

Transmisión del Calor

Acondicionamiento térmico de interiores

S. Gil

Energía y Medio Ambiente - UNSAM

14-marzo-2024

En este capítulo hacemos una revisión de los principales mecanismos de transmisión de calor, y utilizamos estos conceptos para estimar las pérdidas o ganancias de calor de una vivienda. Estos conceptos los utilizamos seguidamente para poder calcular la necesidad de calefacción y refrigeración (acondicionamiento térmico) de interiores. Así, esperamos que al estudiar este capítulo el estudiante esté capacitado para calcular los consumos de acondicionamiento térmico de una vivienda en diversas regiones bioambientales.

El calor se transfiere básicamente por tres procesos distintos; *conducción*, *convección* y *radiación*. En la naturaleza, todos los mecanismos de transmisión intervienen simultáneamente con distintos grados de importancia. Desde luego, diseñando los experimentos adecuadamente, es posible lograr que sólo uno de ellos predomine y así estudiarlo aisladamente para comprenderlo mejor.

1. Conducción del Calor

Cuando se coloca una cucharita en una taza de café caliente, notamos que pronto el extremo frío se calienta. Esta observación muestra que el calor *se conduce* a través de la cucharita. La propagación del calor a través de la conducción se caracteriza por:

- ✓ La existencia un *medio material* a través del cual se propaga el calor (cucharita).
- ✓ El calor se transmite el calor *sin transporte de materia*. (no hay nada que le parece suceder a la cucharita).

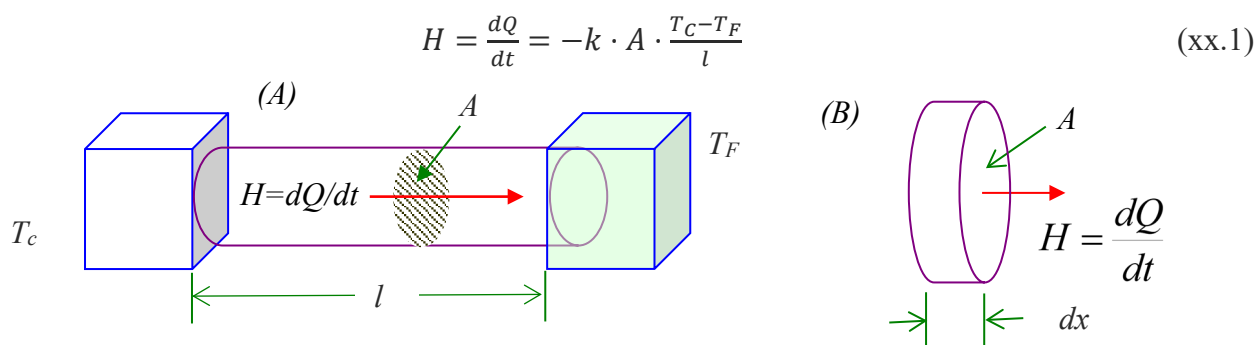


Figura xx.1. (A) Transmisión del calor a lo largo de una barra de materia, aislada por los lados laterales, de longitud l con un extremo caliente (T_C) y el otro frío (T_F). (B) Transmisión de calor a través de un elemento de materia de espesor infinitesimal dx .

La conducción del calor en muchos materiales puede comprenderse como resultado de los choques moleculares, en el caso de líquidos y gases; o el movimiento de electrones o vibraciones de la red cristalina, en el caso de los sólidos, ninguno de estos fenómenos pueden percibirse a simple vista. Al chocar las moléculas calientes (más rápidas) con sus vecinas frías (más lentas) les transfieren algo de su energía, y la velocidad de éstas aumenta. Así, la energía térmica, asociada

al movimiento microscópico de moléculas, átomos o electrones, se propaga sin transporte de masa, este es el mecanismo de conducción. En el caso de los sólidos, el movimiento de los electrones o las vibraciones de la red cristalina (movimiento de fonones) se propaga de un punto a otro por conducción.

Como consecuencia del segundo principio de la termodinámica, el calor siempre se propaga de la zona caliente a la zona fría. El flujo de calor, dQ/dt , es decir el calor que fluye por una barra de material de área transversal A en la unidad de tiempo, es proporcional a la diferencia de temperatura de sus extremos ($T_C - T_F$), al área transversal A e inversamente proporcional a la longitud l de la barra, es decir [1], [2], [3]:

donde k una constante de proporcionalidad, llamada conductividad térmica y es característica del material (Ver Fig. 1). En general el subíndice F lo usaremos para designar el extremo frío y C para designar el extremo caliente, lógicamente $T_c > T_F$.

Material	Cond. Térmica k	Calor Específico c .	Densidad ρ
	W/K.m	J/kg.K (25 °C)	kg/m ³ (25 °C)
Aire	0,023	1,01	1,3
Acero inoxidable	17,0	460	7.900
Agua	0,580	4.186	1.000
Hielo	2,20	2.090	917
Corcho	0,040	1.880	120
Diamante	2.300	509	3.513
EPS 15 kg/m ³	0,037	1.210	15,0
Fibra de vidrio	0,032-0,04	795	220
Grafito	129	710	2.260
PS Poliestireno	0,160	1.300	1.050
Lana de Roca	0,034-0,04	840	30-160
Madera	0,04-04	1.381	840
Mica	0,5	880	2.900
Mármol	2,1	879	2.800
Nitrógeno	0,026	1.040	1,250
Oxígeno	0,026	920	1.429
PEHD Polietileno alta densidad	0,5	1.800	980
PELD Polietileno baja densidad	0,330	2.200	920
Aluminio	237	909	2.700
Hierro	80	473	7.870
Cobre	400	385	5960
Plata	429	232	10.490
Vidrio	0,81-1	833	2.700

Tabla xx.1 – Conductividades térmicas, calores específicos y densidades de algunos materiales [4].

El cociente $(T_C - T_F)/l$ se denomina el *gradiente térmico* de la barra. El gradiente térmico en cada punto de la barra se define por dT/dx . El signo menos en la Ec.(xx.1) indica que el flujo siempre va de la fuente caliente a la fría, es decir opuesta al signo del gradiente térmico. La forma diferencial, de la Ec. (xx.1), Fig. xx.1.B, para un elemento de barra infinitesimal de longitud dx es:

$$H = \frac{dQ}{dt} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}. \quad (\text{xx.2})$$

En la Ec.(xx.1), implícitamente suponemos que no hay pérdidas de calor en la barra por los laterales de la misma. La Ec.(xx.1) también puede escribirse como:

$$H = \frac{dQ}{dt} = -\frac{k \cdot A}{l} \cdot (T_C - T_F) = -\frac{\Delta T}{\mathfrak{R}_{ter}} = -U_{ter} \cdot A \times \Delta T, \quad (\text{xx.3})$$

siendo \mathfrak{R}_{ter} la *resistencia térmica* de la muestra, magnitud análoga a la resistencia eléctrica.

$$\mathfrak{R}_{ter} = \frac{l}{k \cdot A} = \frac{1}{U_{ter} \cdot A}, \quad \text{es decir: } U_{ter} = \frac{k}{l} \quad (\text{xx.4})$$

Por su parte la Transmitancia U_{ter} de una placa o barra se define como:

$$U_{ter} = \frac{k}{l} = \frac{1}{\mathfrak{R}_{ter} \cdot A} \quad (\text{xx.5})$$

La transmitancia de una palca o pared es la cantidad de Watts que *transmite por unidad de área* para un salto térmico de $\Delta T = 1 \text{ K}$ [5].

