejoren el hermetismo a los flujos de aire a través de la envolvente. En el caso de las mediciones “in situ”, diversos factores externos que afectan la medición de la radiación ocurren a menudo. Algunos de estos factores son: los efectos del contorno, el ángulo de incidencia o la forma de la superficie. La existencia de estos factores no es un problema importante en la adquisición de datos, ya que siempre es posible eliminarlos o cuantificarlos. Hay, sin embargo, un fenómeno que es mucho más difícil de cuantificar o eliminar y cuya presencia es muy frecuente en los trabajos realizados en edificios antiguos, llamado atenuación atmosférica. Este puede, en muchos casos, afectar o eliminar la señal recogida por la termocámara. [16]

Otro inconveniente que tiene esta práctica es, la laboriosa tarea a realizar, que consiste en introducir en el equipo la emisividad de cada uno de los materiales que componen el edificio, pudiendo obtener imágenes erróneas, debido a discontinuidades en la composición de la envolvente y por tanto en la emisividad del material, las cuales hacen pensar que existe una diferencia de temperaturas que en realidad no la hay. Como último detalle, este método no permite cuantificar el flujo de aire que se está infiltrando en la vivienda, con lo que deja de ser útil si se quiere dar valores al hermetismo de un edificio [15, 17].

2.1 Procedimiento experimental

Debido a los inconvenientes que presenta el análisis termográfico, habrá que hacer uso de otro sistema de determinación, el método estandarizado de presurización llamado Blower Door. Mediante los ensayos realizados siguiendo este proceso se obtiene el n_{50} que permite normalizar el ratio de pérdidas con el volumen del edificio, lo cual permite comparar de forma relativa el hermetismo entre edificios de diferente tamaño.

Una característica de un ensayo con el Blower Door es que este dispositivo permite realizar el proceso ya sea presurizando o despresurizando el recinto. El ensayo que se detalla a continuación corresponde a una despresurización, ambos son similares en su ejecución salvo alguna pequeña diferencia que se explica durante la descripción del proceso.

1º) Requiere llevar a cabo una previa observación de la vivienda, así como de los elementos que la componen:

- Tipo de ventanas y orientación
- Tipo de puerta y lugar de acceso
- Sistema de calefacción
- Sistema de refrigeración
- Sistema eléctrico (tomas de corriente, interruptores, luminaria,..)
- Composición del techo

2º) A continuación es necesario medir la superficie (m^2) y el volumen (m^3) de la vivienda, ya que es un dato imprescindible para el cálculo final de renovaciones-hora. Teniendo en cuenta que la geometría de la vivienda puede resultar compleja, se añade un rango de incertidumbre de un 5 %.

3º) Seguidamente se procede a la instalación del equipo Blower Door. Para ello, el encargado de realizar el ensayo debe situarse en la puerta de entrada de la vivienda y realizar las siguientes indicaciones:

- Llevar a cabo un preajuste del marco metálico del Blower en el marco interior de la puerta.
- Proceder a la colocación de la tela en el marco metálico y ajustar por completo en el marco interior de la puerta.(ver **Figura 2**)



Figura 2 – Colocación tela y marco metálico

- Situar el Blower o ventilador con el anillo C (por experiencias anteriores) en el hueco habilitado para este. (ver **Figura 3 y Tabla 1**)

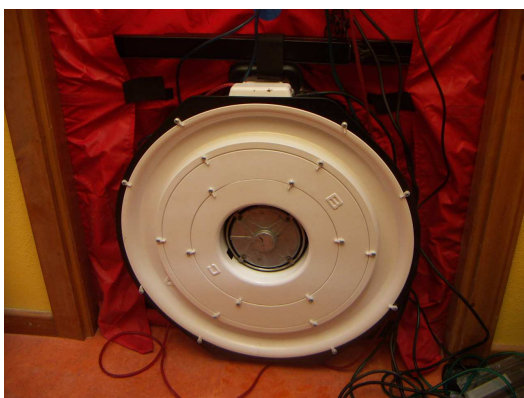


Figura 3 – Ventilador

Anillo	Flujo de aire (m ³ /h)
A	4,250-1,550
B	1,500-400
C	450-80
D	200-50
E	88-20

Tabla 1 – Clasificación anillos

En este caso al tratarse de un ensayo por despresurización el ventilador se coloca con las aspas por el lado exterior (como puede verse en la **Figura 3**), en el caso de tratarse de un ensayo por presurización deberá colocarse en sentido contrario.

- Poner el termómetro, tanto a un lado como al otro de la puerta:
 - T interior vivienda [°C]
 - T exterior [°C] (calle, pasillo, rellano,...)
- Por ultimo se instala el sistema eléctrico compuesto por la fuente de alimentación del ventilador, el controlador principal, los distintos cables de conexión y los sensores de presión. (ver **Figura 4**)



Figura 4 – Fuente de alimentación y controlador principal

4º) Para informatizar el proceso de debe conectar el equipo a un ordenador portátil que disponga del software necesario, que es el TECTITE EXPRESS y al cual debemos introducirle cierta información para que pueda devolvernos los resultados. Esta información y la hoja de resultados que se obtiene aparecen en el **Anexo C**.

5º) Una vez realizado el ensayo se interpretan los resultados obtenidos: tasa de infiltración de aire, n_{50} [ren/h]; caudal de aire infiltrado, v_{50} [m³/h]; superficie de infiltración [cm²];...

2.2 Resultados del experimento

Una vez visto el proceso a seguir para realizar este experimento ya se pueden ver valores de n_{50} , los cuales fueron obtenidos en unos ensayos realizados en el edificio CIRCE de emisiones cero y nueva construcción situado en el campus universitario Río Ebro en la calle Maria de Luna S/N. Los recintos en los cuales se llevaron a cabo dichos experimentos son dos despachos de la planta baja.

En el primero de ellos (despacho nº 4), con un volumen de unos 55 m³, se obtuvo un $n_{50}=3.91$ ren/h (3.95ren/h despresurizando y 3.88ren/h presurizando) mientras que en el segundo (despacho nº 10), con un volumen de 75 m³, el resultado fue algo inferior $n_{50}=3.17$ ren/h.

A su vez, fueron proporcionados los resultados de otros dos ensayos realizados en el mismo edificio en un análisis anterior. El primero, del despacho nº 3 (62 m³) en la planta baja que fue sellado herméticamente, obteniendo un $n_{50}=2.57$ ren/h. Y el segundo, del despacho del director (85 m³), pero en este caso con instalación eléctrica y de tuberías que atravesaban el muro interior, las cuales no se sellaron correctamente en su instalación, con lo cual la tasa de infiltración de aire resultó claramente superior, $n_{50}=9.08$ ren/h.

Según los resultados obtenidos, la tasa de infiltración predominante en los despachos del edificio analizado esta entre 3-4 ren/h y se puede comprobar que se asemeja a las 4 ren/h, tasa de infiltración media obtenida en el estudio realizado por J. Jokisalo et al. [7] de 170 viviendas unifamiliares en Finlandia y se aproxima a las 4.9 ren/h de media que obtuvo Kalamees T. [5] en su estudio de 32 viviendas en Estonia. La semejanza con otros valores

obtenidos en diferentes estudios realizados por otros expertos, demuestra la fiabilidad de los resultados que van a ser objeto de cálculo, los cuales han sido obtenidos en los ensayos realizados por el autor de este trabajo.

nº ensayo	Tasa infiltración (ren/h)	Vol. recinto (m³)	Lugar del experimento	Autor
1	3.91	55	Dpcho. nº 4 (Edif. CIRCE)	Garcilópez E.
2	3.17	75	Dpcho. nº 10 (Edif. CIRCE)	Garcilópez E.
3	2.57*	62	Dpcho. nº 3 (Edif. CIRCE)	Vásquez R., Roldán E. [18]
4	9.08**	85	Dpcho. Director (Edif. CIRCE)	
5	4	-	170 viviendas en Finlandia	Jokisalo J. [7]
6	4.9	-	32 viviendas en Estonia	Kalamees T. [5]

Tabla 2 – Resultados obtenidos en los ensayos realizados y otros resultados de interés

* El ensayo se realizó con puerta y rendijas selladas mediante cinta adhesiva.

** Corresponde a un despacho con aberturas debido a una instalación eléctrica y de fontanería sin sellar.

Por lo general se puede ver que se obtienen en torno a unas 4 renovaciones-hora, que aunque sitúan a estos edificios dentro del grupo de los bien sellados, están bastante lejos de los niveles de hermetismo que garantiza una vivienda con tasas de infiltración como la de una Passivhaus (0.6 ren/h). Aunque, viendo los resultados obtenidos en un edificio de nueva construcción, parece imposible conseguir un valor tan bajo en lo que a tasa de infiltración de aire se refiere, podemos encontrar numerosos casos prácticos. Por ejemplo, dentro del proyecto europeo ‘Cost Efficient Passive Houses as European Standards’ (CEPHEUS) a través del cual se construyeron 221 casas en 5 países europeos bajo el estándar Passivhaus y cuyo funcionamiento fue evaluado. En dicho proyecto respaldado por la Comisión Europea se obtuvieron valores alrededor de las 0.6 ren/h, demostrando así la total viabilidad de dicho propósito [19].

3. Cuantificación demandas de climatización

En la introducción se explicó que este trabajo contempla tres niveles de hermetismo. En primer lugar, el caudal de ventilación mínimo establecido por el CTE (2.64 ren/h), en segundo lugar la media de los valores obtenidos en los experimentos (3.5 ren/h a 50Pa) y en tercer lugar el establecido para una Passivhaus (0.6 ren/h a 50Pa). Los valores que se acaban de enumerar no tienen un orden creciente, ya que para los dos últimos casos dicho valor (n_{50}) muestra el caudal de infiltración para una presión de 50Pa; como es de imaginar esta diferencia de presión no se alcanza en condiciones normales, sino que se establece como estándar para así obtener un valor de referencia, el n_{50} , resultando un método útil para normalizar el ratio de pérdidas con el volumen del edificio, lo cual permite comparar de forma relativa el hermetismo entre edificios de diferente tamaño. Sin embargo el primer valor indica un caudal de ventilación que no depende de la presión existente entre el exterior y el interior del edificio, sino de la superficie de la vivienda y de como esté configurada esta.

