

COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO DE LA ENVOLVENTE DEL EDIFICIO SEGÚN EL CTE. ANÁLISIS DE LAS CONDENSACIONES MEDIANTE EL CÁLCULO DE LA HUMEDAD RELATIVA INTERIOR. SOLUCIONES ALTERNATIVAS: SISTEMAS DE VENTILACIÓN POR CAUDAL VARIABLE

MARÍA JESÚS GAVIRA GALOCHA, M^a PILAR LINARES ALEMPARTE
Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja (CSIC)

JEAN-FRANÇOIS NOUVEL
ALDES AERAULIQUE

MIGUEL LAUTOUR
ALDER VENTICONTROL

RESUMEN:

El CTE, en sus Documentos Básicos de “Salubridad” HS y “Ahorro de energía” HE, limita y determina una serie de prestaciones del edificio implicadas en su comportamiento higrotérmico que están íntimamente relacionadas entre sí: producción de condensaciones y grado de ventilación.

Este documento trata de estas prestaciones del edificio, de la influencia de la una sobre la otra y de cómo podría afectar esta influencia en un diseño inteligente de los edificios, en la propuesta de lo que el CTE define como “Soluciones alternativas”, así como en una posible y futura revisión del CTE.

ABSTRACT:

The Spanish Building Code, in the Fundamental Documents “Hygiene and health” and “Save of energy”, establishes and limits two building performances related to its hygrothermal behaviour and that are closely related between them: the production of condensations and the ventilation rate.

This paper deals with these building performances, with the influence between them and with the way this influence could affect on a intelligent building design, with the proposal of “Alternative solutions” to the Building Code, and also with a possible future revision of the Building Code.

1. Introducción

1.1. El Código Técnico y sus exigencias higrotérmicas

El Código Técnico de la Edificación (CTE), en su parte I, establece las exigencias básicas que tienen que cumplir los edificios para satisfacer los requisitos básicos establecidos en la LOE. Así mismo, el CTE, en su parte II o lo que se ha denominado como Documentos Básicos (DB), proporciona en algunos casos los niveles prestacionales que permiten satisfacer dichas exigencias, y además, por un lado, métodos de verificación que permiten evaluar las soluciones concretas adoptadas en el diseño comprobando el cumplimiento de dichos niveles, así como, por otro lado, soluciones aceptadas y condiciones que presuponen el cumplimiento directo de las exigencias.

Las exigencias básicas referidas a las prestaciones higrotérmicas del edificio se definen en la parte I en los artículos 13 y 15 de la siguiente forma:

Artículo 13.1 Protección frente a la humedad

Se limitará el riesgo previsible de presencia inadecuada de agua o humedad en el interior de los edificios y en sus cerramientos como consecuencia del agua procedente de precipitaciones atmosféricas, de escorrentías, del terreno o de condensaciones, disponiendo medios que impidan su penetración o, en su caso permitan su evacuación sin producción de daños.

Artículo 15.1 Limitación de la demanda energética

Los edificios dispondrán de una envolvente de características tales que limite adecuadamente la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico en función del clima de la localidad, del uso del edificio y del régimen de verano y de invierno, así como por sus características de aislamiento e inercia, permeabilidad al aire y exposición a la radiación solar, reduciendo el riesgo de aparición de humedades de condensación superficiales e intersticiales que puedan perjudicar sus características y tratando adecuadamente los puentes térmicos para limitar las pérdidas o ganancias de calor y evitar problemas higrotérmicos en los mismos.

Ambas exigencias confluyen en el fenómeno de las condensaciones, aunque el desarrollo en la parte II de las mismas se ha realizado en el Documento Básico “Ahorro de energía” HE, que es donde se establece el método de verificación correspondiente.

1.2. El DB HE “Ahorro de energía” y las condensaciones

En la sección primera de este DB: “Limitación de la demanda energética” HE 1 el CTE establece el método de verificación de las condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos de los edificios. Para ello utiliza el método de la norma UNE-EN ISO 13.788 “Características higrotérmicas de los elementos y componentes e edificación. Temperatura superficial interior para evitar la humedad superficial crítica y la condensación intersticial. Métodos de cálculo”, que simplifica y hace de más fácil aplicación. Se determina que las condensaciones son función de:

- Propiedades higrotérmicas de los materiales que componen el cerramiento: conductividad térmica, λ , y factor de resistencia al vapor de agua, μ .
- Condiciones interiores del local: humedad relativa del ambiente interior y temperatura.
- Condiciones exteriores de cálculo: humedad relativa y temperatura específicas de la localidad en la que se encuentra el cerramiento.

De todos estos parámetros, el de la humedad relativa interior, en el caso de que se desconozca, se fija en función de la clase de higrometría del espacio, pero en el caso de que se conozcan la tasa de renovación del aire interior y del ritmo de producción de la humedad, se podrá calcular mediante el método especificado.

La tasa de renovación del aire interior es un factor que dependerá, en el caso de las viviendas, de los caudales de ventilación exigidos en otro Documento Básico “Salubridad” HS.