NOTA: tanto la resistencia térmica (\mathfrak{R}_{ter}) como la transmitancia térmica (U_{ter}), a veces se expresan por elemento completo (pared, etc.) incluyendo su área. Otras veces se expresan por unidad de área. Una forma de identificarlas, además de lo que se explica en el texto, es observar las unidades. Por ejemplo, la transmitancia por unidad de área se expresa en $W/m^2 \cdot K$, y la resistencia por unidad de área como $m^2 \cdot K/W$.

La similitud de la resistencia térmica con la eléctrica es mucho más que una analogía formal, como veremos más adelante, ambos procesos físicos están estrechamente relacionados. Además, esta relación entre resistencia térmica y eléctrica es muy útil a la hora de resolver problemas prácticos. Por ejemplo, si deseamos encontrar las resistencias térmicas de varias capas colocadas en serie, una pared a continuación de la otra, de modo que todo el calor que pasa por cada una de ellas es el mismo, Figura xx.2, la resistencia equivalente del conjunto es simplemente la suma de las resistencias térmicas individuales: $R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$

Similarmente, para paredes en paralelo, es decir dos tipos paredes distintas que están colocadas entre las mismas temperaturas y el calor que fluye por una no fluye por la otra, Figura xx.2, tenemos: $U_{eq} = 1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 \dots = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$

Resistencias térmicas en serie: Si tenemos dos medios, separando zonas que están a temperaturas T_1 y $T_2 (> T_1)$ en serie, como se ilustra en la Figura xx.2.a, por conservación de energía en equilibrio, el flujo a través del medio 1, debe de ser igual al flujo a través del medio 2. Si llamamos T_m la temperatura de las interfaces 1 y 2, tenemos:

$$H = -\frac{(T_m - T_1)}{\mathfrak{R}_1} \text{ y } H = -\frac{(T_2 - T_m)}{\mathfrak{R}_2} \rightarrow \mathfrak{R}_1 H + \mathfrak{R}_2 H = -(T_2 - T_1). \quad (\text{xx.6})$$

O sea:

$$H = -\frac{(T_2 - T_1)}{\mathfrak{R}_{12}}, \quad (\text{xx.7})$$

con

$$\mathfrak{R}_{12} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2. \quad (\text{xx.8})$$

Resistencias térmicas en paralelo: por un razonamiento similar, para el caso de dos medios en paralelo como en la Fig.2 b, tenemos que $H = H_1 + H_2$, de donde obtenemos que:

Transmisión del calor – UNSAM 2023 – S.Gil

$$H = -\frac{(T_2-T_1)}{\mathfrak{R}_1} - \frac{(T_2-T_1)}{\mathfrak{R}_2} = -\frac{(T_2-T_1)}{\mathfrak{R}_{12}}, \quad (\text{xx.9})$$

con

$$\frac{1}{\mathfrak{R}_{12}} = \frac{1}{\mathfrak{R}_1} + \frac{1}{\mathfrak{R}_2}. \quad (\text{xx.10})$$

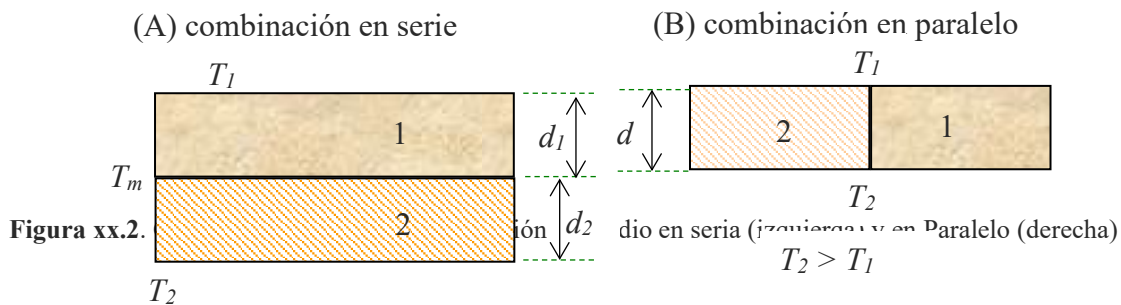
O también, en términos de las Transmitancias o valor- U :

$$U_{12} = U_1 + U_2. \quad (\text{xx.11})$$

Este modo de combinar resistencias térmicas es similar a como se combinan las resistencias eléctricas en serie y paralelo. De hecho, todas las técnicas que se usan para el caso eléctrico pueden ser usadas para el caso térmico. Claramente, estas expresiones pueden generalizarse para combinaciones más complejas de medios en serie y paralelo.

Ejemplo 1. En los edificios y casas, una de las mayores fuentes de pérdida de calor son las aberturas (puertas y ventanas). Consideremos una habitación de 4m x 4m y 2.5 m de altura, con paredes y techo, del mismo material que las paredes, de espesor $d_{pared}=30$ cm. Hay dos aberturas de vidrio simple de 4 m², y 4 mm de espesor (una ventana y puerta que supondremos mayormente de vidrio). El área de las paredes y techos, descontado las aberturas, es $A_{pared}=52\text{m}^2$. Las pérdidas a través de la pared y el vidrio están en la misma relación que la inversa de sus resistencias térmicas, esto es:

$$H_{pared}/H_{vidrio} = \mathfrak{R}_{vidrio}/\mathfrak{R}_{pared} = \frac{d_{vidrio}}{d_{pared}} \cdot \frac{k_{pared}}{k_{vidrio}} \cdot \frac{A_{pared}}{A_{vidrio}} \approx 1.3 \quad (\text{xx.12})$$



Por consiguiente, las pérdidas por las aberturas son tan importantes como las de toda una pared. Claramente, si se desea un buen aislamiento térmico en las paredes, es conveniente usar paredes dobles con algún buen aislante térmico en el medio como polietileno expandido (EPS o Telgopor) o lana de vidrio. Para reducir la transmisión del calor por aberturas vidriadas, se usan dos paneles de vidrio con una cámara de aire en el medio, conocido como doble vidriado hermético (DVH) como se ilustra en la Figura xx.3.