Así pues, para poder obtener el grado de hermetismo ordenado de mayor a menor, se traducen dichas tasas de ventilación a caudal de aire (m^3/h) infiltrado en la vivienda. Para ello se debe tener en cuenta la velocidad del viento, que será uno de los factores determinantes en dicha diferencia de presión a través de la envolvente. A continuación se muestra la conversión de cada uno de ellos (ver **Tabla 3**):

Grado hermetismo	n_{50} [ren/h]	n_{CTE}^{**} [ren/h]	n_i [ren/h]*	caudal [m^3/h]
1. Legislación (CTE)	-	2.64	-	594
2. Experimental	3.5	-	0.43	97.68
3. Passivhaus	0.6	-	0.07	16.74

Tabla 3 – Grados de hermetismo del análisis

* n_i : Tasa de infiltración media anual en función de la presión ejercida por el viento.

** n_{CTE} : Caudal de ventilación mínimo establecido por el CTE. Cálculos en Anexo B.

Este procedimiento de análisis es similar al llevado a cabo por Mattsson B. en su estudio de la influencia de la velocidad del viento, el terreno y el sistema de ventilación en la tasa de intercambio de aire de una casa unifamiliar [8]. Apoyándose en trabajos anteriores realizados por Peter R. [20], Virtanen M. [21] y Arne E, Bertil F. [22] Mattsson B [8]

diferenció también tres niveles de hermetismo, los cuales son $n_{50}=1, 3$ y 6 ren/h a 50Pa y analizó la influencia de los factores comentados anteriormente en cada uno de los tres casos.

3.1 Posibilidad de satisfacer demandas

En la actualidad, todos o casi todos los edificios disponen de un equipo de calefacción para satisfacer las demandas de calor durante los meses del año en los que hace más frío, así como de un equipo de aire acondicionado para enfriar la vivienda durante los meses calurosos. Algunos combinan ambos requisitos con la incorporación de una bomba de calor que realiza los dos papeles, tanto enfriar como calentar el aire exterior que introducimos en nuestra vivienda. Estos sistemas de climatización por lo general tienen unos consumos energéticos elevados, que aumentan todavía más si no se realiza una ventilación controlada del aire interior del edificio, originando pérdidas importantes.

Sin embargo, en este trabajo se quiere analizar la posibilidad de cubrir las demandas de calefacción mediante sistemas que basen su funcionamiento en la recuperación del calor y las demandas de refrigeración, gracias a la ventilación natural durante la noche. Este procedimiento no deja de ser un apartado más de los muchos que componen el concepto de arquitectura bioclimática, a través del cual se pretende conseguir que la sociedad actual reduzca sus consumos energéticos en lo que a climatización de los edificios se refiere. La energía destinada a calefactar los espacios habitables asciende al 78% del consumo energético de los hogares de la EU-15, que corresponde con cerca del 21% de la energía total producida [23].

Hay dos formas de realizar dicha recuperación de calor en un edificio, la primera es mediante el llamado IHR (Infiltration Heat Recovery) [24] que consiste en que el aislamiento funcione de forma dinámica, haciendo pasar el aire a través de él, recuperando así parte del calor perdido por transmisión. La segunda forma es mediante el uso de dispositivos encargados del intercambio de calor (o energía) entre el aire de suministro y el de extracción, lo que también se conoce como VHR (Ventilation Heat Recovery) [25, 26 y 27].

El efecto de la IHR está directamente relacionado con el área efectiva de aislamiento dinámico que se coloque. Así pues, según un estudio realizado, considerando un área

efectiva del 5%, las pérdidas de calor por infiltración disminuyen entre 1–5 kWh/m² y la reducción en la energía destinada a calentar el recinto incluida la ventilación entre un 1-4%. Si el área efectiva fuera del 20% de la envolvente la reducción podría ser del 12% o incluso del 30% si dicha área correspondiese al total de la envolvente [7].

Por otro lado, está la VHR (Ventilation Heat Recovery). Los intercambiadores de calor se pueden clasificar en intercambiadores de calor con recuperación del calor sensible e intercambiadores de calor con recuperación de calor total. Los primeros solo recuperan el calor sensible mientras que los segundos recuperan calor sensible y latente. La posible recuperación de calor sensible y calor total depende de las propiedades del material que compone las placas del intercambiador, así como del clima y el periodo de operación [5]. La eficiencia o rendimiento de la recuperación de calor sensible requerida para los componentes de una Passivhaus tiene que ser de al menos el 75%.

Por un lado, una alta eficiencia proporciona unas temperaturas del aire de suministro cerca del nivel de confort, incluso sin calefacción adicional. Por otro lado, incluso con el estándar Passivhaus, se requiere una eficiencia de aproximadamente un 75% para alcanzar no solo ahorros energéticos sino también económicos. Los intercambiadores de calor de flujo cruzado comunes, con una eficiencia de aproximadamente el 50% no son adecuados. Eficiencias por encima del 75% puede ser alcanzada con intercambiadores de calor de placas y flujo cruzado, valores de más del 90% han sido confirmados para intercambiadores de calor de tubos [28].

3.2 Consideraciones previas a los cálculos

En la época tanto de invierno como de verano, el efecto de la ventilación natural en la vivienda supone una demanda de calefacción y refrigeración debido a pérdidas o ganancias térmicas por calor sensible (debido a los flujos de calor producidos por la diferencia de temperatura) y calor latente (debido a la aportación de humedad al aire).

A partir de la tasa de renovaciones/hora establecida para cada uno de los tres grados de hermetismo al aire y con el volumen del edificio a diseñar (75m² x 3m de altura = 225 m³) se puede obtener el caudal de aire (m³/h) a calefactar o refrigerar en dicha vivienda a lo largo del año.

Además se necesitan datos climáticos de la ciudad donde se va a localizar dicha vivienda, que en este caso tiene como fin ser presentada en el concurso Solar Decathlon, que tendrá lugar en el año 2012 en la ciudad de Madrid. Para ello se consultaron diferentes paginas Web de meteorología [w4, w5] pero en ninguna de ellas aparecen temperaturas horarias por lo que se descarto su uso y finalmente dicha información fue proporcionada por el Departamento de Ingeniería Mecánica (Área de Maquinas y Motores Térmicos) [29]. La hoja Excel con datos climáticos de Madrid en un año típico (1989) incluye entre otras cosas temperaturas medias horarias y humedades relativas medias horarias, datos imprescindibles para el calculo de las demandas de calefacción y refrigeración debidas tanto a ganancias como a perdidas por calor sensible y por calor latente.

En cuanto a la velocidad del viento, factor que influye en la diferencia de presión entre el exterior y el interior de la envolvente y que determinara la tasa de renovaciones/hora del edificio, decir que este dato fue obtenido de la base de datos de una pagina Web de Meteorología [w4] pero en este caso si que se trata de medias mensuales para todo el año, comprendidas entre 7.6 y 14.7 km/h.

En cuanto a los meses en los que se van a evaluar las demandas de climatización, separar por un lado la refrigeración, para la cual tomaremos Junio, Julio, Agosto y Septiembre (mes con gran inercia térmica) y por el otro lado la calefacción, para la cual tomaremos desde mediados de Octubre hasta Marzo. Quedan fuera del cálculo los meses de Abril y Mayo, en los cuales las demandas son prácticamente nulas.

Con todos estos datos ya se puede proceder al cálculo de las demandas de climatización asociadas a dicha tasa de renovaciones/hora, para así realizar las conclusiones oportunas en cuanto a que medidas tomar, como que equipos colocar y cual es el efecto de su incorporación.

3.3 Cálculos de las demandas de calefacción y refrigeración

Los cálculos se dividen en dos partes: las demandas asociadas a las pérdidas por calor sensible y las demandas asociadas a las pérdidas por calor latente. Para el cálculo de las pérdidas por calor sensible es necesario conocer: por un lado, el caudal de aire infiltrado a

través de la envolvente para cada uno de los meses, que variara en función de la velocidad media mensual del viento. Por otro lado, las características del aire que se esta introduciendo en la vivienda (densidad y calor específico). Y por ultimo, las temperaturas medias horarias durante el año, que junto con la temperatura de consigna interior, determinan el incremento de temperatura a realizar por los equipos de climatización.

El cálculo de las pérdidas por calor latente es algo más complejo, ya que partiendo de la temperatura del aire exterior y su humedad relativa se debe obtener la humedad específica de este, para así junto con la humedad específica del aire interior (calculada de la misma forma) determinar cual es la diferencia entre estas. Con este dato, el caudal de aire infiltrado y las características del aire húmedo se pueden calcular las demandas de climatización debidas a las perdidas por calor latente para cada uno de los meses del año.

Finalmente, se calcula la demanda de calefacción, que tiene únicamente componente sensible y la demanda de refrigeración, que tiene componente sensible y latente. Obteniendo así, ambas demandas para todo el año en cada uno de los grados de hermetismo al aire impuestos, para posteriormente evaluar que medidas o equipos de climatización son capaces de cubrir tanto la demanda de calefacción como la de refrigeración.

El proceso de cálculo se repite en tres ocasiones para obtener las demandas de climatización asociadas a cada uno de los grados de hermetismo al aire establecidos:

1. Grado medio de hermetismo al aire, con una tasa de infiltración determinada por experimentación realizada en el edificio CIRCE:

$$n_{50} = 3.5 \text{ren/h a } 50\text{Pa}$$

2. Grado bajo de hermetismo al aire, con una tasa de infiltración de aire igual al caudal de ventilación mínimo exigido por la actual legislación (CTE):

$$n_{\text{CTE}} = 2.64 \text{ren/h}$$

3. Grado alto de hermetismo al aire, con una tasa de infiltración como la establecida para la construcción de una Passivhaus:

$$n_{50} = 3.5 \text{ ren/h a } 50 \text{ Pa}$$

Con esto se quiere comparar la energía necesaria para climatizar una misma vivienda con cada uno de los grados de hermetismo al aire y así determinar cual de ellas se considera más recomendable.