1.3. El DB HS “Salubridad” y la ventilación

En la sección tercera de este DB “Calidad del aire interior” HS 3 el CTE establece los distintos caudales de ventilación mínimos exigidos a las viviendas.

Lógicamente, conociendo el caudal y el volumen del local, se puede conocer la tasa de renovación del aire interior, que influirá directamente en la humedad relativa interior e indirectamente, en la producción de condensaciones.

1.4. Estructura del documento

El documento se estructura en dos partes:

1. Análisis del proceso de la condensación en los cerramientos de una vivienda según las exigencias del CTE.

La producción de condensación en un cerramiento depende de varios factores intrínsecos y extrínsecos a él, como son por ejemplo las condiciones de temperatura y de humedad relativa del exterior y del interior del edificio. Entre estas condiciones, la humedad relativa varía según sea la tasa de producción de la misma, la ventilación que exista, etc. Pero esta última variable, la ventilación, no se trata en el DB HE, sino que se desarrolla en el DB HS, donde se especifica el grado de ventilación requerido para cada tipo de local. En el DB HE se establece una humedad relativa fija que, para viviendas es del 55%.

En este análisis se trata de, con los datos reales de la ventilación tal y como vienen especificados en el DB HS e incluso con otros datos utilizando otras fuentes, estudiar las condensaciones en los cerramientos teniendo en cuenta para ello la humedad relativa consecuencia de esta ventilación.

Este análisis pretende demostrar que, al tener en cuenta la ventilación establecida en HS, la humedad relativa es menor siempre que la establecida en HE y, por lo tanto, el riesgo de condensaciones es menor, con lo que no habría que modificar la composición del cerramiento.

2. Análisis de una posible “Solución alternativa” para proporcionar una ventilación adecuada a una vivienda, que cumpla los requisitos tanto de HS como de HE, y que esté basada en el ahorro energético que puede proporcionar un sistema de ventilación de caudal variable.

Estos dos análisis se realizan sobre un caso concreto que llamamos caso estudio, en el que se establecen la dimensión de la vivienda, su ocupación, la producción de humedad, el cerramiento concreto, el mes y el emplazamiento elegidos para los cálculos, para así poder determinar las condiciones de partida que afectan al proceso de la condensación, como son las condiciones interiores (humedad relativa, determinada por la producción de vapor de agua y la ventilación, y temperatura), las exteriores (humedad relativa y temperatura en enero) y las del cerramiento (transmitancia térmica).

2. Caso estudio

2.1. Características

Vivienda

Tres dormitorios, salón-comedor, dos cuartos de baño y una cocina de 8 m² con caldera estanca.

Altura libre: 2,3 m.

Superficie: 75 m².

Véase figura 1.

Ocupación: 2 adultos y 2 niños.

Producción de vapor de agua:

La producción diaria se estima:

Cuerpo humano	3,5 kg
20 plantas	0,5 kg
Higiene personal	1,3 kg
Limpieza del hogar	0,2 kg
Lavado	0,4 kg
Lavado de ropa	1,8 kg
Cocinado	0,9 kg
Varios	0,2 kg
TOTAL	8,8 kg

La producción cada hora es de 0,36 kg

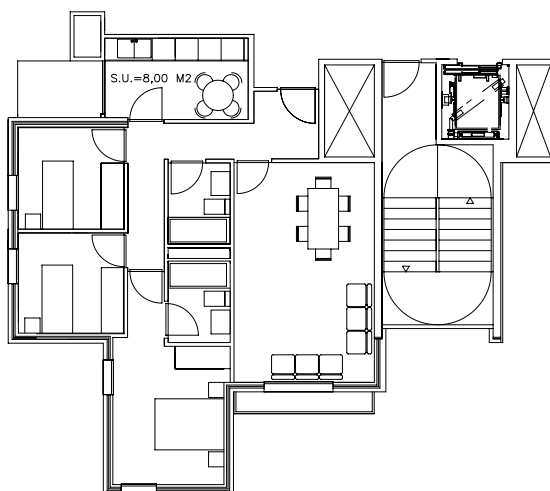


Figura 1. Caso estudio.

Cerramiento:

15 mm enfoscado + 115 mm ladrillo perforado + 30 mm cámara de aire + 40 mm aislamiento térmico EPS IV + 70 mm ladrillo hueco + 15 mm enlucido de yeso.

Las propiedades higrotérmicas de los materiales que componen las capas del cerramiento objeto de estudio, tomadas de la NBE-CT 79, son las descritas en la tabla 1.

	Espesor (mm)	Conductividad λ (W/m°C)	Resistencia térmica R (m² °C/W)	Resistividad al vapor de agua, r_v (MN s/g m)
Enfoscado	15	0,87	0,017	100
Fábrica ladrillo perforado	155	—	0,15	36
Cámara de aire no ventilada	30	—	0,18	5,5
Aislamiento térmico EPS IV	40	0,034	1,176	207
Fábrica de ladrillo hueco	70	—	0,15	30
Enlucido de yeso	15	0,3	0,05	60

Tabla 1. Propiedades higrotérmicas de los componentes del cerramiento.