Las propiedades aislantes de la ropa provienen fundamentalmente de las propiedades aislantes del aire. Nuestro cuerpo calienta el aire en contacto con la piel y estos "paquetes" de aire dentro del tejido de la ropa nos aíslan el medio. Si corre viento, esta capa de aire caliente es remplazada por otra fría y sentimos este efecto, por la sensación de frío experimentamos. La ropa nos mantiene calientes pues impide que el aire se mueva con facilidad. A propósito, es claro que la ropa no genera calor, a esté lo hacemos nosotros a través de nuestro metabolismo, la ropa sólo nos aísla térmicamente.

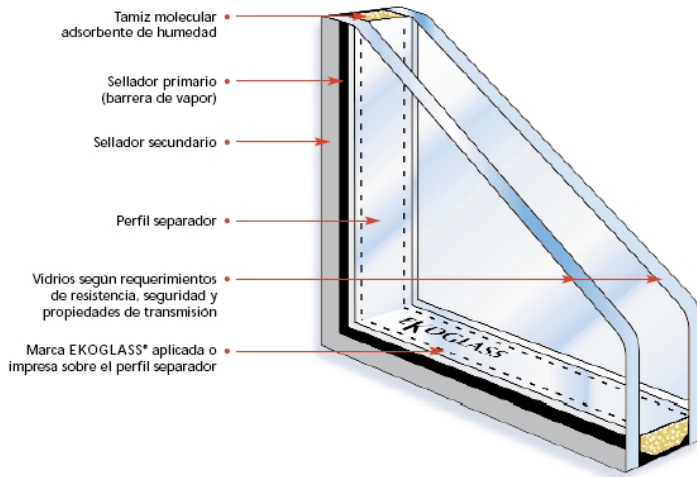


Figura xx.3. Ventana con Doble Vidrio Hermético (DVH). Esta figura corresponde a un particular fabricante Ekoglass.

♣ ♣ * **Sistemas con simetría cilíndrica y esférica:** Consideremos los casos de sistemas cilíndricos y esféricos como se muestran en la Figura xx.4. En estos casos consideramos un elemento infinitesimal de radio r y espesor dr . Por cada uno de estos elementos atraviese la misma potencia H_0 , es decir los elementos están en serie. En el caso cilíndrico, el área de uno de estos elementos infinitesimales es $A=2\pi \cdot r \cdot l$. y su espesor dr . De la Ec.(xx.4) tenemos:

$$H_0 = \frac{dQ}{dt} = -k \cdot 2\pi r \cdot l \cdot \frac{dT}{dr} \text{ o sea } -\frac{H_0}{k2\pi \cdot l} \frac{dr}{r} = dT, \quad (\text{xx.13})$$

por tanto:

$$-\frac{H_0}{k2\pi \cdot l} \ln(b/a) = T_2 - T_1 \text{ o } H_0 = -k \frac{2\pi}{l \cdot \ln(b/a)} (T_2 - T_1) = -\frac{(T_2 - T_1)}{\mathfrak{R}} \quad (\text{xx.14})$$

donde

$$\mathfrak{R} = \frac{\ln(b/a)}{2\pi \cdot l \cdot k} \quad (\text{Cilindro hueco}) \quad (\text{xx.15})$$

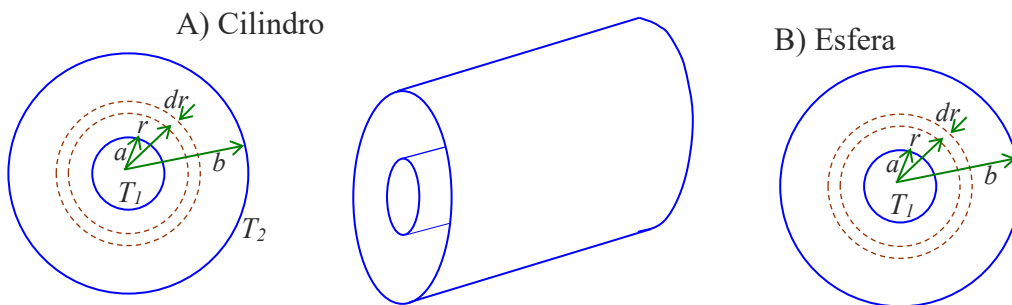


Figura xx.4. (A) Transmisión del calor a lo largo de un cilindro de radio interior a y exterior b cuyas temperaturas están a temperaturas T_1 y T_2 . Su longitud es l . B) caso similar correspondiente a una esfera.

En el caso de una esfera hueca de radio interior a y exterior b , Figura xx.4 B, el área del elemento infinitesimal de radio r es: $A=4\pi \cdot r^2$, siguiendo un razonamiento similar, tenemos:

* El símbolo ♣ ♣ se utiliza para indicar un tema de carácter más avanzado que el resto de texto.
Transmisión del calor – UNSAM 2023 – S.Gil

$$H_0 = -k \frac{4\pi}{(1/a-1/b)} (T_2 - T_1) = -\frac{(T_2-T_1)}{\mathfrak{R}} \text{ con } \mathfrak{R} = \frac{(1/a-1/b)}{4\pi \cdot k}. \quad (\text{xx.16})$$

Lo útil e interesantes, es que, con estas definiciones de resistencia térmicas para sistemas con simetrías cilíndricas y esferitas, las resistencias en serie y paralelo se comban con las mismas reglas que en el caso plano discutido en la Figura xx.2.

Hay asimismo casos con geometrías más complejas en las que puede encontrarse soluciones analíticas como por ejemplo tubos enterrados a una profundidad z de la superficie o tubos en una pared como se muestra en la Figura xx.4, donde es útil introducir un factor de forma S , tal que:

$$H_0 = -S \cdot k \cdot (T_2 - T_1) = -\frac{(T_2-T_1)}{\mathfrak{R}}. \quad (\text{xx.17})$$

Los valores de S , *factores de forma de conducción (conductive shape factor)*, están tabulados para algunos casos simples [6], [7]. Ver Tabla xx.2.

♣ ♣ **Ejemplo 1:** Consideremos un caño de agua enterrado muy profundamente, que lleva agua de densidad ρ y calor específico c , que se inyecta en el tubo a una temperatura inicial T_0 y flujo Q_0 ($=\pi \cdot a^2 \cdot v$). Aquí v es la velocidad media del fluido. Suponemos que el tubo tiene una conductividad k , radio interior a y espesor e . Además, tiene un revestimiento de espesor t y conductividad k_a . El terreno está a una temperatura $T_1 < T_0$. Nuestro problema es conocer la variación de la temperatura del agua a medida que nos alejamos una distancia x del punto de inyección. Ver Fig. xx.6.