3.3.1 Tasa infiltración: resultados experimentales CIRCE

Mediante el cálculo de la demanda asociada a la ventilación, para un caudal de ventilación de aire a través de la envolvente $n_{50}=3.5$ ren/h a 50 Pa (CIRCE), se obtiene la energía necesaria para mantener el recinto en unas temperaturas de confort (20°C invierno, 25°C verano) y con una humedad relativa moderada (H.R.=50%) durante todo el año.

Cálculo de las demandas por calor sensible

Es aquel que recibe un cuerpo y hace que aumente su temperatura sin afectar su estructura molecular y por lo tanto su estado. En general, se ha observado experimentalmente, que la cantidad de calor necesaria para calentar o enfriar un cuerpo es directamente proporcional a la masa del cuerpo y el número de grados en que cambia su temperatura.

La carga térmica sensible por infiltración de aire exterior se determina con la siguiente fórmula:

$$Q_s(kW) = V \left(\frac{m^3}{h} \right) \times \rho_{aire} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \times C_{p_{aire}} \left(\frac{kJ}{kg \text{ K}} \right) \times |T_{int}^a - T_{ext}^a| (K) \times \frac{1}{3600} \frac{h}{s}$$

Donde:

Qs (kW), es la carga térmica sensible por ventilación o infiltración;

V (m³/h), es el caudal de aire infiltrado o de ventilación y que es el producto del volumen del recinto por el nº de veces que se renueva dicho volumen de aire;

Vol (m³), es el volumen de aire del recinto a analizar, **225m³**

n_i (1/h), es el numero de veces que se renueva el volumen en una hora;

ρ (kg/m³), es la densidad del aire a 20°C y humedad relativa 50%, **1.2 kg/m³**;

C_{p_{aire}}, es el calor específico del aire a P_{atm} y 20°C, **1.01 kJ/kg K** ;

ΔT (K), es la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior $|T_{int}^a - T_{ext}^a|$

Tomando como T^a interior del recinto una T^a de consigna para los equipos de refrigeración (Verano) de 25°C (298 K) y una T^a de consigna para los equipos de calefacción (Invierno)=20°C (293 K).

Para calcular la tasa de infiltración de aire n_i (ren/h) y así el caudal de este V (m³/h) en cada uno de los meses, se necesitan las velocidades medias mensuales y una función que relacione la diferencia de presión entre el exterior y el interior del edificio con la velocidad del viento (**Figura 5**), obteniendo las presiones (ver **Tabla 4**) que se están ejerciendo en la envolvente a lo largo del año.

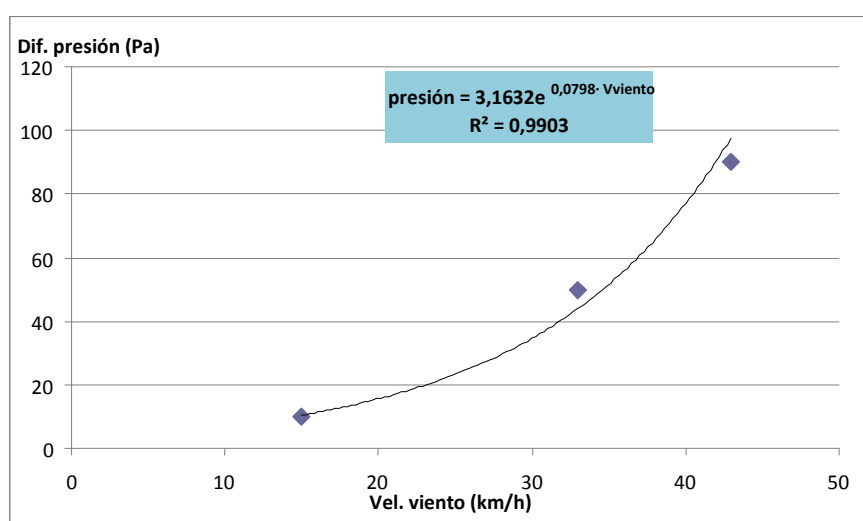


Figura 5 - Curva velocidad del viento (km/h) / Presión (Pa)

	Vviento (Km./h)	Presión (Pa)	Ren. (1/h)	Caudal (m3/h)
Enero	7,6	5,8	0,41	91,37
Febrero	9,21	6,6	0,46	103,90
Marzo	8,17	6,07	0,42	95,62
Junio	6,7	5,4	0,38	85,04
Julio	9,16	6,57	0,46	103,48
Agosto	8,4	6,18	0,43	97,39
Septiembre	6,99	5,53	0,39	87,03
Octubre	6,92	5,49	0,38	86,54
Noviembre	11,41	7,86	0,55	123,83
Diciembre	8,51	6,24	0,44	98,25

Tabla 4 – Velocidad viento, presiones, tasa de infiltración y caudal de aire infiltrado

Con estos datos se pueden obtener las pérdidas por calor sensible a partir de la fórmula vista anteriormente. Una vez calculadas como potencia en kW, se expresan en unidades de energía (kWh/m²) mediante la conversión que aparece en el **Anexo D** adjunto. Para ello se necesita conocer las horas de funcionamiento de los equipos de climatización en cada mes, que se detallan en la **Tabla 5**; por un lado las horas que se pone en marcha la refrigeración (al pasar de 25°C la temperatura interior) y por otro lado las que opera la calefacción (al disminuir de 20°C la temperatura interior). Tomando un horario de operación de los equipos de las 24 horas diarias cubriendo así la máxima ocupación. Con una superficie de 75 m² también necesaria para la conversión.

Mes	Demanda Qs {kW}		Horas funcionamiento	Demanda Qs {kWh/m ² }	
	Verano	Invierno		Verano	Invierno
Enero		0,35	744		3,52
Febrero		0,37	672		3,28
Marzo		0,27	744		2,68
Junio	0,06		145	0,12	
Julio	0,12		292	0,48	
Agosto	0,11		264	0,39	
Septiembre	0,07		105	0,10	
Octubre(15-31)		0,17	408		0,84
Noviembre		0,37	720		3,53
Diciembre		0,37	744		3,72
		TOTAL	4838	1,09	17,57

Tabla 5 – Demandas por calor sensible

Los valores que se obtienen y que quedan recogidos en la **Tabla 5** muestran una gran diferencia entre las pérdidas por calor sensible durante el periodo invernal (17.57kWh/m²) y el estival (1.09kWh/m²). Esto es debido principalmente a que en invierno la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior es significativamente grande (las temperaturas exteriores son bastante bajas y apenas se acercan a la temperatura de consigna de la calefacción, 20°C). En cambio, durante el periodo de verano las temperaturas exteriores se encuentran en torno a la temperatura de consigna de la refrigeración, 25°C (sobrepasándola en contadas ocasiones). Estos resultados tendrán un claro efecto en las demandas de climatización, originando mayores consumos en la calefacción que en la refrigeración del recinto a lo largo del año.

Cálculo de las demandas por calor latente

Es aquel que recibe un cuerpo y hace que disminuya su humedad. Mientras se produce no hay un cambio de temperatura, pero si una variación en la humedad del aire infiltrado, la cual nos determinara el incremento de energía necesario para acondicionar ese aire, a una humedad de confort en el interior (50%), la cual será distinta de la exterior. Este calor se calcula de la siguiente forma:

$$Ql (kW) = V \left(\frac{m^3}{h} \right) \times \rho_{aire} \left(\frac{kg \text{ aire húmedo}}{m^3} \right) \times h_{fg} \left(\frac{kJ}{kg \text{ agua}} \right) \times |X_{ext} - X_{int}| \left(\frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire húmedo}} \right) \times \frac{1}{3600} \frac{h}{s}$$

Donde:

Qs (kW), es la carga térmica sensible por ventilación o infiltración;

V (m3/h), es el caudal de aire infiltrado o de ventilación y que es el producto del volumen del recinto por el nº de veces que se renueva dicho volumen de aire;

Vol (m³), es el volumen de aire del recinto a analizar, **225m³**

n_i (1/h), es el numero de veces que se renueva el volumen en una hora;

ρ (kg/m3), es la densidad del aire húmedo a 20°C, **1.3 kg/m³**

h_{fg}, es la entalpía de vaporización del agua a P_{atm} y 20°C, **2.45 · 10³ kJ/kg**

ΔX (kg agua/ kg aire húmedo), es la diferencia de humedades específicas, $|X_{ext} - X_{int}|$

Al igual que para el cálculo del calor sensible, hay que hacer uso del caudal de aire infiltrado procedente del exterior. Estos valores serán los obtenidos de la **Tabla 4**.

Para calcular ΔX en (kg agua/ kg aire húmedo), se emplea:

$$\phi \text{ (humedad relativa)} = \frac{Pp_{H_2O}}{P_{sat}(Ta)}$$

Si $\phi = 50\% \rightarrow Pp_{H_2O} = 0.5 \times P_{sat}(T^a)$ [en donde T^a es la T^a interior o exterior (°C)]

Para calcular la P_{sat} (T^a) se aplica la siguiente fórmula, la cual es una aproximación de tablas termodinámicas y que se ha consultado en una pagina Web [w7]. Ver **Tabla 6**.

$$P_{sat}(T^a) = \exp(60.433 - 6834.271/T^a - 5.16923 \cdot \ln T^a) \times 100$$

Donde:

T^a es la temperatura en °K.