Mes: Enero.

Emplazamiento: Burgos.

2.2. Condiciones de partida

2.2.1. Condiciones interiores

A) Parámetros que permanecen fijos en el cálculo

Temperatura del ambiente interior igual a 20 °C para el mes de enero.

Ventilación según el anejo 4.

B) Parámetro variable en el cálculo

B.1) Según datos experimentales

Humedad relativa interior [en tanto por 1] (ϕ_i) según mediciones in situ de Achilles N. Karagiozis del Oak Ridge National Laboratory, para una ventilación de 1 renovación por hora para cada uno de los rangos de producción de vapor de agua:

Para producción alta: 0,52

Para producción media: 0,39

Para producción baja: 0,33

Considera 3 rangos de producción de vapor:

Producción alta: 20 kg/día

Producción media: 10 kg/día

Producción baja: 5 kg/día

B.2) Según HE, sin datos de ventilación

Humedad relativa interior [en tanto por 1] (ϕ_i) que se considerará de 0,55, al ser un espacio de clase de higrometría 3.

Espacios de clase de higrometría 3 o inferior son aquellos en los que no se prevea una alta producción de humedad. Se incluyen en esta categoría todos los espacios de edificios residenciales.

B.3) Según HE, con datos de ventilación

Realizando el cálculo de la humedad relativa interior indicado en el apéndice del documento HE1, y tomando las condiciones de ventilación establecidas en HS, se obtiene una humedad relativa de 40% (Véase el anejo 4)

2.2.2. Condiciones exteriores

Temperatura exterior en enero (θ_e): 2,6°

Humedad relativa exterior en enero: 86%

2.2.3. Condiciones del cerramiento

La transmitancia térmica del cerramiento (U): 0,528 W/m² K. (Calculada según el anejo 1).

3. Análisis de las condensaciones

El procedimiento de cálculo para la comprobación de condensaciones que se establece en la sección primera "Limitación de demanda energética" del DB HE "Ahorro de energía" se basa en el procedimiento que se describe en la norma UNE-EN ISO 13788: 2002.

A continuación se analizan las condensaciones superficiales y las intersticiales.

3.1. Cálculo de las condensaciones superficiales

Para que no se produzcan condensaciones superficiales en los cerramientos y puentes térmicos se debe comprobar que el factor de temperatura de la superficie interior f_{Rsi} es superior al factor de temperatura de la superficie interior mínimo $f_{Rsi,min}$ para las condiciones interiores y exteriores correspondientes al mes de enero.

El procedimiento utilizado para el cálculo de las condensaciones intersticiales se describe en el anejo 2.

3.1.1. Cálculo tomando como condiciones interiores las establecidas en HE 1

El factor de temperatura de la superficie interior f_{Rsi} , es:

$$f_{Rsi} = 1 - U \cdot 0,25 = 1 - 0,528 \cdot 0,25 = 0,868$$

siendo

$$U = 0,528 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}.$$

El factor de temperatura de la superficie interior mínimo $f_{Rsi,min}$ es:

$$f_{Rsi,min} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{20 - \theta_e}$$

siendo

θ_e la temperatura exterior de la localidad en el mes de enero [°C];

$\theta_{si,min}$ la temperatura superficial interior mínima aceptable obtenida de la siguiente expresión [°C]:

$$\theta_{si,min} = \frac{237,3 \log_e \left(\frac{Psat}{610,5} \right)}{17,269 - \log_e \left(\frac{Psat}{610,5} \right)} = \frac{237,3 \log_e \left(\frac{1606,68}{610,5} \right)}{17,269 - 0,96} = \frac{227,80}{16,309} = 13,96$$

donde

P_{sat} es la presión de saturación máxima aceptable en la superficie obtenida de la siguiente expresión [Pa]:

$$Psat = \frac{P_i}{0,8} = \frac{1285,35}{0,8} = 1606,68$$

donde

P_i es la presión del vapor interior obtenida de la siguiente expresión [Pa].

$$P_i = \phi_i \cdot 2337 = 0,55 \cdot 2337 = 1285,35$$

donde

$$\phi_i = 0,55.$$

Por tanto:

$$f_{Rsi,min} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{20 - \theta_e} = \frac{13,96 - 2,6}{20 - 2,6} = \frac{11,36}{17,4} = 0,65$$

Como el factor de temperatura de la superficie interior f_{Rsi} es superior al factor de temperatura de la superficie interior mínimo $f_{Rsi,min}$, entonces **no se produce condensación superficial**.