Descripción física	Diagrama	Factor de forma S
Conducción a través de un material de conductividad k , cilindro a una profundidad z y a una temperatura T_2 . La superficie de la superior está a una temperatura T_1 . Cilindro de radio a y longitud L .		$S = \frac{2\pi \cdot L}{\ln(2z/a)}$ $\mathfrak{R} = \frac{\ln(2z/a)}{2\pi \cdot k \cdot L}$
Conducción a través de una pared de conductividad k , cilindro a una profundidad z y una temperatura T_2 y las superficies de la pared están a una temperatura T_1 .		$S = \frac{2\pi \cdot L}{\ln(4z/\pi a)}$ $\mathfrak{R} = \frac{\ln(4z/\pi a)}{2\pi \cdot k \cdot L}$

Figura xx.5. Coeficientes de forma para das geometrías simples.

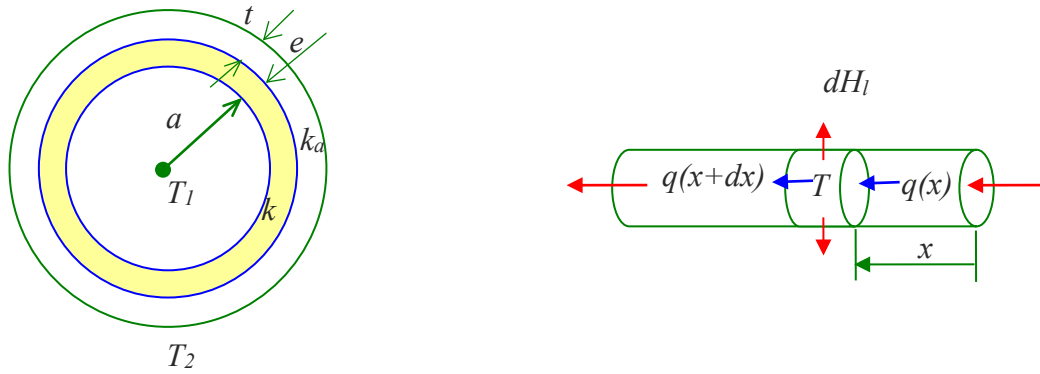


Figura xx.6. Tubo de agua enterrado a una gran profundidad.

Si tomamos un elemento infinitesimal de longitud dx , la resistencia efectiva será:

$$dH = -\frac{(T_2-T)}{\delta\mathfrak{R}} \text{ con } \delta\mathfrak{R} = \delta\mathfrak{R}_c + \delta\mathfrak{R}_r = \frac{\ln(1+e/a)}{2\pi \cdot k \cdot dx} + \frac{\ln(1+t/(a+t))}{2\pi \cdot k_a \cdot dx}. \quad (\text{xx.18})$$

Si $q(x) = c \cdot \rho \cdot Q_0 \cdot T(x)$ es una cantidad proporcional a la energía que fluye por unidad de tiempo por el tubo, del balance energético en el elemento infinitesimal considerado tenemos:

$$dH = q(x + dx) - q(x)$$

o sea

$$c \cdot \rho \cdot Q_0 \cdot dT = 2\pi \cdot (T(x) - T_2) \cdot dx \cdot [\ln(1 + e/a)/k + \ln(1 + t/(a + t))/k_a], \quad (\text{xx.19})$$

o bien

$$\frac{dT}{(T(x)-T_2)} = \left[\frac{2\pi}{c\rho \cdot Q_0} \cdot (\ln(1 + e/a)/k + \ln(1 + t/(a + t))/k_a) \right] \cdot dx = dx/\lambda. \quad (\text{xx.20})$$

Esta ecuación puede ser integrada para dar el resultado buscado, es decir $T(x)$:

$$T(x) = T_2 + (T_0 - T_2) \cdot e^{-x/\lambda} \quad (\text{xx.21})$$

con

$$\lambda = \frac{c\rho \cdot Q_0}{2\pi} \cdot [(\ln(1 + e/a) + \ln(1 + t/(a + t)))]^{-1} \approx \frac{c\rho \cdot Q_0}{2\pi} \left[\frac{e}{a} + \frac{t}{a+e} \right], \quad (\text{xx.22})$$

Para el caso en que $e \ll a$ y $t \ll a$, como en general $k_a < k$, tenemos:

$$\lambda \approx \frac{c\rho \cdot Q_0}{2\pi \cdot k_a} \frac{t}{(a+e)} \left[1 + \frac{e}{t} \left(\frac{a+e}{a} \right) \frac{k_a}{k} \right]^{-1} \approx \frac{c\rho \cdot Q_0}{2\pi \cdot k_a} \frac{t}{(a+e)} \left(1 - \frac{e}{t} \left(1 + \frac{e}{a} \right) \frac{k_a}{k} \right), \quad (\text{xx.23})$$

λ puede interpretarse como la longitud en el tubo en la que la diferencia de temperatura del agua $T(x)-T_2$ es $(T_0-T_2)/e$. es decir λ es una longitud característica en el que el agua se termaliza con el medio, T_2 . Si aumentamos la aislación, (t/k_a) aumenta y consecuentemente lo hace λ . Similarmente, si Q_0 aumenta, λ también lo hace.

♣ ♣ **Ejemplo 2:** Consideremos un caño de aire enterrado a una profundidad z . El terreno tiene una conductividad k_t y la superficie está a T_0 . Siguiendo el mismo razonamiento anterior, consideremos un segmento del tubo de longitud dx , radio interior a y espesor e con conductividad k_c . El aire mismo en el interior del tubo presenta convección con coeficiente $h_a \approx 60 \text{ W/m}^2$. La resistencia total asociada a la convección dentro del tubo, el tubo o caño mismo y el terreno será:

$$\delta\mathfrak{R} = \delta\mathfrak{R}_{conv} + \delta\mathfrak{R}_{coño} + \delta\mathfrak{R}_{terreno} = \frac{1}{h_a \cdot 2\pi a \cdot dx} + \frac{\ln(1+e/a)}{2\pi \cdot k_c \cdot dx} + \frac{\ln(2z/a)}{2\pi \cdot k_t \cdot dx}. \quad (\text{xx.24})$$

El balance energético, Ec. xx.16, se convierte en:

$$c_a \cdot \rho_a \cdot Q_a \cdot dT = (T(x) - T_0) \cdot dx \left[\frac{1}{h_a \cdot 2\pi a \cdot dx} + \frac{\ln(1+e/a)}{2\pi \cdot k_c \cdot dx} + \frac{\ln(2z/a)}{2\pi \cdot k_t \cdot dx} \right]^{-1}, \quad (\text{xx.25})$$

o bien

$$\frac{dT}{(T(x)-T_0)} = \frac{2\pi \cdot k_c}{c_a \rho_a \cdot Q_a} \cdot \left[\frac{k_c}{h_a \cdot a} + \ln(1 + e/a) + k_c \frac{\ln(2z/a)}{k_t} \right]^{-1} \cdot dx = dx/\lambda. \quad (\text{xx.26})$$

Donde:

$$\lambda = \frac{c_a \rho_a \cdot Q_a}{2\pi \cdot k_c} \cdot \left[\frac{k_c}{h_a \cdot a} + \ln(1 + e/a) + k_c \frac{\ln(2z/a)}{k_t} \right], \quad (\text{xx.27})$$

y

$$T(x) = T_0 + (T_i^{(aire)} - T_0) \cdot e^{-x/\lambda} \quad (\text{xx.28})$$

Donde $T_i^{(aire)}$ es la temperatura del aire a la entrada del tubo. $T(x)$ la temperatura del aire después de recorrer una distancia x en el tubo. Desde luego, c_a , ρ_a y Q_a son el calor específico, densidad y flujo del aire en el tubo.

