



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

Autor: Eduardo José Garcilópez Gracia

Director: Luis Miguel Romeo Giménez

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

Curso 2009/2010
20 de Noviembre de 2010

Anexos 2/2



6. Anexo A: Nomenclatura

Símbolo	Unidades	Designación
n_{50}	ren/h	número de veces por hora que el volumen total del recinto se cambia cuando este se somete a una diferencia de presión de 50 Pascal
n_{CTE}	ren/h	Tasa de ventilación mínima establecido por el CTE
n_i	ren/h	Tasa de infiltración media anual en función de la presión ejercida por el viento
Q_s	kJ/h	Carga térmica sensible por ventilación o infiltración
Q_l	kJ/h	Carga térmica latente por ventilación o infiltración
Vol	m^3	Volumen de aire interior del recinto a analizar
V	m^3/h	Caudal de aire infiltrado o de ventilación
$C_{p_{aire}}$	kJ/kg K	Calor específico del aire
ρ	kg/m ³	Densidad del aire (20°C y H.R.=50%)
ΔT	K	Diferencia de temperatura entre el exterior y el interior
T_{int}^a	K	Temperatura del aire interior del recinto
T_{ext}^a	K	Temperatura del aire exterior del recinto
ΔX	kg _{agua} / kg _{aire húm.}	Diferencia de humedades específicas interior y exterior
X_{ext}	kg _{agua} / kg _{aire húm.}	Humedades específica exterior
X_{int}	kg _{agua} / kg _{aire húm.}	Humedades específica interior
$P_{p\ H_2O}$	Pa	Presión de vapor de agua en un momento dado
P_{sat}	Pa	Presión de v. a. cuando el aire está saturado de humedad
ϕ	%	Humedad relativa
h_{fg}	kJ/kg	Entalpía de vaporización del agua

7. Anexo B: Cálculo del caudal de ventilación mínimo exigido por el CTE

El caudal de ventilación mínimo para los locales se obtiene en la Tabla 2.1 del Apartado 2 del CTE Sección HS 3 Calidad del aire interior [30]. (Ver **Tabla 11**)

Tabla 2.1 Caudales de ventilación mínimos exigidos

		Caudal de ventilación mínimo exigido q_v en l/s		
		Por ocupante	Por m ² útil	En función de otros parámetros
Locales	Dormitorios	5		
	Salas de estar y comedores	3		
	Aseos y cuartos de baño			15 por local
	Cocinas		2	50 por local ⁽¹⁾
	Trasteros y sus zonas comunes		0,7	
	Aparcamientos y garajes			120 por plaza
	Almacenes de residuos		10	

⁽¹⁾ Este es el caudal correspondiente a la ventilación adicional específica de la cocina (véase el párrafo 3 del apartado 3.1.1).

Tabla 11 - Caudales de ventilación mínimos exigidos

Teniendo en cuenta que nuestro edificio comparte zonas secas con zonas húmedas al poseer una única estancia diáfana de aproximadamente 75 m², los cálculos que determinan el caudal de ventilación mínimo exigido son los siguientes:

Zonas secas:

Dormitorios → 5 l/s x 4 pers. = 20 l/s
 Salas de estar → 3 l/s x 4 pers. = 12 l/s TOTAL = 32 l/s

Zonas húmedas:

Cocina → 2 l/s x 75 m² = 150 l/s
 Baños → 15 l/s TOTAL = 165 l/s

Nos quedamos con el mayor de ellos, que en este caso será el caudal de extracción de las zonas húmedas:

$$165 \text{ l/s} \cdot 3.6 = 594 \text{ m}^3/\text{h}$$

Dividiendo entre el volumen de nuestro edificio $594 \text{ m}^3/\text{h} / 225 \text{ m}^3 = \mathbf{2.64 \text{ ren/h}}$

Como podemos apreciar es un caudal casi 5 veces superior a las **0.6 ren/h** (Passivhaus) que hemos establecido como adecuado, lo que nos hace ver la incompatibilidad que tiene este documento (CTE) con el concepto de ahorro energético.