	T int {°C}	T ext {°C}	P_{sat} int {Pa}	P_{sat} ext {Pa}
Enero	20,00	6,16	23,35	9,58
Febrero	20,00	7,44	23,35	10,53
Marzo	20,00	9,95	23,35	12,53
Junio	25,00	20,67	31,63	14,56
Julio	25,00	24,35	31,63	31,48
Agosto	25,00	23,89	31,63	30,57
Septiembre	25,00	20,47	31,63	24,73
Octubre	20,00	13,67	23,35	15,98
Noviembre	20,00	9,41	23,35	11,96
Diciembre	20,00	6,40	23,35	9,76

Tabla 6 - P_{sat}(T^a) interior y exterior

Teniendo las humedades relativas (φ) tanto interiores como exteriores de cada mes, y teniendo las P_{sat} (T^a), se puede calcular las Pp H₂O (Ver **Tabla 7**).

	Hum rel int { % }	Hum rel ext { % }	Pp H₂O int {Pa}	Pp H₂O ext {Pa}
Enero	50,00	73,02	11,67	6,84
Febrero	50,00	64,77	11,67	6,56
Marzo	50,00	53,58	11,67	6,41
Junio	50,00	45,27	15,81	10,34
Julio	50,00	36,71	15,81	10,43
Agosto	50,00	38,28	15,81	10,69
Septiembre	50,00	47,92	15,81	11,01
Octubre	50,00	61,67	11,67	9,35
Noviembre	50,00	69,88	11,67	8,10
Diciembre	50,00	74,34	11,67	7,07

Tabla 7 – Pp H₂O interior y exterior (Pa)

Conociendo las siguientes formulas se lleva a cabo el cálculo de la humedad específica (ver **Tabla 8**).

$$X \text{ (humedad específica)} = \frac{m_{H_2O}}{m_{\text{aire seco}} + m_{H_2O}}$$

Con lo que la humedad específica queda:

$$X = \frac{n_{H_2O} \times PM_{H_2O}}{(n_{aire\ seco} \times PM_{aire\ seco}) + (n_{H_2O} \times PM_{H_2O})} = \frac{Pp_{H_2O}}{P_{aire}}$$

$$X = \frac{Pp_{H_2O} \times 0'622}{(P_{atm} - Pp_{H_2O}) + (Pp_{H_2O} \times 0'622)}; P_{atm\ aire} = 934650 \text{ Pa}$$

	X_{int} {kg agua/kg aire}	X_{ext} {kg agua/kg aire}	$ X_{ext} - X_{int} $ {kg agua/kg aire}
Enero	0,008	0,005	0,003
Febrero	0,008	0,004	0,003
Marzo	0,008	0,004	0,003
Junio	0,010	0,007	0,004
Julio	0,010	0,007	0,004
Agosto	0,010	0,007	0,003
Septiembre	0,010	0,007	0,003
Octubre	0,008	0,006	0,002
Noviembre	0,008	0,005	0,002
Diciembre	0,008	0,005	0,003

Tabla 8 – Humedad específica (kg agua/kg aire)

Con estos datos se pueden obtener las pérdidas por calor latente a partir de la fórmula vista anteriormente. Una vez calculadas como potencia en kW, se expresan en unidades de energía (kWh/m²) mediante la conversión que aparece en el **Anexo D** adjunto. Para ello se necesita conocer las horas de funcionamiento de los equipos de climatización en cada mes, detalladas en la **Tabla 9**; por un lado las horas que se pone en marcha la refrigeración (al disminuir del 50% la humedad interior) y por otro lado las que opera la calefacción (al pasar del 50% la humedad interior). Tomando un horario de operación de los equipos, las 24 horas diarias, cubriendo así la máxima ocupación. Con una superficie de 75 m² también necesaria para la conversión.

Mes	Demanda Qlat {kW}		Horas funcionamiento	Demanda Qlat {kWh/m2}	
	Verano	Invierno		Verano	Invierno
Enero		1,67	744		16,55
Febrero		1,77	672		15,83
Marzo		1,82	744		18,05
Junio	1,88		720	18,05	
Julio	1,85		744	18,35	
Agosto	1,76		744	17,46	
Septiembre	1,65		720	15,84	
Octubre		0,81	408		4,38
Noviembre		1,23	720		11,83
Diciembre		1,59	744		15,77
		TOTAL	6960	69,70	82,42

Tabla 9 - Demandas por calor latente

En cuanto a los valores obtenidos para las demandas de climatización, debidas a las perdidas por calor latente, que se muestran en la **Tabla 9**, señalar que en este caso el valor que influirá de forma más acentuada en el calculo es la diferencia de humedades específicas entre el exterior y el interior. Dadas las condiciones climáticas del emplazamiento de análisis (Madrid), la humedad específica del aire exterior siempre esta por debajo de la humedad específica del aire interior de la vivienda. Tanto en invierno como en verano, esta disminución de la humedad interior debido a la infiltración de aire menos húmedo, esta en torno a los mismos valores (**Tabla 8**) obteniendo unas demandas similares para ambos periodos.

Las demandas obtenidas por calor latente tienen un orden de magnitud similar al de los valores recogidos en la **Tabla 5** (calor sensible), aunque en este caso no es tanta la diferencia entre un periodo y otro, como pasaba con las demandas por calor sensible debido a la gran diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior del recinto.

3.3.2 Tasa infiltración: caudal mínimo ventilación establecido por el CTE

El proceso de cálculo es similar al que se ha visto anteriormente, pero en este caso para un caudal de ventilación de $594\text{m}^3/\text{h} = 2.64 \text{ ren/h}$ según el CTE HS 3 Tabla 2.1 [30]. Dichos cálculos se encuentran detallados en el **Anexo D** obteniendo las siguientes demandas por calor sensible y calor latente (ver **Tablas 14 y 18**):

Demandas por calor sensible

Mes	Demanda Qs {kW}		Horas funcionamiento	Demanda Qs {kWh/m ² }	
	Verano	Invierno		Verano	Invierno
Enero		2,31	744		22,88
Febrero		2,09	672		18,75
Marzo		1,68	744		16,62
Junio	0,44		145	0,84	
Julio	0,71		292	2,76	
Agosto	0,68		264	2,39	
Septiembre	0,49		105	0,68	
Octubre(15-31)		1,13	408		6,16
Noviembre		1,77	720		16,95
Diciembre		2,27	744		22,48
		TOTAL	4838	6,68	103,84

Tabla 14 – Demandas por calor sensible

Los valores que se obtienen y que quedan recogidos en la **Tabla 14** muestran una gran diferencia entre las pérdidas por calor sensible durante el periodo invernal (103.84kWh/m²·año) y el estival (6.68kWh/m²·año). Esto es debido principalmente a que en invierno la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior es significativamente grande (las temperaturas exteriores son bastante bajas y apenas se acercan a la temperatura de consigna de la calefacción, 20°C). En cambio, durante el periodo de verano las temperaturas exteriores se encuentran en torno a la temperatura de consigna de la refrigeración, 25°C (sobrepasándola en contadas ocasiones). Estos resultados tendrán un claro efecto en las demandas de climatización, originando mayores consumos en la calefacción que en la refrigeración del recinto a lo largo del año.

En comparación con los resultados obtenidos en la **Tabla 5** (demandas por calor sensible con tasa infiltración experimentos CIRCE) se aprecia en ambos periodos una considerable diferencia entre ellos. De los 17.57kWh/m²·año a los 103.84kWh/m²·año (invierno) y de los 1.09kWh/m²·año a los 6.68kWh/m²·año (verano), esta gran diferencia se debe esencialmente a que el caudal de aire a acondicionar es en este caso considerablemente mayor, de 97.68 m³/h a 594 m³/h (estos valores se recogen en la Tabla 3 del capítulo 3).

Demandas por calor latente

	Demanda Qlat {kW}		Horas funcionamiento	Demanda Qlat {kWh/m ² }	
Mes	Verano	Invierno		Verano	Invierno
Enero		0,26	744		2,55
Febrero		0,31	672		2,77
Marzo		0,29	744		2,91
Junio	0,27		720	2,58	
Julio	0,32		744	3,20	
Agosto	0,29		744	2,86	
Septiembre	0,24		720	2,32	
Octubre		0,12	408		0,64
Noviembre		0,26	720		2,47
Diciembre		0,26	744		2,61
		TOTAL	6960	10,96	13,93

Tabla 18 - Demandas por calor latente

En cuanto a los valores obtenidos para las demandas de climatización, debidas a las perdidas por calor latente, que se muestran en la **Tabla 18** añadir que tanto en invierno como en verano, la diferencia de humedades específicas entre el exterior y el interior esta en torno a los mismos valores (**Tabla 17**) obteniendo unas demandas similares para ambos periodos.

Las demandas obtenidas por calor latente difieren de los valores recogidos en la **Tabla 14** (calor sensible). Mientras que para verano estos son mayores ($69.70 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$ frente a $6.68 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$) en invierno este valor es claramente inferior ($82.42 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$ frente a $103.84 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$) esto es debido a que la carga por ventilación, en invierno esta dominada por la componente sensible, debido a la gran diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior del recinto. Sin embargo, en verano la carga esta más influenciada por la componente latente debido a la diferencia de humedades específicas entre el exterior y el interior.

En comparación con los resultados obtenidos en la **Tabla 5** (demandas por calor latente con tasa infiltración de aire experimentos CIRCE) se aprecia en ambos periodos una considerable diferencia entre ellos. De los $13,93 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$ a los $82.42 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$ (invierno) y de los $10,96 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$ a los $69.70 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$ (verano), esta gran diferencia se debe esencialmente a que el caudal de aire a acondicionar es en este caso

considerablemente mayor, de 594 m³/h frente a 97.68 m³/h (estos valores de recogen en la Tabla 3 del capítulo 3).