♣ ♣ Conductividad térmica y eléctrica de los materiales

Los metales en general son buenos conductores del de calor. Los buenos conductores eléctricos son también buenos conductores térmicos, aunque existen notables y útiles excepciones como el acero inoxidable, la mica y el diamante. Para los metales, (que son buenos conductores eléctricos) existe una relación entre la conductividad eléctrica ρ y la conductividad térmica k dada por la *Ley de Widemann-Franz* [8]:

$$k[W/m.k] \cdot \rho[ohm.m] = \frac{\pi^2}{3} \cdot \left(\frac{k_B}{e} \right)^2 \cdot T = L \cdot T = 2.45 \cdot 10^{-8} \cdot T \left[\frac{W.\Omega}{k^2} \right] \quad (\text{xx.29})$$

k_B es la *constante de Boltzmann* y e la *carga del electrón*. El valor de este producto, en el sistema SI vale dentro de 20% para los metales más comunes, pero no para semiconductores, grafito, diamante o aisladores.

La madera el plástico, el vidrio, el aire, tiene coeficientes de conducción térmica pequeños (son malos conductores del calor). Esto explica porque los pisos de madera o alfombra son más “cálidos” para caminar descalzos que unos de mosaico, este último es mejor conductor térmico que la alfombra o la madera.

2. Convección del calor

Aunque los líquidos y los gases no suelen ser muy buenos conductores de calor, pueden transmitirlo por convección. La propagación del calor a través de la convección se caracteriza por:

- ✓ Existencia de un *medio material fluido* a través del cual se propaga el calor
- ✓ Variación de la densidad del medio con la temperatura.
- ✓ Existencia de un campo gravitatorio. Sin él no hay convección.
- ✓ El calor se transmite en este caso *por transporte de materia*.

Mientras que la conducción implica moléculas y/o electrones que se mueven pequeñas distancias y chocan, en la convección interviene el movimiento de muchas moléculas a lo largo de distancias microscópicas. Dado que el enfoque matemático de este proceso resulta bastante complicado, sólo se lo describirá en forma cualitativa [1], [4], [6].

La convección puede ser *libre* o *forzada*. Un cuerpo que se enfría en el aire, en ausencia de corrientes de aires generadas artificialmente, es un ejemplo del primer caso. Un calefactor con ventilación forzada o caloventor, es un ejemplo de *convección forzada*. En estos artefactos, el aire se calienta y luego se distribuye mediante un ventilador. La convección natural también ocurre, por ejemplo, en el aire caliente que se eleva al calentarse, el aire en las adyacencias de un radiador o cuerpo caliente se expande y se eleva. Cuando se calienta una olla con agua, se producen corrientes de convección. El agua del fondo sube, debido a su menor densidad, y reemplaza al *Transmisión del calor – UNSAM 2023 – S.Gil*

agua más fría de la parte superior. Las corrientes oceánicas, como la corriente del Golfo, son ejemplos de *convección natural* a gran escala, al igual que los vientos u corrientes atmosféricas ascendentes.

En el caso de la convección natural, al rededor del objeto caliente se forma una capa delgada (capa límite) de aire que por conducción propaga el calor de la superficie caliente al medio. Es posible escribir el flujo de calor disipado por convección natural como [4], [6]:

$$P_{conv} = H_{conv} = A \cdot h \cdot (T_{sup} - T_{medio}), \quad (xx.30)$$

donde A es la superficie del cuerpo expuesta al medio, h una constante característica, *coeficiente de convección*, que depende del régimen de disipación (laminar, turbulento, etc.) de la conductividad térmica del medio fluido y el estado de las superficies. T_{sup} y T_{medio} designan a las temperaturas de la superficie del cuerpo y del medio fluido respectivamente. Esta ley de enfriamiento, cuando se aplica a un cuerpo inmerso en un medio que está a una temperatura constante, T_{medio} , cuya masa es m , durante un intervalo de tiempo dt , perderá (o ganará) calor: $dQ=mc \cdot dT$. Por tanto $H=dQ/dt= m \cdot c \cdot dT/dt$, por lo tanto la Ec.(xx.13) se puede escribir como:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{A \cdot h}{m \cdot c} \cdot (T - T_{medio}) = -\lambda(T - T_{medio}), \quad (xx.31)$$

que se conoce como la *ley de enfriamiento de Newton*.

La Ec.(xx.13) también puede escribirse como:

$$H_{conv} = -A \cdot h \cdot (T - T_{medio}) = -\frac{\Delta T}{R_{con}}, \quad \text{con } R_{con} = 1/(A \cdot h) = 1/A \cdot U_{conv} \quad (xx.32)$$

3. Transmisión del calor por paredes o sistemas compuestos

Lo interesante de esta resistencia de convección es que puede combinarse con las de conducción siguiendo las mismas reglas de combinaciones de serie y paralelo discutidas previamente. Debe tenerse en cuenta que, a diferencia de la constante de conductividad térmica, k , que es una propiedad característica de cada sustancia, h varía con el tipo de medio y de acuerdo a las condiciones particulares de la superficie y en régimen de movimiento del fluido alrededor del objeto. Por ejemplo, se encuentra experimentalmente que el valor de h exterior a un vidrio de ventana es $h_{ext} \approx 28 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, mientras que en el lado interior es $h_{int} \approx 8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, como consecuencia del hecho que por lo regular las corrientes de aires exteriores son más intensas del lado exterior a una vivienda que del lado interior. Combinando las Ecs.(xx.3) y (xx.24) esto equivaldría a tener en el lado exterior una capa límite de espesor efectivo de uno 8 mm y una capa límite de unos 3 mm en el interior. Ver Tabla xx.2.

Tipo de convección	h (W/m ² .K)
Convección libre en gases	2 -25
Convección libre en líquidos	100- 1000
Convección forzada en gases	25-250
Convección forzada en líquidos	50 – 20000
Convección forzada en líquidos con ebullición y condensación	2500-10 ⁴
Aire externo a un vidrio (interior)	5-10 (8)
Aire externo a un vidrio (exterior)	25-40 (28)

Tabla xx.2- Valores característicos de los *coeficientes de convección*. En paréntesis valores nominales de la constante h [6], [4].