8. Anexo C: Parámetros a introducir y resultados devueltos por el software TECTITE EXPRESS

Los parámetros que se deben introducir para que el software pueda llevar a cabo su trabajo y devolver una serie de datos, que servirán para evaluar la hermeticidad al aire del recinto, son los siguientes:

- *Building test info*: Introducción de una serie de datos como fecha, nombre del archivo, dirección, ciudad, año de construcción del edificio, volumen, superficie...
- *Comments*: comentarios del despacho
- Test settings: ajustes del ensayo
 - norma EN 13829
 - despresurización (o despresurización)
 - Elección y opción de editar el rango de presiones. En este caso el rango de presión será de 70 a 25 Pa, en intervalos de 5 Pa, incluyendo así el valor de 50 Pa que es el necesario para identificar el n 50 que dice la norma. n_{50} = flujo de aire m³/h a 50 Pa/volumen.
- Elección de Método
 - **A**: la condición de la envolvente de un edificio debería representar su condición durante la temporada en la que se usa el sistema de calefacción o de frío.
 - **B**: cualquier abertura intencionada realizada en la envolvente del edificio debe de ser cerrada o sellada. El edificio está construido herméticamente. (sin necesidad de sellar, ya que no existe sistema de refrigeración ni componentes por los que se infiltre el aire).

- Elección de la velocidad del viento, según la escala de Beaufort (si $v > 6 \text{ m/s}$ el ensayo no será válido). (ver **Tabla 12**)

Número de Beaufort	Nombre	Velocidad del viento m/s	Descripción
0	calma	menos de 0,45	calma; el humo se desplaza verticalmente
1	aire ligero	desde 0,45 a 1,34	la dirección del viento es mostrada por el humo, pero no por las veletas
2	brisa ligera	de 1,8 a 3,1	el viento da en la cara, susurro de hojas, la veleta corriente, se mueve por el viento
3	brisa suave	de 3,6 a 5,4	hojas y pequeñas ramas, en constante movimiento; el viento despliega una bandera ligera
4	brisa moderada	de 5,8 a 8	alcanza el polvo y el papel perdido; pequeñas ramas son movidas
5	brisa fresca	de 8,5 a 10,7	pequeños árboles con hoja que empieza a balancearse; pequeñas olas con cresta en charcas o balsas de agua
6	brisa fuerte	de 11,2 a 13,9	grandes ramas en movimiento; cables de teléfono silbando; los paraguas se usan con dificultad
7	vendaval moderado	de 14,3 a 17	el conjunto de los árboles, en movimiento; dificultad al caminar contra el viento
8	vendaval fuerte	de 17,4 a 20,6	rotura de pequeñas ramas de los árboles; generalmente impide la continuación de actividades

Tabla 12 - Escala Beaufort viento

- Cálculo de presión, flujo y renovaciones.
 - Los cálculos se realizan en el rango de 70 a 25 Pa, calculando los flujos de aire para cada presión.
 - Petición de la línea base 1. Cubrimos con la funda el ventilador para que fije una presión de referencia en torno a 0. Si es mayor que 5 el ensayo no es válido.
 - Prosiguen los cálculos
 - Petición de línea base 2.
- Finaliza el proceso de obtención de resultados.

El programa devuelve un informe como el que puede verse mas abajo (ver **Figura 11**), en el que aparecen los valores que han sido obtenidos permitiendo hacer una valoración y cuantificación de la hermeticidad al aire del edificio.