3.1.2. Cálculo tomando como condiciones interiores las establecidas HS

El factor de temperatura de la superficie interior f_{Rsi} , es:

$$f_{Rsi} = 1 - U \cdot 0,25 = 1 - 0,528 \cdot 0,25 = 0,868$$

siendo

$$U = 0,528 \text{ [W/m}^2\text{K]}.$$

El factor de temperatura de la superficie interior mínimo $f_{Rsi,min}$ es:

$$f_{Rsi,min} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{20 - \theta_e}$$

siendo

θ_e la temperatura exterior de la localidad en el mes de enero [°C];

$\theta_{si,min}$ la temperatura superficial interior mínima aceptable obtenida de la siguiente expresión [°C]:

$$\theta_{si,min} = \frac{237,3 \log_e \left(\frac{P_{sat}}{610,5} \right)}{17,269 - \log_e \left(\frac{P_{sat}}{610,5} \right)} = \frac{237,3 \log_e \left(\frac{1168,5}{610,5} \right)}{17,269 - 0,65} = \frac{154,24}{16,62} = 9,28$$

donde

P_{sat} es la presión de saturación máxima aceptable en la superficie obtenida de la siguiente expresión [Pa]:

$$P_{sat} = \frac{P_i}{0,8} = \frac{934,8}{0,8} = 1168,5$$

donde

P_i es la presión del vapor interior obtenida de la siguiente expresión [Pa].

$$P_i = \phi_i \cdot 2337 = 0,40 \cdot 2337 = 934,8$$

donde

$$\phi_i = 0,40.$$

Por tanto:

$$f_{Rsi,min} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{20 - \theta_e} = \frac{9,28 - 2,6}{20 - 2,6} = \frac{6,68}{17,4} = 0,38$$

Como el factor de temperatura de la superficie interior f_{Rsi} es superior al factor de temperatura de la superficie interior mínimo $f_{Rsi,min}$, entonces **no se produce condensación superficial**.

3.2. Cálculo de las condensaciones intersticiales

El procedimiento para la comprobación de la formación de condensaciones intersticiales se basa en la comparación entre la presión de vapor y la presión de vapor de saturación que existe en cada punto intermedio de un cerramiento formado por diferentes capas, para las condiciones interiores y exteriores correspondientes al mes de enero.

Para que no se produzcan condensaciones intersticiales se debe comprobar que la presión de vapor en la superficie de cada capa es inferior a la presión de vapor de saturación.

El procedimiento utilizado para el cálculo de las condensaciones intersticiales se describe en el anejo 3.

3.2.1. Cálculo tomando como condiciones interiores las establecidas HE

Se ha realizado el cálculo tomando como condiciones interiores de cálculo las que se establecen en el DB HE “Ahorro de energía”, sección 1: “Demanda energética”.

Los resultados obtenidos son los que se muestran en la figura 2.

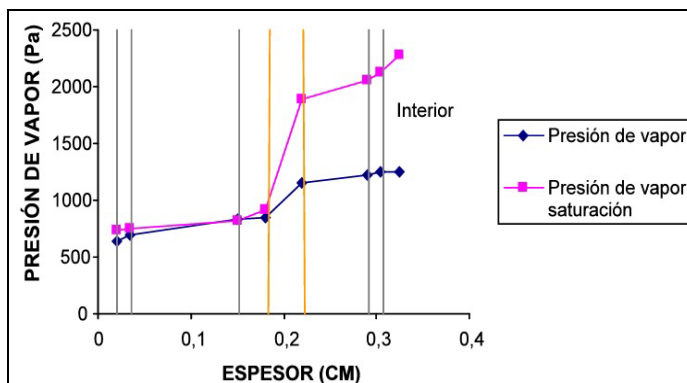


Figura 2. Humedad relativa interior 55%.

Cómo se observa en el gráfico se cruzan las gráficas en la hoja exterior de fábrica de ladrillo, lo que indica que **se formarían condensaciones** en la hoja exterior de fábrica de ladrillo perforado.

3.2.2. Cálculo tomando como condiciones interiores las establecidas en HS

A) Según procedimiento HE

Tomando como condiciones interiores de cálculo las que se establecen en el DB HS “Salubridad” los resultados que se obtienen se muestra en la figura 3.

Se puede observar que **no** se llegan a formar **condensaciones intersticiales**, ya que al realizar el cálculo con la humedad relativa interior obtenida a partir de los niveles de ventilación establecidos en HS, se reduce el riesgo de condensaciones, ya que la humedad relativa interior disminuye.

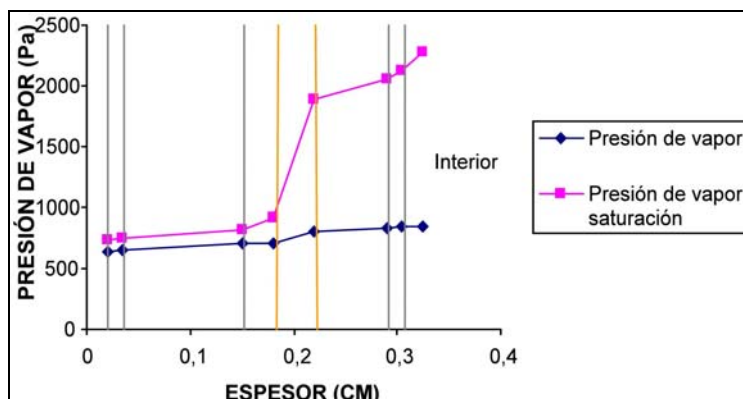


Figura 3. Humedad relativa interior 40%.