Pérdidas de calor por aberturas de vidrio:

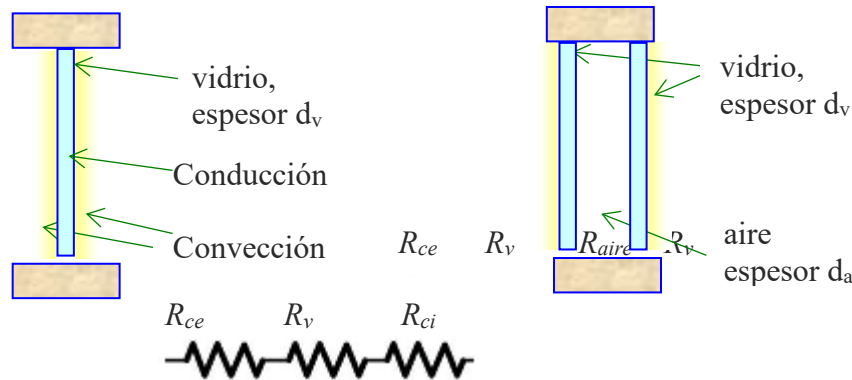


Figura xx.8. Ventana de simple y de doble panel: dos vidrios y una cámara de aire en el medio. En esta figura R_{ce} y R_{ci} se refieren a la resistencia de convección del aire (exterior e interior) en las adyacencias del vidrio.

Vidrio simple: la resistencia efectiva del vidrio de $d_v \approx 4\text{mm}$, será:

$$\mathfrak{R}_{\text{vidrio}} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{W}} \cdot \text{K} \right) = \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{1}{h_{ce}} + \frac{d_v}{k_v} + \frac{1}{h_{ci}} \right) \approx \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{1}{28} + \frac{0.004}{1} + \frac{1}{8} \right) \approx \frac{0.165}{A}$$

$$\mathfrak{R}_{2\text{-vidrio}} (\text{m}^2/\text{w} \cdot \text{K}) = \frac{0.001}{A} \cdot (35 + 4 + 125) \approx \frac{0.165}{A} \quad (\text{xx.33})$$

Nótese, que el mayor aporte a la resistencia térmica de una hoja de vidrio simple no viene del vidrio sino de la capa de aire límite interior, ($1/h_{int} \sim 125$) seguida de la capa límite externa ($1/h_{ext}$), de hecho, estas dos capas constituyen el 97% de la resistencia total de la hoja de vidrio. Por esta razón, **considerar los efectos de las capas límites interior y exterior es muy importante para calcular la resistencia térmica total o transmitancia de cualquier tabique o pared.** Esta práctica de usar resistencias convectivas, en ambos lados de los vidrios, paredes, techos, etc. es muy importante y se aplica también a todo elemento expuesto al aire interior y exterior.

Vidrio doble: la resistencia efectiva de un vidrio doble de $d_v \approx 4\text{mm}$ y $d_{aire} \approx 1\text{ cm}$, será:

$$\mathfrak{R}_{2\text{-vidrio}} (\text{m}^2/\text{w} \cdot \text{K}) = \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{1}{h_{ce}} + 2 \frac{d_v}{k_v} + \frac{d_{aire}}{k_{aire}} + \frac{1}{h_{ci}} \right) \approx$$

$$\approx \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{1}{28} + \frac{0.008}{1} + \frac{0.01}{0.023} + \frac{1}{8} \right) = \frac{0.001}{A} \cdot (35 + 8 + 435 + 125)$$

$$\mathfrak{R}_{2\text{-vidrio}} (\text{m}^2/\text{w} \cdot \text{K}) = \frac{0.001}{A} \cdot (35 + 8 + 435 + 125) \approx \frac{0.6}{A} \quad (\text{xx.34})$$

Nótese, que el mayor aporte a la resistencia térmica de una **hoja de vidrio doble**, no viene del vidrio sino principalmente del **aire entre los dos vidrios (72%)** y de la capa de aire límite interior, (21%) seguida de la capa límite externa (6%), de hecho estas tres capas constituyen el 99% de la resistencia total de la hoja de vidrio doble. Para estimar la mejora en el aislamiento ν de una ventana de doble vidrio, respecto de una de panel simple, debemos dividir $H_{2\text{vidrio}}/H_{1\text{vidrio}}$, el resultado es:

$$\nu = \frac{H_{1\text{vidrio}}}{H_{2\text{vidrio}}} = \frac{\mathfrak{R}_{2\text{-vidrio}}}{\mathfrak{R}_{1\text{vidrio}}} \approx \frac{0.6}{0.165} \approx 3,6 \quad (\text{xx.35})$$

para una ventana típica, es decir que la mejora en aislación es un factor de 4 aproximadamente. Un problema con este tipo de ventanas es el mantenimiento del interior libre de hongos y humedad.

Para lograrlo, se suele usar algún gas inerte en el interior, por ejemplo: N_2 o Ar a una presión ligeramente superior a la atmosférica y algún tipo de sílica para absorber la humedad (agua) y el gas neutro impide el crecimiento de hongos. Con nuevas tecnologías, usando láminas antirreflectantes especiales (*low reflectance coating*) es posible mejorar aún más la aislación de ventanas dobles. [9], [10]

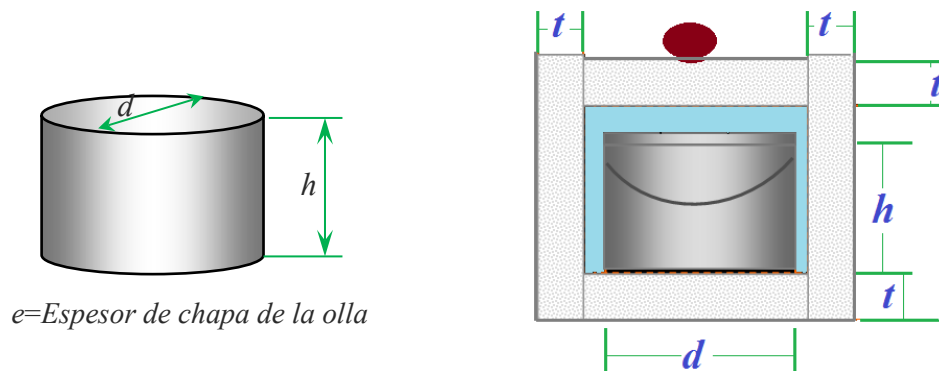


Figura xx.9. Cacerola u olla cilíndrica, de diámetro d , altura h y espesor del metal de e , sin aislación térmica (izquierda) y con aislación (derecha). Suponemos que espesor de la aislación térmica es t .