Date of Test: 19/05/2010		Technician: Eduardo Edurne Cris	
Test File: 2 TEST DESPACHO INTERIOR PRESURIZACION			
Customer:	CIRCE EUITIZ MARIA DE LUNA S/N ZARAGOZA, ZARAGOZA 50018 Phone: Fax:	Building Address:	EDIFICIO CIRCE MARIA DE LUNA S/N ZARAGOZA, ZARAGOZA 50018

Test Results at 50 Pascals:			
V50: Airflow (m³/h)	237	(+/- 0.3 %)	
n50: Air Changes per Hour (1/h)	3.17		
w50: m³/(h*m² Floor Area)	9.68		
q50: m³/(h*m² Surface Area)	2.78		

Leakage Areas:	92.0 cm² (+/- 1.9 %) Canadian EqLA @ 10 Pa or 1.08 cm²/m² Surface Area 48.7 cm² (+/- 2.9 %) LBL ELA @ 4 Pa or 0.57 cm²/m² Surface Area		
-----------------------	---	--	--

Building Leakage Curve:	Air Flow Coefficient (Cenv) = 18.2 (+/- 4.5 %) Air Leakage Coefficient (CL) = 18.2 (+/- 4.5 %) Exponent (n) = 0.655 (+/- 0.011) Correlation Coefficient = 0.99881		
--------------------------------	---	--	--

Test Standard:	EN 13829	Test Mode:	Pressurization
Type of Test Method:	B	Regulation complied with:	UNE EN 13829
Equipment:	Model 4 (230V) Minneapolis Blower Door		

Inside Temperature:	18 °C	Volume:	75 m³
Outside Temperature:	18 °C	Surface Area:	85 m²
Barometric Pressure:	101325 Pa	Floor Area:	24 m²
Wind Class:	4 Moderate Breeze	Uncertainty of	
Building Wind Exposure:	Highly Exposed Building	Building Dimensions:	5 %
Type of Heating:	SUELO RADIANTE	Year of Construction:	2008
Type of Air Conditioning:	SIN AIRE ACONDICIONADO		
Type of Ventilation:	NATURAL		

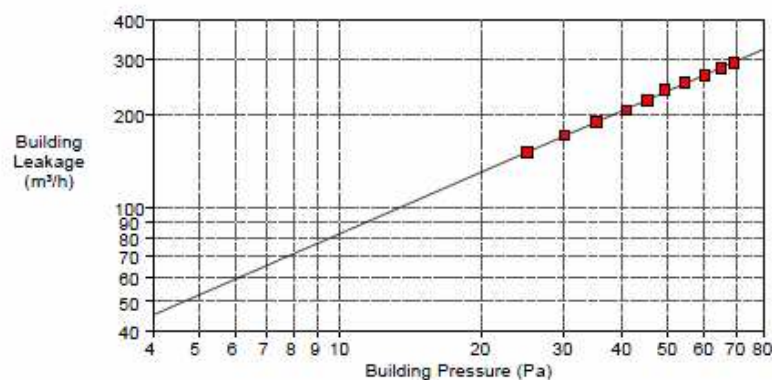


Figura 11 – Resultados test Blower Door

9. Anexo D: Cálculo de las demandas de climatización. Tasa de infiltración: caudal mínimo de ventilación establecido por el CTE

Mediante el cálculo de la demanda asociada a la ventilación, para una tasa de infiltración de aire a través de la envolvente igual al caudal mínimo de ventilación establecido por el CTE, 2,64 ren/h (cuyo valor puede verse en los cálculos llevados a cabo en el Anexo B), se obtiene la energía necesaria para mantener nuestro edificio entre unas temperaturas de confort (20-25°C) y con una humedad relativa moderada (50%) durante todo el año.

9.1 Cálculo de las demandas por calor sensible

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

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

Donde:

Q_s (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 n° 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).

Teniendo el caudal de aire en m³/h (detallado en el **Anexo B**) 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 a continuación:

$$\frac{kWh}{m^2} = kW \times horas_de_funcionamiento \times \frac{1}{m^2\ superficie}$$

Para ello se necesita conocer las horas de funcionamiento de los equipos de climatización en cada mes; por un lado las horas que se pone en marcha la refrigeración (al pasar de 25°C) y por otro lado las que opera la calefacción (al disminuir de 20°C). Tomando un horario de operación de los equipos de las 24 horas diarias cubriendo así la máxima ocupación. (Ver **Tabla 14**)

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

9.2 Cálculo de las demandas por calor latente

Este calor se calcula de la siguiente forma:

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

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 n° 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, **$2.45 \cdot 10^3$ 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:

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

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 [27]. 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 15 - P_{sat} interior y exterior (T^a)

Teniendo las humedades relativas (φ) tanto interiores como exteriores de cada mes, y teniendo las Psat (T^a), ya se puede calcular las Pp_{H2O} (Ver **Tabla 16**).