B) Según datos experimentales

Se ha realizado también la comprobación de condensaciones tomando como condiciones interiores de cálculo los datos experimentales en el que se llegan a considerar hipótesis de producción de humedad interior en espacios de viviendas, más desfavorables que las que se obtienen aplicando las renovaciones exigidas en el DB HS. Los resultados que se obtienen se muestran en la figura 4.

Se puede observar que **tampoco** se llegan a formar **condensaciones intersticiales** en ninguno de los casos estudiados, siendo lógico ya que la humedad relativa tomada para el cálculo sigue siendo menor que la que se fija en el DB HE en función de la higrometría del local.

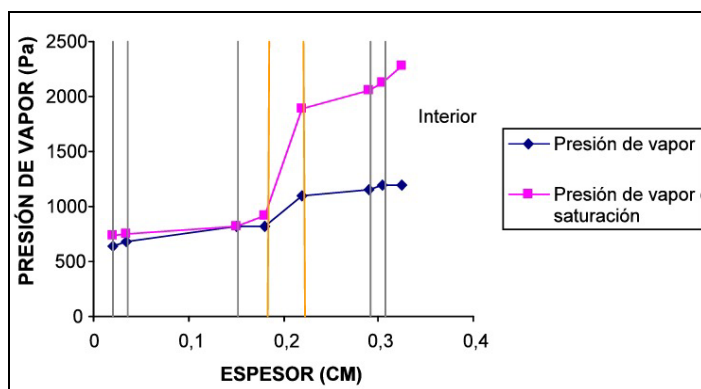


Figura 4. Humedad relativa interior 52%.

4. Solución alternativa: Sistema de caudal variable

La ventilación produce unas pérdidas energéticas evidentes que, si se pudieran minimizar supondrían un ahorro energético indudable. Cuanto mayor sea esta ventilación mayor serán las pérdidas energéticas, pero la ventilación viene obligada en el CTE como la forma de proporcionar la calidad de aire adecuada a los ocupantes. También la ventilación influye en la no producción de condensaciones.

El CTE en su parte I establece la posibilidad de utilizar otras “soluciones alternativas” no expuestas en los DBs siempre y cuando las prestaciones que proporcionen sean equivalentes a las obtenidas al aplicar las soluciones aceptadas en los mismos.

Por lo tanto, si se encontrara una solución de ventilación menor a la validada en el CTE para que conllevara implícita un ahorro energético, y que cumpliera con los niveles exigenciales, se podría aceptar como “solución alternativa”.

Los niveles exigenciales con respecto a las condensaciones están claros y se determinan en el DB HE. Sin embargo los niveles exigenciales de calidad del aire no se explicitan en el DB HS 3, sino que subyacen implícitos al establecerse unos determinados caudales de ventilación que se suponen garantizan la calidad del aire requerida en las exigencias básicas de la parte I del CTE.

En las reglamentaciones de otros países, como por ejemplo la francesa, la calidad del aire se mide según el incremento de la concentración de los contaminantes contenidos en él sobre un límite determinado y más específicamente según el número de ppmh anuales

acumulados de CO₂ sobre el límite de 2000 ppm, que se fija en 500.000 ppmh. (Véase figura 5). Este valor se convierte así en el parámetro medidor de la prestación, en la cuantificación de la exigencia de calidad de aire. Cualquier solución de ventilación que garantizara estos niveles exigenciales cumpliría el Código.

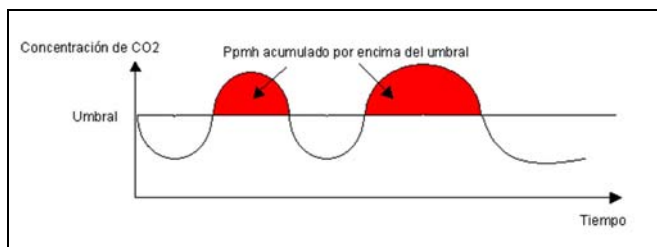


Figura 5. Incremento de concentración de contaminantes.

Aunque en el CTE no contamos con los valores límite de incremento de concentración de contaminantes podríamos estimarlos con la ventilación con la que sí contamos. A efectos de este análisis vamos a considerar los límites franceses.

Resumiendo, se analiza una “solución alternativa” que por un lado cumpla las exigencias del Código y que por otro suponga un ahorro energético. La “solución alternativa” estudiada es el sistema de ventilación por caudal variable, sistema que se adapta en cada momento a la necesidad real de ventilación porque es activado por una medición de la humedad presente en el ambiente interior, como elemento que acompaña a la presencia de CO₂.