3.3.3 Tasa infiltración: la establecida para una Passivhaus

Igual que en los otros dos casos, se trata de calcular las demandas de climatización asociadas a la tasa de infiltración establecida para una Passivhaus, la cual tiene un valor de 0.6 ren/h a 50Pa. Mediante los cálculos detallados en el **Anexo E** se obtienen las demandas por calor sensible y calor latente (ver **Tablas 20 y 24**):

Demandas por calor sensible

Mes	Demanda Qs {kW}		Horas funcionamiento	Demanda Qs {kWh/m ² }	
	Verano	Invierno		Verano	Invierno
Enero		0,06	744		0,60
Febrero		0,06	672		0,56
Marzo		0,05	744		0,46
Junio	0,01		145	0,02	
Julio	0,02		292	0,08	
Agosto	0,02		264	0,07	
Septiembre	0,01		105	0,02	
Octubre(15-31)		0,03	408		0,14
Noviembre		0,06	720		0,61
Diciembre		0,06	744		0,64
		TOTAL	4838	0,19	3,01

Tabla 20 – Demandas por calor sensible

Los valores que se obtienen y que quedan recogidos en la **Tabla 20**, muestran una pequeña diferencia entre las perdidas por calor sensible durante el periodo invernal (3.01kWh/m²·año) y el estival (0.19kWh/m²·año). Esto es debido principalmente a que en invierno la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior es significativamente grande (igual que en los casos anteriores). En cambio, durante el periodo de verano las temperaturas exteriores se encuentran en torno a la temperatura de consigna de la refrigeración, 25°C (sobrepasándola en contadas ocasiones). Estos resultados tendrán un claro efecto en las demandas de climatización, originando mayores consumos en la calefacción que en la refrigeración del recinto a lo largo del año.

En comparación con los resultados obtenidos en la **Tabla 5** (demandas por calor sensible con tasa infiltración experimentos CIRCE) se aprecia en ambos periodos una considerable diferencia entre ellos. De los 17.57kWh/m²·año a los 3.01kWh/m²·año (invierno) y de los 1.09kWh/m²·año a los 0.19kWh/m²·año (verano), esta diferencia se debe esencialmente a que el caudal de aire a acondicionar es en este caso es menor, de 16.74 m³/h frente a 97.68 m³/h (estos valores se recogen en la Tabla 3 del capítulo 3).

Si se comparan con los resultados obtenidos en la **Tabla 14** (demandas por calor sensible con tasa infiltración el caudal de ventilación mínimo exigido por el CTE) la diferencia entre ellos aún es más significativa. De los 103.84kWh/m²·año a los 3.01kWh/m²·año (invierno) y de los 6.68kWh/m²·año a los 0.19kWh/m²·año (verano), esta gran diferencia se debe esencialmente a que el caudal de aire a acondicionar es en este caso considerablemente menor, de 16.74 m³/h frente a 594.00 m³/h (estos valores se recogen en la Tabla 3 del capítulo 3).

Demandas por calor latente

Mes	Demanda Qlat {kW}		Horas funcionamiento	Demanda Qlat {kWh/m2}	
	Verano	Invierno		Verano	Invierno
Enero		0,04	744		0,44
Febrero		0,05	672		0,47
Marzo		0,05	744		0,50
Junio	0,05		720	0,44	
Julio	0,06		744	0,55	
Agosto	0,05		744	0,49	
Septiembre	0,04		720	0,40	
Octubre		0,02	408		0,11
Noviembre		0,04	720		0,42
Diciembre		0,05	744		0,45
			TOTAL	1,88	2,39

Tabla 24 - Demandas por calor latente

En cuanto a los valores obtenidos para las demandas de climatización, debidas a las pérdidas por calor latente, que se muestran en la **Tabla 24** añadir que tanto en invierno como en verano, la diferencia de humedades específicas entre el exterior y el interior está en torno a los mismos valores (**Tabla 23**) obteniendo unas demandas similares para ambos periodos.

Las demandas obtenidas por calor latente difieren de los valores recogidos en la **Tabla 14** (calor sensible). Mientras que para verano estos son mayores ($1.88\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$ frente a $0.19\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$) en invierno este valor es claramente inferior ($2.39\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$ frente a $3.01\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$) esto es debido a que la carga por ventilación, en invierno esta dominada por la componente sensible, debido a la gran diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior del recinto. Sin embargo, en verano la carga esta más influenciada por la componente latente debido a la diferencia de humedades específicas entre el exterior y el interior. Aun así, la diferencia entre unos valores y otros es pequeña, debido a la baja tasa de infiltración de aire 0.6 ren/h a 50Pa que condiciona claramente las demandas de climatización.

En comparación con los resultados obtenidos en la **Tabla 5** (demandas por calor latente con tasa infiltración de aire experimentos CIRCE) se aprecia en ambos periodos una diferencia notable entre ellos. De los $13,93\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$ a los $2.39\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$ (invierno) y de los $10,96\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$ a los $0.19\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$ (verano), esta diferencia se debe esencialmente a que el caudal de aire a acondicionar es en este caso menor, de $16.74\text{ m}^3/\text{h}$ frente a $97.68\text{ m}^3/\text{h}$ (estos valores se recogen en la Tabla 3 del capítulo 3).

Si se comparan con los resultados obtenidos en la **Tabla 18** (demandas por calor latente con tasa infiltración el caudal de ventilación mínimo exigido por el CTE) se aprecia en ambos periodos una considerable diferencia entre ellos. De los $82.42\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$ a los $2.39\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$ (invierno) y de los $69.70\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$ a los $0.19\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$ (verano), esta gran diferencia se debe esencialmente a que el caudal de aire a acondicionar es en este caso considerablemente menor, de $16.74\text{ m}^3/\text{h}$ frente a $594.00\text{ m}^3/\text{h}$ (estos valores se recogen en la Tabla 3 del capítulo 3).

3.4 Discusión de resultados

3.4.1 Tasa infiltración: resultados experimentales CIRCE

Demanda de calefacción

En régimen de invierno resulta lógico considerar nula la acción de las fuentes internas (equipos y ocupación) y de la irradiación solar, puesto que su efecto resulta favorable. La carga en el interior del local se deberá a la transmisión a través de la envolvente y a la **ventilación** que implica una pérdida de **calor sensible** (por la menor temperatura del aire exterior con respecto a la temperatura de confort interior). Lo normal en instalaciones sencillas es encontrar equipos de calefacción compuestos únicamente por un dispositivo que cede calor al aire (radiadores, fan-coils, bombas de calor sencillas, etc.). En este caso **se pierde el control de la humedad**, ya que la batería de calor sólo es capaz de aportar calor sensible. El ciclo seguido en este caso sería el siguiente (ver **Figura 6**).

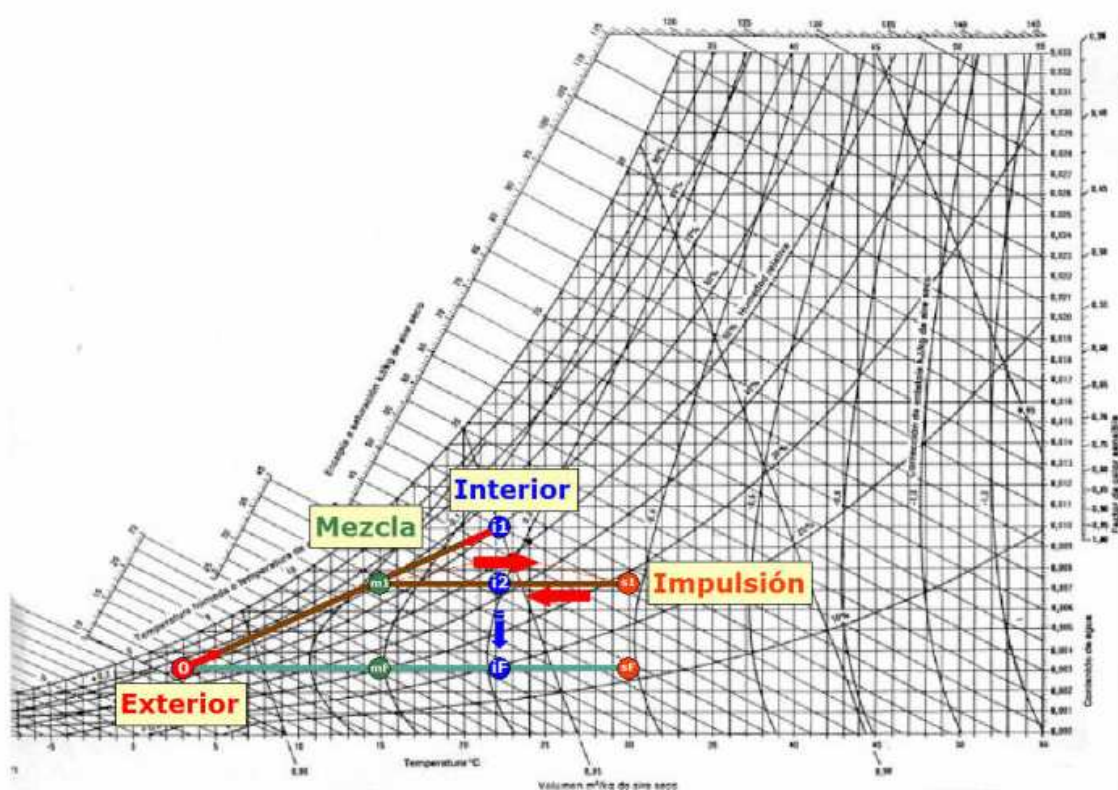


Figura 6 – Transformaciones del aire con la calefacción (diagrama psicrométrico) [w6]

- Suponiendo que el aire interior está en condiciones ideales (i1), el punto de mezcla resultante tendrá un contenido en agua inferior (m1) al del aire interior.
- Al pasar el aire de mezcla (m1) por el equipo de calefacción, sube su temperatura pero no su contenido en agua, hasta llegar a un punto de impulsión (s1).
- El aire impulsado (s1) vence la carga sensible del interior del local, pero la humedad final resulta menor que la inicial (i2)

- El proceso se repetiría varias veces hasta llegar al punto en el que el contenido de agua del aire interior es igual al del aire exterior (iF).