	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 16 – 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:

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

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

	X_{int} {kg agua/kg aire}	X_{ext} {kg agua/kg aire}	$ X_{ext} - X_{int} $
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 17 – Humedad específica (kg agua/kg aire)

Con estos datos ya se pueden obtener las pérdidas por calor latente a partir de la fórmula vista anteriormente. Una vez calculadas como potencia en kJ/h, se expresan en unidades de energía (kWh/m²) mediante la conversión del apartado anterior. Para ello se necesita conocer las horas de funcionamiento de los equipos de climatización en cada mes; por un lado las horas que se pone en marcha la refrigeración (al disminuir del 50% la humedad interior) y por otro lado las horas que opera la calefacción (al pasar del 50% la humedad interior). Tomando un horario de operación de los equipos de las 24 horas diarias cubriendo así la máxima ocupación. (Ver **Tabla 18**)

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 18 - Demandas por calor latente

9.3 Demanda de calefacción

La carga en el interior del local se debida a la **ventilación** implica una pérdida de **calor sensible** (por la menor temperatura del aire exterior con respecto a la temperatura de confort interior. La demanda de calefacción calculada, asociada a dicha ventilación, es la siguiente:

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

9.4 Demanda de refrigeración

Como se ha comentado anteriormente, aquí solo se tendrá en cuenta la demanda de refrigeración debida a esa **ventilación** de la vivienda, la cual supone tanto unas ganancias de **calor sensible** como unas perdidas de **calor latente** (siendo el aire exterior mas caliente y menos húmedo que el aire del interior del recinto).

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

10. Anexo E: Cálculo de las demandas de climatización. Tasa de infiltración: la establecida para una Passivhaus

Mediante el cálculo de la demanda asociada a la ventilación, para una tasa de infiltración de aire a través de la envolvente de 0.6 ren/h a 50 Pa (Passivhaus) se obtiene la energía necesaria para mantener nuestro edificio entre unas temperaturas de confort (20-25°C) y con una humedad relativa moderada (50%) durante todo el año.

10.1 Cálculo de las demandas por calor sensible

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

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

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 n° 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 (ren/h) y así el caudal de este (m³/h) en cada uno de los meses se necesitan las velocidades medias mensuales y una función como la de la curva representada en la **Figura 12** que relacione la diferencia de presión

entre el exterior y el interior del edificio con la velocidad del viento, obteniendo las presiones (ver **Tabla 19**) que se están ejerciendo en la envolvente a lo largo del año.

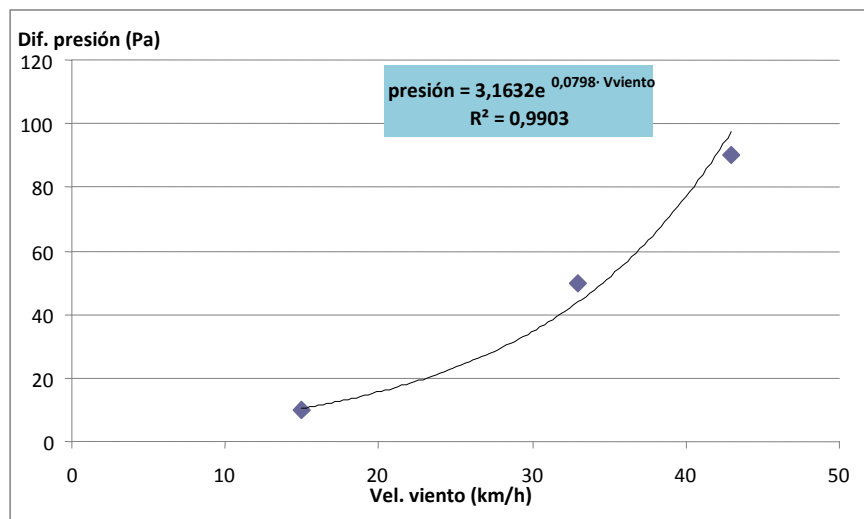


Figura 12 - Curva Velocidad del viento (km/h) / Presion (Pa)