Se estudian los cuatro casos siguientes:

- Según ventilación HS 3 (CTE) con uso de campana extractora 2 horas al día
- Según ventilación HS 3 (CTE) sin uso de la campana extractora
- Según ventilación reglamento francés, caudal autorregulable (reglamento de marzo 1982)
- Según ventilación reglamento francés, caudal higrorregulable variable (DIT del CSTB en curso)

Los caudales que se han tenido en cuenta para cada uno de los casos se detallan en el anejo 4.

Realizando el análisis de calidad de aire explicado anteriormente, el resultado es positivo, así como el de comprobación de las condensaciones. Lo que analizamos a continuación es el ahorro energético que puede proporcionar mediante el análisis de las pérdidas energéticas de cada uno de ellos.

Los resultados de pérdidas energéticas debidas a la ventilación y a la permeabilidad de la vivienda en kWh de energía primaria son los recogidos en la tabla 2.

SISTEMA DE VENTILACIÓN						
Según ventilación HS 3 (CTE) sin uso de la campana extractora	Según ventilación HS 3 (CTE) con uso de campana extractora 2 horas al día		Según ventilación reglamento francés, caudal autorregulable (reglamento de marzo 1982)		Según ventilación reglamento francés, caudal higrorregulable variable (DIT del CSTB en curso)	
valor	valor	% / CTE sin campana	valor	% / CTE sin campana	valor	% / CTE sin campana
4285 KWh	8483 KWh	+98%	3522 KWh	-18 %	2407KWh	-44%

Tabla 2. Pérdidas energéticas debidas a los sistemas de ventilación

Por lo que se deduce que el ahorro energético de un sistema de caudal variable con respecto a uno de caudal constante es aproximadamente del 30%.

Conclusiones

El cerramiento objeto de estudio cumple las exigencias relativas a demanda energética establecidas en el DB HE1 pero no cumple las exigencias relativas a condensaciones tomando como condiciones interiores de cálculo las establecidas en el mismo documento. Mediante las condiciones interiores que resultan de la aplicación del documento básico HS sí cumpliría la comprobación a condensaciones intersticiales, ya que los requerimientos de ventilación hacen que la humedad relativa interior baje, con lo que el riesgo de formación de condensaciones disminuye.

La aplicación de sistemas de ventilación de caudales variables en función de las necesidades del local, contribuyen a una instalación de ventilación más eficiente energéticamente y podrían ser validados como soluciones alternativas puesto que satisfacen el resto de exigencias: calidad del aire y condensaciones. Así mismo podría revisarse el DB HS 3 “Calidad del aire interior” para incorporar por un lado dicho sistema como una solución aceptada y por otro la cuantificación de las exigencias en forma de concentración acumulada de contaminantes anual (por encima de un umbral) que validara otras soluciones alternativas.

Anejo 1. Transmitancia térmica de cerramientos en contacto con el aire exterior

Este cálculo es aplicable a la parte opaca de todos los *cerramientos* en contacto con el aire exterior tales como muros de fachada, cubiertas y suelos en contacto con el aire exterior. De la misma forma se calcularán los puentes térmicos integrados en los citados cerramientos cuya superficie sea superior a 0,5 m², despreciándose en este caso los efectos multidimensionales del flujo de calor. La transmitancia térmica U (W/m²K) viene dada por la siguiente expresión:

$$U = \frac{1}{R_T}$$

siendo

R_T la resistencia térmica total del componente constructivo [m² K/ W], que se calcula mediante la expresión:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$$

siendo

R_{si} y R_{se} las resistencias térmicas superficiales correspondientes al aire interior y exterior respectivamente, tomadas de la tabla 3 de acuerdo a la posición del cerramiento, dirección del flujo de calor y su situación en el edificio [m² K/W].

$R_1, R_2 \dots R_n$ las resistencias térmicas de cada capa que, cuando es una cámara de aire, se obtiene de la tabla 4 en función de su espesor (los valores intermedios se pueden obtener por interpolación lineal) y, cuando son otros componentes térmicamente homogéneos, vienen definidas por la expresión:

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

siendo

e el espesor de la capa [m]

λ la conductividad térmica de diseño del material que compone la capa

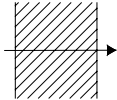
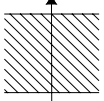
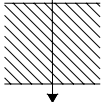
Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor		Rse	Rsi
Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal >60° y flujo horizontal		0,04	0,13
Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal ≤60° y flujo ascendente		0,04	0,10
Cerramientos horizontales y flujo descendente		0,04	0,17

Tabla 3. Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior en m²K/W

e (cm)	Sin ventilar	
	horizontal	vertical
1	0,15	0,15
2	0,16	0,17
5	0,16	0,18

Tabla 4. Resistencias térmicas de cámaras de aire en m² K/W

Anejo 2. Procedimiento de cálculo de condensaciones superficiales

El **factor de temperatura de la superficie interior** f_{Rsi} se calculará a partir de la transmitancia térmica del cerramiento mediante la siguiente ecuación:

$$f_{Rsi} = 1 - U \cdot 0,25$$

siendo

U la transmitancia térmica del *cerramiento* calculada por el procedimiento descrito en el anejo 1 [W/m^2K].