Dado que este trabajo trata de la infiltración de aire exterior en la vivienda, la demanda de calefacción calculada, asociada a dicha ventilación, es la siguiente:

$$Q_{\text{calefacción}} = Q_{\text{sensible}} = 17.57 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$$

Con lo explicado anteriormente se concluye, que aunque los equipos de calefacción únicamente son capaces de aportar calor sensible, para conseguir un nivel de confort aceptable en la vivienda, también se requiere un aporte de humedad al aire interior por las pérdidas debidas al calor latente, 13,93 kWh/m²·año (aire exterior con menor humedad específica). Esto explica la tendencia a colocar cubetas que contienen agua en los radiadores, para que esta se evapore y aumente el contenido en agua del aire interior del recinto. Otra posibilidad es la incorporación de un humidificador, encargado de aumentar la humedad del aire interior. Estos equipos tienen unos consumos eléctricos moderados, a su vez incorporan un depósito de agua que debe ser rellenado continuamente, lo que implica un mantenimiento y control por parte del usuario.

Por otro lado, una alternativa que puede analizarse, es la incorporación de un recuperador de calor entálpico, es decir, un intercambiador de calor que además de recuperar parte del calor sensible del aire de extracción, también recupera parte de su humedad, haciendo más confortables las condiciones interiores de la vivienda. Estos equipos proporcionan un ahorro energético, pero requieren de una mayor inversión inicial dado que sus costes son significativamente mayores que el de un humidificador.

Demanda de refrigeración

Durante el régimen de verano, la acción de las fuentes internas (equipos y ocupación) y de la irradiación solar, ya no son favorables sino que suponen ciertas ganancias térmicas que aumentan la demanda de refrigeración. Aun así, como he comentado anteriormente, este trabajo se centra en la demanda de refrigeración debida a la **ventilación** de la vivienda, la cual supone tanto unas ganancias de **calor sensible** como unas pérdidas de **calor latente**

(siendo el aire exterior mas caliente y menos húmedo que el aire del interior del recinto).
Ver **Figura 7**.

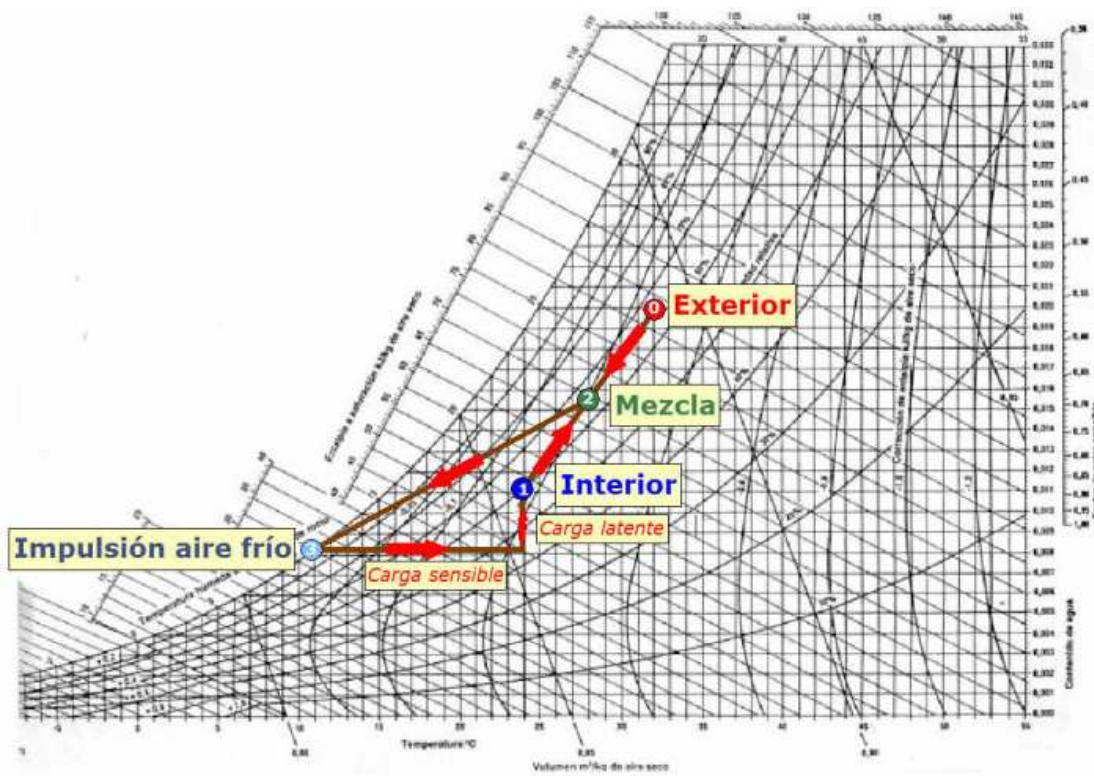


Figura 7 - Transformaciones del aire con la refrigeración (diagrama psicrométrico) [w6]

- El aire del interior del recinto se encuentra en las condiciones ideales (1).
- El aire interior se mezcla en una determinada fracción con el aire exterior, resultando una corriente de mezcla con temperatura superior y humedad inferior. La energía aportada por el aire exterior en esta transformación es la carga de ventilación que siempre tendrá componentes sensible (incrementa temperatura) y latente (incrementa humedad).
- Esta mezcla se lleva a una batería de frío que deja el aire en condiciones de impulsión. El paso del aire a través de la batería hace que pierda temperatura, pero también se produce una pérdida de contenido en agua (humedad), ya que generalmente la temperatura de la mezcla será superior a la temperatura de rocío correspondiente al aire de impulsión, desprendiéndose una cierta cantidad de agua por condensación.

- El aire impulsado (3) se lleva de nuevo al recinto, donde vence las cargas térmicas del local hasta llegar al punto 1, donde empieza a repetirse de nuevo el ciclo.

Sin embargo, puede ocurrir que el aire exterior sea más seco que el requerido en el interior, como es el caso de Madrid. En este caso el control de la humedad dependerá de la carga latente en el local: si ésta es mayor que la carga latente de ventilación ($10,96\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$), será posible controlar la humedad con el equipo de refrigeración, si es menor, este equipo necesitará de algún dispositivo que incremente la humedad del aire. Así, habrá casos en los que no sea posible alcanzar la humedad de confort (50%) con el empleo de un equipo de refrigeración, siendo necesario recurrir a equipos con sistemas de humectación.

$$Q_{\text{refrigeración}} = Q_{\text{sensible}} = 1.09\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$$

Una solución a este problema con la carga térmica por calor latente, es la colocación de estanques artificiales o difusores, que disminuyan la temperatura del aire exterior gracias a un aumento del contenido en agua de este antes de ser introducido en la vivienda. Con ello se reducen las demandas por calor sensible, consiguiendo a su vez un confort higrotérmico adecuado gracias al aporte de humedad adicional que proporciona la incorporación de alguno de esos elementos.

Otra solución que se comentó anteriormente y que también puede servir de gran ayuda en el caso de la refrigeración es la incorporación de un recuperador de calor entálpico.

3.4.2 Tasa infiltración: caudal de ventilación establecido por el CTE

Demanda de calefacción

Al igual que en el caso anterior (tasa infiltración: resultados experimentales CIRCE) se concluye, que aunque los equipos de calefacción únicamente son capaces de aportar calor sensible, para conseguir un nivel de confort aceptable en la vivienda, también se requiere un

aporte de humedad al aire interior por las pérdidas debidas al calor latente, $82.42\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$ (aire exterior con menor humedad específica).

$$Q_{\text{calefacción}} = Q_{\text{sensible}} = 103.84\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$$

Demanda de refrigeración

Como se comentó en el caso anterior (tasa infiltración: resultados experimentales CIRCE) el control de la humedad dependerá de la carga latente en el local: si ésta es mayor que la carga latente de ventilación ($69.70\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$), será posible controlar la humedad con la batería de frío, si es menor, la batería de frío necesitará de algún dispositivo que incremente la humedad del aire.

$$Q_{\text{refrigeración}} = Q_{\text{sensible}} = 6.68\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$$

3.4.3 Tasa infiltración: la establecida para una Passivhaus

Demanda de calefacción

Al igual que en el caso anterior (tasa infiltración: resultados experimentales CIRCE) se concluye, que aunque los equipos de calefacción únicamente son capaces de aportar calor sensible, para conseguir un nivel de confort aceptable en la vivienda, también se requiere un aporte de humedad al aire interior por las pérdidas debidas al calor latente, $2.39\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$ (aire exterior con menor humedad específica).

$$Q_{\text{calefacción}} = Q_{\text{sensible}} = 3.01\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$$

Demanda de refrigeración

Como se comentó en el caso anterior (tasa infiltración: resultados experimentales CIRCE) el control de la humedad dependerá de la carga latente en el local: si ésta es mayor que la carga latente de ventilación ($1.88\text{kWh/m}^2\cdot\text{año}$), será posible controlar la humedad con

la batería de frío, si es menor, la batería de frío necesitará de algún dispositivo que incremente la humedad del aire.

$$Q_{\text{refrigeración}} = Q_{\text{sensible}} = 0.19 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$$

3.4.4 Tabla comparativa

Con el fin de contemplar mejor la diferencia entre las demandas de climatización para cada uno de los tres niveles de hermetismo al aire, establecidos en este trabajo, a continuación se reúnen en la **Tabla 10**:

Grado hermetismo al aire	caudal [m3/h]	Dem. calefacción [kWh/m2·año]	Dem. refrigeración [kWh/m2·año]
1. Legislación (CTE)	594.00	103.84	6.68
2. Experimental	97.68	17.57	1.09
3. Passivhaus	16.74	3.01	0.19

Tabla 10 – Tabla comparativa demandas climatización para los tres grados de hermetismo al aire

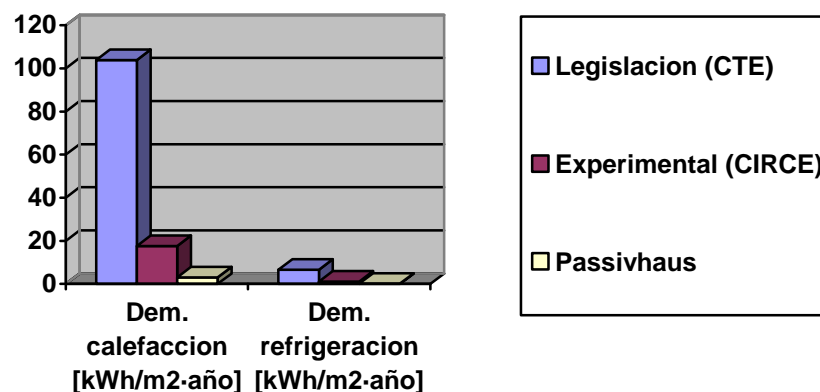


Figura 8 - Grafica comparativa demandas climatización para los tres grados de hermetismo al aire

Se aprecia claramente la diferencia en las demandas entre los tres grados de hermetismo al aire, viendo una vez más lo ineficiente que resulta el establecer como bueno el caudal mínimo de ventilación exigido por la actual legislación (CTE). La cual conlleva a unas demandas de climatización elevadas, calefacción = 103.84kWh/m2·año y refrigeración = 6.68kWh/m2·año (detalladas en **Tabla 10**), para lo que a aclimatación de un recinto tan

pequeño se refiere. Por otro lado, también se aprecia una gran diferencia entre las demandas de calefacción y las de refrigeración y eso es debido a que las temperaturas medias horarias obtenidas para Madrid durante el año 1989 son realmente moderadas situándose cerca de la temperatura de consigna de refrigeración (25°C).