Mes	Vviento (Km./h)	Presión (Pa)	Ren. (1/h)	Caudal (m3/h)
Enero	7.6	5.8	0.07	15.66
Febrero	9.21	6.6	0.08	17.81
Marzo	8.17	6.07	0.07	16.39
Abril	14.7	10.22	0.12	27.60
Mayo	6.84	5.46	0.07	14.74
Junio	6.7	5.4	0.06	14.58
Julio	9.16	6.57	0.08	17.74
Agosto	8.4	6.18	0.07	16.70
Septiembre	6.99	5.53	0.07	14.92
Octubre	6.92	5.49	0.07	14.84
Noviembre	11.41	7.86	0.09	21.23
Diciembre	8.51	6.24	0.07	16.84

Tabla 19 – Velocidad viento, presiones, tasa de infiltración y caudal de aire infiltrado

Teniendo el caudal de aire (m3/h) ya se pueden obtener las pérdidas por calor sensible a partir de la fórmula vista anteriormente. Una vez calculadas como potencia en kJ/h, se expresan en unidades de energía (kWh/m2) mediante la conversión que aparece a continuación:

$$\frac{kWh}{m^2} = kW \times horas_de_funcionamiento \times \frac{1}{m^2\ superficie}$$

Para ello se necesita conocer las horas de funcionamiento de los equipos de climatización en cada mes; por un lado las horas que se pone en marcha la refrigeración (al pasar de 25°C) y por otro lado las que opera la calefacción (al disminuir de 20°C). Tomando un horario de operación de los equipos de las 24 horas diarias cubriendo así la máxima ocupación. (Ver **Tabla 20**)

Mes	Demanda Qs {kW}		Horas funcionamiento	Demanda Qs {kWh/m2}	
	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

10.2 Cálculo de las demandas por calor latente

Este calor se calcula de la siguiente forma:

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

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, **$2.45 \cdot 10^3$ 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 19**.

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

$$\phi \text{ (humedad relativa)} = \frac{P_{p_{H_2O}}}{P_{sat}(T_a)}$$

Si $\phi = 50\% \rightarrow P_{p_{H_2O}} = 0.5 \times P_{sat}(T^a)$ [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 [27]. Ver **Tabla 21**.

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

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 21 - Psat interior y exterior (T^a)

Teniendo las humedades relativas (ϕ) tanto interiores como exteriores de cada mes, y teniendo las $P_{sat}(T^a)$, ya se puede calcular las $P_{p_{H_2O}}$ (Ver **Tabla 22**).

	Hum rel int { % }	Hum rel ext { % }	Pp H ₂ O int { Pa }	Pp H ₂ O 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 22 – Pp H₂O interior y exterior (Pa)

Conociendo las siguientes formulas se lleva a cabo el cálculo de la humedad específica (ver **Tabla 23**).

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

Con lo que la humedad específica queda:

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

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

	X _{int} {kg agua/kg aire}	X _{ext} {kg agua/kg aire}	X _{ext} - X _{int}
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 23 – Humedad específica (kg agua/kg aire)

Con estos datos ya se pueden obtener las pérdidas por calor latente a partir de la fórmula vista anteriormente. Una vez calculadas como potencia en kJ/h, se expresan en unidades de energía (kWh/m²) mediante la conversión del apartado anterior. Para ello se necesita conocer las horas de funcionamiento de los equipos de climatización en cada mes; por un lado las horas que se pone en marcha la refrigeración (al disminuir del 50% la humedad interior) y por otro lado las horas que opera la calefacción (al pasar del 50% la humedad interior). Tomando un horario de operación de los equipos de las 24 horas diarias cubriendo así la máxima ocupación. (Ver **Tabla 24**)