El **factor de temperatura de la superficie interior mínimo** $f_{Rsi,min}$ se podrá calcular a partir de la siguiente expresión:

$$f_{Rsi,min} = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{20 - \theta_e}$$

siendo

θ_e la temperatura exterior de la localidad en el mes de enero [$^{\circ}C$];

$\theta_{si,min}$ la temperatura superficial interior mínima aceptable obtenida de la siguiente expresión [$^{\circ}C$]:

$$\theta_{si,min} = \frac{237.3 \log_e \left(\frac{Psat}{610.5} \right)}{17.269 - \log_e \left(\frac{Psat}{610.5} \right)}$$

donde

P_{sat} es la presión de saturación máxima aceptable en la superficie obtenida de la siguiente expresión [Pa]:

$$Psat = \frac{P_i}{0.8}$$

donde

P_i es la presión del vapor interior obtenida de la siguiente expresión [Pa].

$$P_i = \phi_i \cdot 2337$$

donde

ϕ_i es la humedad relativa interior [en tanto por 1].

Anejo 3. Procedimiento de cálculo de condensaciones intersticiales

Distribución de la temperatura

La distribución de temperaturas a lo largo del espesor de un cerramiento formado por varias capas depende de las temperaturas del aire a ambos lados de la misma, así como de las resistencias térmicas superficiales interior R_{si} y exterior R_{se} , y de las resistencias térmicas de cada capa ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$).

El procedimiento a seguir para el cálculo de la distribución de temperaturas es el siguiente:

A) cálculo de la resistencia térmica total del elemento constructivo.

B) cálculo de la temperatura superficial exterior θ_{se} :

$$\theta_{se} = \theta_e + \frac{R_{se}}{R_T} \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

C) cálculo de la temperatura en cada una de las capas que componen el elemento constructivo:

$$\theta_n = \theta_{n-1} + \frac{R_n}{R_T} \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

D) cálculo de la temperatura superficial interior θ_{si} :

$$\theta_{si} = \theta_n + \frac{R_{si}}{R_T} \cdot (\theta_i - \theta_e)$$

Se considera que la distribución de temperaturas en cada capa es lineal.

Distribución de la presión de vapor de saturación

Se determinará la distribución de la presión de vapor de saturación a lo largo de un muro formado por varias capas, a partir de la distribución de temperaturas obtenida anteriormente, mediante la siguiente expresión:

$$P_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}}$$

Distribución de la presión de vapor

La distribución de presión de vapor a través del cerramiento se calculará:

$$P_n = P_{n-1} + \frac{e_n \cdot r_{vn}}{R_{vT}} \cdot (P_i - P_e)$$

Para el cálculo analítico de P_i y de P_e , en función de la temperatura y de la humedad relativa, se utilizará la siguiente expresión:

$$P_i = \phi_i \cdot P_{sat}(\theta_i)$$

$$P_e = \phi_e \cdot P_{sat}(\theta_e)$$

Anejo 4

1 Requerimientos de ventilación en HS 3

El caudal de ventilación mínimo para proporcionar la ventilación adecuada a los *locales* se obtiene en la tabla 5 de acuerdo con los criterios que figuran a continuación.

El número de ocupantes se considerará igual,

en cada dormitorio individual, a uno y, en cada doble, a dos;

en cada comedor y en cada sala de estar, a la suma de los contabilizados para todos los dormitorios de la vivienda correspondiente.

En los *locales* de las viviendas destinados a varios usos se considerará el caudal correspondiente al uso que exija un caudal mayor.

	Caudal de ventilación mínimo exigido q_v en l/s		
	Por persona	Por m ² útil	En función de otros parámetros
Dormitorios de viviendas	5		
Salas de estar y comedores de viviendas	3		
Aseos y cuartos de baño de viviendas			15 por <i>local</i>
Cocinas de viviendas		2 ⁽¹⁾	50 por <i>local</i> ⁽²⁾

⁽¹⁾ En las cocinas con sistema de cocción por combustión o dotadas de calderas no estancas este caudal se incrementará en 8 l/s.

⁽²⁾ Este es el caudal correspondiente a la ventilación adicional de la cocina.

Tabla 5. Caudales de ventilación mínimos exigidos

En las cocinas con sistema de cocción por combustión o dotadas de calderas no estancas este caudal se incrementará en 8 l/s.

Este es el caudal correspondiente a la ventilación adicional de la cocina.