Como se menciona en la discusión de los resultados (apartado 3.4), los equipos de climatización no son capaces de controlar la humedad. Los equipos de calefacción, porque únicamente satisfacen las demandas debidas a las pérdidas por calor sensible (disminución de la temperatura) y los equipos de refrigeración, porque dadas las condiciones climáticas de Madrid durante el verano (humedad específica exterior inferior que la interior), el control de la humedad dependerá de la carga latente del recinto, pudiendo ser necesaria la incorporación de algún dispositivo que aumente la humedad del aire.

Ahora bien, si en vez de tener unas demandas de climatización elevadas (las asociadas al caudal de ventilación mínimo establecido por el CTE), se tienen unas demandas mucho más bajas (las obtenidas para una tasa de infiltración como la de una Passivhaus) la necesidad de incorporar dispositivos que controlen la humedad del aire no es tan relevante. Además, estos tienen un coste económico adicional, de inversión y de consumo eléctrico, lo que implica un mayor desembolso si realmente se pretende mantener unos niveles de confort saludables en la vivienda. Diversas soluciones bioclimáticas, como situar algún lago artificial o la colocación de césped vegetal, pueden satisfacer las necesidades de humedad en el aire exterior (verano). Pequeños difusores u otros sistemas de humectación de bajo consumo, ayudaran a contrarrestar las pérdidas de humedad interior (invierno) causadas por el funcionamiento de los equipos de calefacción.

3.5 Valoración de la incorporación de un recuperador de calor

3.5.1 Definición

También conocido como un intercambiador de calor, intercambiador de aire o intercambiador aire-aire, un *recuperador de calor*, es un sistema de ventilación que emplea a un contra-flujo de calor entre la entrada y la salida del flujo de aire. El recuperador de calor permite una eficaz renovación del aire sin derrochar el calor del interior del recinto. Esto permite ahorrar energía de calefacción en valores entre 15 y 30% dependiendo de la calidad de las ventanas y puertas respecto a su permeabilidad al aire [25, 26].

Estos dispositivos se dividen en dos grupos: los recuperadores de calor (sensible) y los recuperadores de energía o entálpicos, que además recuperan parte de la humedad del aire de extracción (ver Figuras 9 y 10).



Figura 9 – Recuperador de calor (RC)

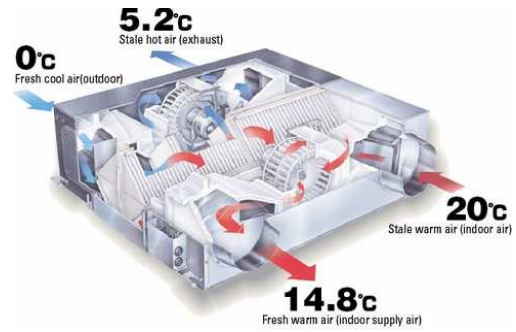


Figura 10 – Recuperador de energía (RE)

Tipo	Fabricante	Modelo	Caudal (m ³ /h)	Consumo eléctrico(W)	Precio (€) Sin IVA	Eficiencia (%)
RC	ECOVENT	KWL EC30	30	2 X 2	1110	70
RC	ASPIRNOVA	RCA-550-H	600	2 x 85	1584	67
RC	GALLETI	REKO 06	600	180	2530	68
RE	DAIKIN	VAM650FA	650	280	2594	74
RE	mitsubishi	LGH-65RX5-E	650	315	-	77

Tabla 25 - Fabricantes

Se plantea cual sería el resultado de incorporar uno de estos equipos a un edificio, como afecta a los consumos de calefacción, haciendo un balance entre el ahorro energético conseguido y el consumo eléctrico del dispositivo.

En primer lugar se deben realizar unas consideraciones preliminares para proceder a la simulación del comportamiento energético a lo largo de un año y así obtener las nuevas demandas que requiere la vivienda con la incorporación del recuperador de calor.

3.5.2 Datos de partida y consideraciones preliminares

Conociendo que en principio se trata de climatizar una vivienda de 75 m² (225 m³), y si asumimos un flujo de aire exterior de 594 m³/h, establecido por el CTE, que corresponde a 2,64 ren/h.

Ante esa situación, se ha seleccionado un Recuperador de Calor de la marca TECNA ASPIRNOVA modelo RCA-550-H [w8], cuyo caudal máximo es de 600 m³/h, de tal manera que manejando 594 m³/h las pérdidas de carga serán las mínimas posibles. Como se muestra en la **Tabla 25** dicho dispositivo tiene una eficiencia del 67%, aunque el cálculo se realizara con una eficiencia en la transmisión de calor del 50% ya que como se sabe el equipo no siempre estará trabajando en sus máximas exigencias.

Por último añadir que dado que las mayores demandas de climatización se dan en invierno, es decir, con la calefacción (calor sensible), se eliminan los meses calidos del cálculo y se centrará en ver que ahorros obtenemos durante el periodo invernal o mejor dicho en los meses en que hay demanda de calefacción. Todo este proceso se encuentra detallado en el **Anexo F** adjunto, obteniendo como resultado final la **Tabla 26** que se muestra a continuación.

3.5.3 Proceso de cálculo

	T _{extracción} (°C)	T _{admisión} (°C)	T _{impulsión} (°C)	T _{extracción} -T _{impulsión} (°C)
Enero	20,00	6,16	13,08	6,92
Febrero	20,00	7,44	13,72	6,28
Marzo	20,00	9,95	14,97	5,03
Octubre	20,00	13,67	16,83	3,17
Noviembre	20,00	9,41	14,70	5,30
Diciembre	20,00	6,40	13,20	6,80

Tabla 26 - Demandas calefacción con recuperador de calor

Como se puede ver la demanda de calefacción debido al calor sensible ha disminuido bastante, de los 103.84 kWh/m²·año a **51.54kWh/m²·año**, lo que representa un ahorro del 50% (eficiencia 50%), es decir, 52.3kWh /m²·año.

Ahora bien, si suponemos que la calefacción esta compuesta por una caldera de gas natural con un rendimiento del 0.8, el ahorro en el consumo de calefacción resulta el siguiente:

$$(52.3\text{kWh/m}^2\cdot\text{año} \times 75 \text{ m}^2) / 0.8 = 4903.12\text{kWh/año}$$

Tomando como tarifa básica del gas natural 0.04695€/kWh (Inferior o igual a 5.000kWh/año) el ahorro económico es el siguiente:

$$4903.12\text{kWh/año} \times 0.04695\text{€/kWh} = 230.2\text{€/año}$$

Por otro lado, el recuperador de calor incorpora dos ventiladores de 85W con lo que su consumo eléctrico es el siguiente:

$$2 \times 85\text{W} \times 4008\text{h/año} = 681.37\text{kWh/año}$$

Y tomando como tarifa eléctrica 0.12€/kWh, el consumo de dicho dispositivo a lo largo de un año es de:

$$681.37\text{kWh/año} \times 0.12\text{€/kWh} = 81.76\text{€/año}$$

Con lo cual, el ahorro económico resultante de la diferencia entre el ahorro conseguido en calefacción y el consumo adicional del equipo es:

$$230.2\text{€/año} - 81.76\text{€/año} = 148.44\text{€/año}$$

Sabiendo que el equipo cuesta en torno a los 1900€recuperaríamos el valor de la inversión al cabo de:

$$\text{P.R.} = 1900\text{€} / 148.44\text{€/año} = 12.8 \text{ años}$$

El periodo de retorno de la inversión realizada seria algo mayor que si la eficiencia fuese del 75% (P.R. = 8.4años), como se recomienda en diferentes artículos que tratan al respecto [26, 27]. Los recuperadores entálpicos tienen mayores eficiencias debido a la recuperación de calor total, lo que los convierte en una buena solución.

Aun así, si se tiene en cuenta que la vida media útil de un edificio nuevo son 25 años o más, la incorporación de uno de estos equipos puede estar originando beneficios a partir de los 13 años, con media vida útil de la vivienda por delante. Con esto se quiere decir que es una buena alternativa para ahorrar consumos de climatización, en este caso de calefacción, y aun más cuando se dan unas demandas tan altas.

4. Conclusiones

Las técnicas de construcción de los edificios mediante un buen aislamiento no tienen el efecto deseado si no se lleva a cabo una buena ejecución y supervisión de la obra, pudiendo dar lugar a infiltraciones de aire indeseables por diversos vicios constructivos. A su vez se debe tener especial cuidado con la ventilación natural de la vivienda ya que esta puede suponer más del 50% de las pérdidas totales de calor.