♣ ♣ **Ejemplo 3: Ollas Brujas.** Para que el proceso de cocción se realice en forma segura, se requiere cocinar los alimentos a temperaturas superiores a 75°C [11]. A esta temperatura se elimina la mayoría de los gérmenes comunes. Además, hay muchas comidas como; guisos, cocidos o pucheros, ablandamiento o *tiernización* de carnes, etc.; que requieren mucho tiempo de cocción, por lo que su preparación es energéticamente intensiva. Es colocar una cacerola con los productos a cocinar en una hornalla, llevarlos a hervor y luego mantener su temperatura, proporcionando la energía a la cacerola, para compensar sus pérdidas de calor por disipación. Otro modo de lograr una temperatura estable cocción, consiste en llevar la cacerola con los alimentos a hervor, y luego colocar la olla en una caja con buena aislación térmica. Esta caja térmica se conoce como *olla térmica*, *olla bruja* o Hay Box.[†] La cacerola dentro de la caja térmica puede mantener su temperatura por varias horas arriba de los 75°C sin necesidad de suministrarle energía. Así se puede lograr ahorros considerables de energía y obtener alimentos bien cocidos; a la par de preservar los nutrientes de estos. En este ejemplo calcularemos las pérdidas de calor de la olla, sin aislación térmica y con aislación térmica, usando una caja cilíndrica de *Telgopor* o EPS, con un cartón corrugado entre la olla y el EPS, para que este no llegue a temperaturas cercanas a 100°C que es cuando comienza a deteriorarse este material. Claro, también puede usarse otros materiales aislantes que resisten mejor altas temperaturas como: lana de roca, lana de vidrio, corcho, etc. En la segunda parte de este ejercicio, nos proponemos calcular la constante de tiempo de enfriamiento de la olla en los dos casos.

Olla sin aislación térmica

La resistencia térmica de las paredes laterales será:

$$R_L = (e/k_m + 1/h_{ce} + 1/h_a)/A_{Lat} \quad (\text{xx.36})$$

Aquí, como antes, h_{ce} es el coeficiente de convección de aire exterior a la olla, h_a es el coeficiente de convección de agua en el interior de la cacerola, e es el espesor del metal el que está hecha y k_m

[†] Haybox, Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/Haybox>
Transmisión del calor – UNSAM 2023 – S.Gil

su conductividad térmica, $A_{Lat} (= \pi.d.h)$ es el área lateral de la olla. Similarmente, la resistencia de la tapa y base será:

$$R_{Tapa} = (e/k_m + 1/h_{ce} + 1/h_a)/A_{Tapa}, \quad (xx.37)$$

y

$$R_{base} = (e/k_m + 1/h_{ce} + 1/h_a)/A_{Tapa}, \quad (xx.38)$$

$A_{Tapa} (= \pi.d^2/4)$ es el área la tapa y base de la olla. Por lo tanto, el coeficiente de pérdida de calor de la olla sin aislación térmica (SAT) por cada grado de diferencia de temperatura, λ_{olla}^{SAT} , será:

$$\lambda_{olla}^{SAT} = (1/R_{base} + 1/R_{Tapa} + 1/R_L) = H/\Delta T. \quad (xx.39)$$

Por su parte, la temperatura de la olla $T(t)$ seguirá un decaimiento exponencial, con una constante de tiempo: $\tau_{SAT} = m_T \cdot c_T / \lambda_{olla}^{SAT}$, donde m_T es la masa total de la olla y su contenido y c_T

el calor específico medio de la olla y su contenido. O sea, $T(t) = T_0 + (T_{ini} - T_0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{SAT}}}$, donde T_0 es la temperatura del medio circundante y T_{ini} la temperatura inicial de la olla y su contenido.

Olla con aislación térmica

Si se coloca un aislante térmico de espesor t , y conductividad k_{ais} , tanto en los laterales como en la tapa y base, la resistencia térmica de las paredes laterales será:

$$R_L^{Ais} = (e/k_m + 1/h_{ce} + 1/h_a)/A_{Lat} + (t/k_{ais} + 1/h_{ce} + 1/h_{ci})/A_{Lat} \quad (xx.40)$$

Aquí, como antes, h_{ce} es el coeficiente de convección de aire exterior a la olla, h_a es el coeficiente de convección de agua en el interior de la cacerola, e es el espesor del metal el que está hecha y k_m su conductividad térmica, $A_{Lat} (= \pi.d.h)$ es el área lateral de la olla. Similarmente, la resistencia de la tapa y base será:

Dimensiones		Resultados	
d(cm)=	20	Sin Aislación	
h(cm)=	20	λ (W/K)=	1,432
e_al(mm)=	2	τ (h)=	2,63
EPS_ Aislante(mm)=	50	T_cocción (h)=	0,71
Vol_nom (l)=	3,0	Con Aislación	
Tin=	90	λ (W/K)=	0,128
Tex=	18	τ (h)=	29,33
T_ref=	73	T_cocción (h)=	7,90

Tabla xx.3- Valores de los parámetros usado para una olla de 3 litros, no totalmente llena, y con una aislación térmica de EPS de 5 cm de espesor. Los parámetros de aislación y del material de la olla, aluminio, se tomaron de las tablas anteriores.

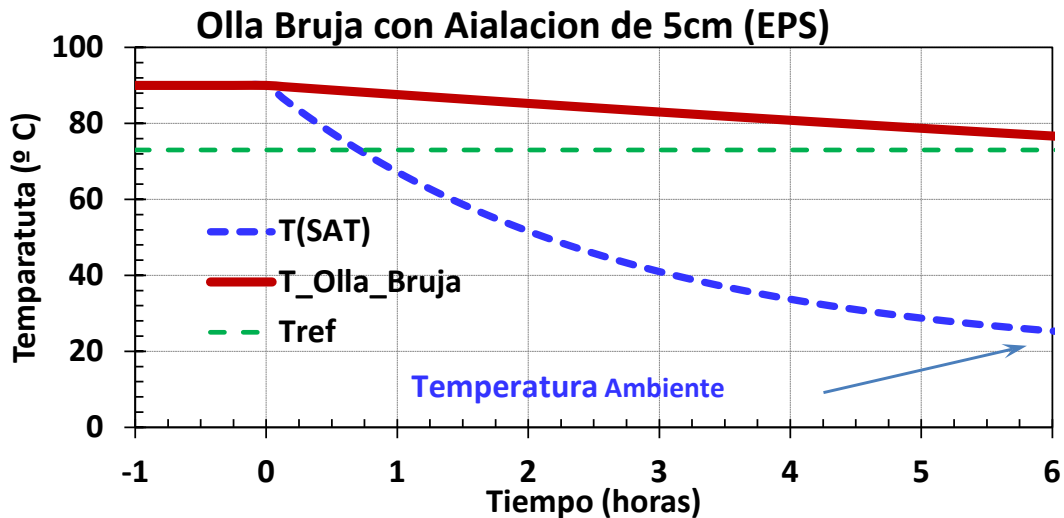


Figura xx.10 Variación de la temperatura de una olla sin aislación térmica, curva azul de trazos, y con aislación de 5 cm de EPS (olla bruja), curva roja. El volumen líquido de 3 litros y la temperatura ambiente se supone de $T_{ex}=18\text{ °C}$. En el primer caso la olla llega a $T_{ref}=75\text{ °C}$, definido como en tiempo de cocción en 0,71 h y con la olla bruja el tiempo de cocción se prolonga por 7,9 h.