2 Cálculo de la humedad relativa para el caso estudio con la ventilación establecida en HS 3 y según el método de HE 1

Para calcular la humedad relativa primero se calcula el incremento de presión de vapor Δp :

$$\Delta p = \frac{\Delta V \cdot R_v \cdot (T_i + T_e)}{2} = 274,25 \text{ Pa}$$

donde:

ΔV es el exceso de humedad interior obtenida mediante la fórmula siguiente [kg/m³]:

$$\Delta V = \frac{G}{n \cdot V} = 0,0020$$

G es el ritmo de producción de la humedad interior que es de 0,36 Kg/h;

n es el número de renovaciones de aire por hora que, al aplicar el apartado anterior se obtiene un caudal de 46 l/s que equivale, para un volumen de 172,5 m³, a aproximadamente 1 renovación por hora;

V es el volumen de la vivienda que es de 172,5 m³;

R_v es la constante de gas para el agua que es 462 Pa m³/(K·Kg);

T_i es la temperatura interior en grados Kelvin, 20 °C = 293,15 K;

T_e es la temperatura exterior en grados Kelvin, 2,6 °C = 275,75 K.

Después se calcula la presión de vapor interior:

$$P_i = P_e + \Delta p = 633,09 + 274,25 = 907,34 \text{ Pa}$$

donde:

P_e es la presión de vapor exterior [Pa].

Por último, es necesario conocer la presión de saturación correspondiente a la temperatura interior obtenida con la siguiente expresión:

$$P_{\text{sat}} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} = 2284,31 \text{ Pa}$$

Conociendo P_i y P_{sat} :

$$\phi_i = \frac{100 \cdot P_i}{P_{\text{sat}}(\theta_{si})} = 40\%$$

Anejo 5

Según ventilación HS 3 (CTE) con uso de campana extractora 2 horas al día

- 1 abertura de admisión en salón-comedor de 12 l/s bajo 10 Pa
- 1 abertura de admisión en dormitorio doble de 10 l/s bajo 10 Pa
- 2 aberturas de admisión en dormitorios simples de 5 l/s bajo 10 Pa
- 1 abertura de extracción en cocina de 16 l/s
- 2 aberturas de extracción en baños de 15 l/s
- 1 campana extractora con un caudal punta de 50 l/s

- Caudal de admisión total bajo 10 Pa: 32 l/s
- Caudales extraídos: 46/96 l/s

Según ventilación HS 3 (CTE) sin uso de la campana extractora

- 1 abertura de admisión en salón-comedor de 12 l/s bajo 10 Pa
- 1 abertura de admisión en dormitorio doble de 10 l/s bajo 10 Pa
- 2 aberturas de admisión en dormitorios simples de 5 l/s bajo 10 Pa
- 1 abertura de extracción en cocina de 16 l/s
- 2 aberturas de extracción en baños de 15 l/s

- Caudal de admisión total bajo 10 Pa: 32 l/s
- Caudales extraídos: 46 l/s

Según ventilación reglamento francés, caudal autorregulable (reglamento de marzo 1982)

- 2 aberturas de admisión en salón-comedor de 6,11 l/s bajo 20 Pa
- 3 aberturas de admisión en dormitorios de 8,33 l/s bajo 20 Pa
- 1 abertura de extracción en cocina de 12,5/33,3 l/s
- 2 aberturas de extracción en baños de 8,33 l/s

- Caudal de admisión total bajo 20 Pa: 50 l/s
- Caudales extraídos: 29,16/50 l/s

Según ventilación reglamento francés, caudal higrorregulable variable (DIT del CSTB en curso)

- 1 abertura de admisión higrorregulable en salón-comedor y dormitorios de 1,38 a 8,33 l/s
- 1 abertura de extracción higrorregulable en cocina de 2,77 a 15,27 l/s para una humedad relativa de 20 a 65%, caudal de punta temporizado de 37,5 l/s
- 2 aberturas de extracción higrorregulables en baños de 1,38 a 13,8 l/s para una humedad relativa de 31 a 76%

- Caudal de admisión total bajo 20 Pa: 19,88 l/s
- Caudal extraído resultante: 19 l/s
- Caudal máximo extraído: 43 l/s

Referencias bibliográficas

- Documento Básico de "Ahorro energético", sección "Demanda energética" HE 1. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de vivienda.
- Documento Básico de "Salubridad", sección "Protección frente a la humedad" HS 1. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de vivienda.
- Documento Básico de "Salubridad", sección "Calidad del aire interior" HS 3. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de vivienda.
- Norma Básica de Edificación, Condiciones Térmicas en los Edificios, NBE-CT 79. Dirección General para la Vivienda y Arquitectura. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
- H.M. Kunzel, D.Zirkelbach & K. Sedlbauer. "*Predicting indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope*". Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, Germany. 1st International Conference on sustainable energy and green architecture.
- Michael Aoki-Kramer - RDH Building Sciences Inc. "*A new look at residential interior environment loads*". Achilles N. Karagiotis - Oak Ridge National Laboratory.
- Andreas Holm, Hartwig M. Kuenzel and Klaus Sedlbauer. "*The higrrothermal behavior of rooms: combining thermal building simulation and hygrothermal envelope calculation*". Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, Germany.
- Heinz R. Trechsel. "*Moisture control in buildings*". ASTM Manual Series.