A la hora de construir el edificio destinado al concurso Solar Decathlon se ha de tener en cuenta que siempre será mejor una vivienda de una planta que de dos, ya que esta última tendrá mayor tasa de infiltración de aire exterior por el siempre hecho del efecto chimenea que se producirá en su interior. Esto se explica mediante resultados experimentales en un estudio realizado a 170 viviendas unifamiliares en Finlandia [7].

Son varios los estándares de edificación sostenible existentes en la actualidad (MINERGIE, LEED, PASSIVHAUS,...) por lo que a la hora de elegir uno de ellos, bajo el cual construir nuestra vivienda, se debe tener en cuenta los intereses con los que se quiere edificar, buscando así el que más se adecue a ellos y que más criterios comparta con la idea que se tiene. Así pues el caso de estudio se apoya en el estándar de edificación sostenible Passivhaus que aparte de ser uno de los más extendidos internacionalmente, se adapta considerablemente bien a toda la UE y comparte técnicas de construcción como puede ser la incorporación de un recuperador de calor, un buen aislamiento de la envolvente y una tasa de infiltración de aire significativamente baja, entre otras cosas.

Es importante tener en cuenta, que los resultados obtenidos en los ensayos realizados, corresponden a una edificación nueva. Por experiencia de los expertos encargados de la realización de los ensayos, la mayoría de las viviendas existentes en la actualidad sobrepasan dichas tasas de infiltración (4-10 ren/h a 50Pa), ya que se estaría hablando de edificios con mayor antigüedad. Para estos una buena alternativa podría ser el uso de la IHR (Infiltration Heat Recovery), es decir, si se hace un lavado de la envolvente del edificio, colocar un aislamiento que funcione dinámicamente recuperando así parte del calor que se está perdiendo por las diferentes aberturas.

En los cálculos realizados en este trabajo, la demanda de refrigeración obtenida para los meses calidos es significativamente pequeña ($0.19 - 6.68 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$) y esto es debido a que la relación de temperaturas medias horarias con las que se ha trabajado (correspondientes al año 1989) están relativamente cerca de la temperatura de confort o de consigna establecida para la refrigeración dentro de la vivienda. Es de suponer que estas demandas de refrigeración son algo mayores en la actualidad dado el gran incremento que hemos sufrido en las temperaturas en estos últimos diez años.

Se comenta en el cálculo de las demandas de climatización que el equipo de calefacción aporta únicamente calor sensible al aire interior de la vivienda, así pues la humedad del recinto acabara siendo igual a la humedad del aire exterior ($0.004\text{-}0.005 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire}}$). Para evitar posibles condensaciones en el interior de la vivienda, que pueden dar lugar a la aparición de moho y riesgo de enfermedad, además de garantizar un confort higrotérmico adecuado de los habitantes, seria interesante valorar el efecto que tendría la incorporación de un recuperador de calor total, es decir, un equipo que además de recuperar el calor sensible mantuviese la humedad del aire interior ($0.008 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire}}$).

Por otro lado, el equipo de refrigeración no aumenta sino que disminuye aun más la humedad del aire que se esta introduciendo en al vivienda (aire exterior más caliente y más seco que el interior), por lo que seria recomendable la incorporación de algún sistema de humectación. Hay en el mercado equipos (humidificadores) que llevan a cabo esta tarea pero que a su vez tienen unos consumos eléctricos asociados a su funcionamiento, por lo cual seria más aconsejable estudiar la colocación de algún estanque artificial de agua que aporte humedad al aire exterior antes de entrar en la vivienda a través de los equipos de ventilación o en su caso de refrigeración.

En cuanto a la incorporación de un recuperador de calor, como se puede ver en los cálculos realizados en el Anexo F adjunto, el efecto de su incorporación son unos ahorros tanto energéticos ($52.3 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$) como económicos (230.2 €/año) interesantes. Aunque esta no sea una practica común en la construcción de edificios en nuestro país, su incorporación es claramente beneficiosa para las demandas de climatización de las viviendas. Con aplicación al caso de estudio, la incorporación de uno de estos equipos supone la total independencia de los equipos de climatización, ya que junto con las ganancias internas

(solares, ocupación, equipos,...) se pueden cubrir suficientemente la demanda de calefacción 3.01kWh/m²·año que es la más significativa.

Una vivienda con una tasa de infiltración de aire (0.6 ren/h a 50Pa) como la de una Passivhaus ofrece mayor confort, reduciendo significativamente el consumo de energía. La energía útil necesaria para la calefacción del espacio se ha reducido en más de un 80% en comparación resultados experimentales en el edificio CIRCE de nueva construcción, 3.5ren/h a 50Pa. Y alrededor de un 97% en comparación con un edificio con la misma superficie (75m²) en el que se establezca una tasa de ventilación mínima como la exigida por el CTE, 2,64 ren/h.

5. Bibliografía

1. Código Técnico de la Edificación, Documento Básico Ahorro de Energía, Limitación de Demanda Energética (CTE HE 1)
2. Fernández-Seara J., Diz R., Uhía F. J., Dopazo A., Ferro J. M. Experimental analysis of an air-to-air heat recovery unit for balanced ventilation systems in residential buildings. *Energy Conversion and Management* 52 (2011) 635–640.
3. Norma UNE-EN 1026:2000. Ventanas y puertas. Permeabilidad al aire. Método de ensayo.
4. Norma UNE-EN 12207:2000. Ventanas y puertas. Permeabilidad al aire. Clasificación.
5. Kalamees T. Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia. *Building and Environment* 42 (2007) 2369–2377
6. Kalamees T., Kurnitski J., Korpi M., Vinha J. The distribution of the air leakage places and thermal bridges of different types of detached houses and apartment buildings. 2nd European BlowerDoor-Symposium, Kassel, Germany, 2007.
7. Jokisalo J., Kurnitski J., Korpi M., Kalamees T., Vinha J. Building leakage, infiltration, and energy performance analyses for Finnish detached houses. *Building and Environment* 44 (2009) 377– 387.
8. Mattsson B. The influence of wind speed, terrain and ventilation system on the air change rate of a single-family house. *Energy* 31 (2006) 719–731
9. Wanyu R. Chan, William W. Nazaroff, Phillip N. Price, Michael D. Sohn, Ashok J. Gadgil. Analyzing a database of residential air leakage in the United States. *Atmospheric Environment* 39 (2005) 3445–3455.

10. Peper S. Luftdichte Projektierung von Passivhäusern, CEPHEUS Projektinformation Nr. 7 (1999).
11. Jakob M. Marginal costs and co-benefits of energy efficiency investments: The case of the Swiss residential sector. *Energy Policy* 34 (2006) 172-187.
12. Pfeiffer A., Koschenz M., Wokaun A. Energy and building technology for the 2000 W society—Potential of residential buildings in Switzerland. *Energy and Buildings* 37 (2005) 1158-1174
13. Sam Kubba Ph.D. LEED™ Professional Accreditation, Standards, and Codes. *LEED Practices, Certification, and Accreditation Handbook*, 2010, Pages 77-114.
14. Sam Kubba Ph.D. LEED™ Documentation and Technical Requirements. *LEED Practices, Certification, and Accreditation Handbook*, 2010, Pages 49-75
15. Meola C., Di Maio R., Roberti N., Carlomagno G. M. Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures. *Engineering Failure Analysis* 12 (2005) 875–892.
16. Gayo E., de Frutos J. Interference filters as an enhancement tool for infrared thermography in humidity studies of building elements. *Infrared Physics & Technology* 38 (1997) 251-258.
17. Clark M.R., McCann D.M., Forde M.C. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges. *NDT&E International* 36 (2003) 265–275.
18. Vásquez R., Roldan E. Informe interno de medición con el método estandarizado de presurización en edificio CIRCE. Mayo 2010.

19. Schnieders J. CEPHEUS—measurement results from more than 100 dwelling units in passive houses. Summer Study Proceedings: Time to turn down energy demand (2003).
20. Peter R. Heat transfer through a well insulated external wooden frame wall. Doctoral thesis, 1997.
21. Virtanen M. Thermal coupling of leakage air and heat flows in buildings and building components. Doctoral Thesis, 1993.
22. Arne E, Bertil F. The optima-house. Air quality and energy use in a single-family house with counterflow attic insulation and warm crawl space foundation. Report TABK-95/3033, 1996.
23. Eurostat, Energy consumption in households, 1995 survey, European Commission, 1999.
24. Qiu K., Haghighat F. Modeling the combined conduction. Air infiltration through diffusive building envelope. *Energy and Buildings* 39 (2007) 1140-1150.
25. Manz H., Huber H., Schälin A., Weber A., Ferrazzini M., Studer M. Performance of single room ventilation units with recuperative or regenerative heat recovery. *Energy and Buildings* 31 (2000) 37-47.
26. Juodis E. Extracted ventilation air heat recovery efficiency as a function of a building's thermal properties. *Energy and Buildings* 38 (2006) 568-573.
27. Renato M. Lazzarin, Gasparella A. Technical and economical analysis of heat recovery in building ventilation systems. *Applied Thermal Engineering* 18 (1998) 47-67.
28. Feist W., Schnieders J., Dorer V., Haas A. Re-inventing air heating: Convenient and comfortable within the frame of the Passive House concept. *Energy and Buildings* 37 (2005) 1186–1203.

29. AEMet (Agencia Estatal de Meteorología) 1989 Datos climáticos de la localidad de Madrid
30. Código Técnico de la Edificación, Documento Básico Salubridad. Ventilación. Calidad del aire interior. (CTE HS 3)

Páginas web

- w1. http://www.passiv.de/07_eng/index_e.html
- w2. http://www.minergie.com/home_en.html
- w3. <http://www.spaingbc.org/leed/leed.html>
- w4. <http://www.meteored.com>
- w5. <http://www.aemet.es/es/-m:b,a/portada>
- w6. <http://www.arqui.com/ayuda/TeKton3D/Manual/BloqueII>
- w7. http://www.tutiempo.net/silvia_larocca/Temas/ecuaciones.htm
- w8. <http://www.tecna.es/recuperadores.asp>