Mes	Demanda Qlat {kW}		Horas funcionamiento	Demanda Qlat {kWh/m ² }	
	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	6960	1,88	2,39

Tabla 24 - Demandas por calor latente

10.3 Demanda de calefacción

La carga en el interior del local se debida a la **ventilación** implica una pérdida de **calor sensible** (por la menor temperatura del aire exterior con respecto a la temperatura de confort interior. La demanda de calefacción calculada, asociada a dicha ventilación, es la siguiente:

$$Q_{\text{calefacción}} = Q_{\text{sensible}} = 3.012 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$$

10.4 Demanda de refrigeración

Como se ha comentado anteriormente, aquí solo se tendrá en cuenta la demanda de refrigeración debida a esa **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).

$$Q_{\text{refrigeración}} = Q_{\text{sensible}} = 0.187 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$$

11. Anexo F: Cálculo de las demandas de calefacción con la incorporación de un recuperador de calor

11.1 Fabricantes

Tipo	Fabricante	Modelo	Caudal (m ³ /h)	Potencia (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

11.2 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.

11.3 Simulación del Comportamiento Energético en el transcurso de un año

Para ello, asumimos que el horario de ocupación de la vivienda son las 24 horas diarias lo que involucraría la necesidad de operación del sistema de calefacción durante todo el día (igual que en cálculos anteriores para poder comparar).

Independientemente de la temperatura extrema que pueda darse en el mes analizado, se han considerado unas temperaturas que representarían, aproximadamente, las temperaturas promedio del mes en cuestión a efectos de cálculo.

Para llevar a cabo el cálculo de dicha demanda de calefacción con la incorporación de un recuperador de calor se siguen los mismos pasos que en los cálculos anteriores, con la única diferencia de que ahora la temperatura del aire de entrada procedente del exterior será algo mayor gracias a dicha recuperación de calor.

Las nuevas temperaturas de entrada a la vivienda y de evacuación al exterior las obtenemos mediante la eficiencia de dicho equipo, que es la que nos dice hasta que punto se realiza la recuperación de calor, así pues:

$$\eta = E^a \text{ recuperada} / E^a \text{ máxima} \approx (T_{\text{extracción}} - T_{\text{impulsión}}) / (T_{\text{extracción}} - T_{\text{admisión}})$$

Con esta formula se pueden calcular dichas temperaturas, ya que se tienen el incremento de temperatura total y la eficiencia, obteniendo el nuevo incremento de temperatura que debe realizar el equipo de calefacción, que como es de imaginar, será bastante más pequeño que el inicial (sin recuperador de calor). Ver **Tabla 26**.

	$T_{\text{extracción}}(^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{admisión}}(^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{impulsión}}(^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{extracción}} - T_{\text{impulsión}}(^{\circ}\text{C})$
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 - Incremento temperatura con recuperador de calor

Seguidamente solo queda aplicar las dos formulas que se muestran a continuación para obtener la demanda que se esta buscando (igual que en los cálculos de los demás apartados):

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

$$\frac{kWh}{m^2} = kW \times horas_de_funcionamiento \times \frac{1}{m^2 \ superficie}$$

Obteniendo los resultados que aparecen en la **Tabla 27**, los cuales ya se pueden comparar con las demandas sin recuperador de calor.

	T_{ext}-T_{imp} (°C)	Horas	Caudal (m3/h)	Qs {kW}	Qs {kWh/m2}
Enero	6.92	744	594	1.15	11.440
Febrero	6.28	672	594	1.05	9.375
Marzo	5.03	744	594	0.84	8.311
Octubre	3.17	384	594	0.53	2.702
Noviembre	5.30	720	594	0.88	8.473
Diciembre	6.80	744	594	1.13	11.239
				TOTAL	51.541

Tabla 27 - Demandas calefacción con recuperador de calor