$$R_{Tap}^{Ais} = (e/k_m + 1/h_{ce} + 1/h_a)/A_{tap} + (t/k_{ais} + 1/h_{ce} + 1/h_{ci})/A_{tap} \quad (xx.41)$$

$$R_{base}^{Ais} = (e/k_m + 1/h_{ce} + 1/h_a)/A_{tap} + (t/k_{ais} + 1/h_{ce} + 1/h_{ci})/A_{tap} \quad (xx.42)$$

Aquí h_{ci} es el coeficiente de convección de aire en el interior de la aislación. Por lo tanto, el coeficiente de pérdida de calor de la olla con aislación térmica (CAT) por cada grado de diferencia de temperatura, λ_{olla}^{CAT} , será:

$$\lambda_{olla}^{CAT} = (1/R_{base}^{Ais} + 1/R_{tap}^{Ais} + 1/R_{Lat}^{Ais}) = H/\Delta T \quad (xx.43)$$

En la tabla xx-3 se presentan los valores de las constantes para una olla de unos 3 litros con una aislación térmica de 5 cm de Telgopor o EPS. De nuevo aquí, la temperatura de la olla $T(t)$ seguirá un decaimiento exponencial, con una constante de tiempo: $\tau_{CAT} = m_T \cdot c_T / \lambda_{olla}^{CAT}$, donde m_T es la masa total de la olla y su contenido y c_T el calor específico medio de la olla y su contenido.

En la Figura xx-10 se ilustra la variación de temperatura de la olla con y sin aislación térmica, para un contenido de 3 litros y las dimensiones indicadas en la Tabla 3. Como se ve, un recinto de EPS de 5 cm, hace que las temperatura del contenido, partiendo de $T_i=90\text{ °C}$, y temperatura ambiente de $T_{ex}=18\text{ °C}$, se mantenga a una temperatura superior a 75 °C , por más de 7 horas. Por lo tanto, la cocción continúa por todo este tiempo. De este modo el ahorro de energía en cocción puede ser muy importante, superior al 50%. Estos sistemas se usaron en Europa durante la primera y segunda guerras mundiales, como modo de ahorrar energía. Actualmente puede ser una excelente opción para muchos países en desarrollo que no tiene acceso a energía barata por redes.

4. Radiación del calor

En la conducción y la convección es necesaria la presencia de la materia para que se produzca la transferencia de energía. Sin embargo, la vida sobre la Tierra depende de la transferencia de energía del Sol a la Tierra, y ésta llega a nuestro planeta atravesando el espacio vacío. ¡Recordar que la atmosfera es una capa muy delgada, de unos 15 a 30 km de espesor, y la distancia Tierra Sol es de unos 150 millones de km! Si la Tierra tuviese el tamaño de un melón o pelota de futbol de 15 cm de radio, el espesor de la atmosfera seria 0,5mm o sea equivalente a 2 o 3 hojas de papel. A propósito, en esta escala el Sol estaría a 4 km.

La energía del Sol nos llega por el mecanismo de radiación. El calor que recibimos de un hogar a leña o a gas es principalmente energía radiante (la mayor parte del aire que se calienta en la chimenea sube por el tiro mediante convección y no llega hasta nosotros), lo mismo ocurre con el calor de una estufa eléctrica. La propagación del calor a través de la radiación se caracteriza por:

- ✓ No necesita la existencia de un medio *material* para que se produzca la radiación.
- ✓ El calor se transmite *sin transporte de materia*.

La radiación consiste esencialmente en ondas electromagnéticas. La radiación del Sol se produce principalmente en la zona visible y en otras longitudes de onda a las que el ojo no es sensible, como la infrarroja, que es la principal responsable del calentamiento de la Tierra.

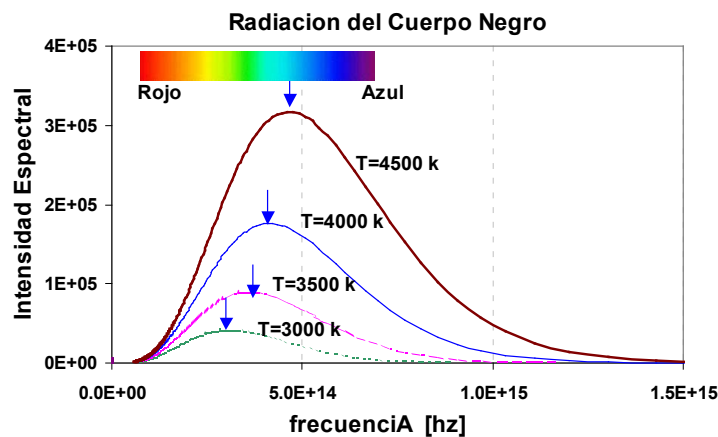
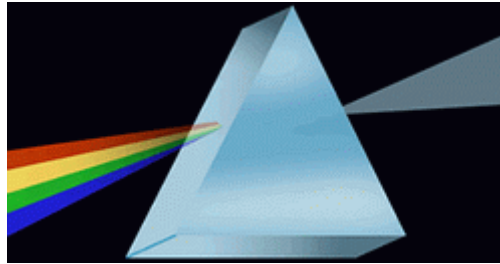


Figura xx.7. Espectro de la radiación electromagnética de un cuerpo negro a distintas temperaturas. Las flechas indican la posición del máximo de radiación a cada temperatura. Arriba se muestra como al pasar un haz de luz blanca, por ejemplo, proveniente de una fuente incandescente, al pasar por un prisma se recompone en los distintos colores del arco iris.

La tasa a la que un objeto irradia energía viene dada por la expresión de Stefan-Boltzmann:

$$P_{irr} = A \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot \sigma_{SB} \cdot T^4 \quad (xx.44)$$

aquí, A es el área de la superficie del objeto que irradia y que está a la temperatura absoluta T . $\varepsilon(\lambda, T)$ es una propiedad característica de cada material y las condiciones de su superficie llamada la emisividad del material y que en general depende de la temperatura y longitud de onda λ o tipo de radiación electromagnética (visible, infrarroja, etc) ($1 > \varepsilon > 0$). σ_{SB} es una constante universal llamada la constante de Stefan-Boltzmann, su valor es $\sigma_{SB} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. En equilibrio térmico un cuerpo absorbe tanto como irradia (Ley de Kirchoff), por lo tanto, los *buenos emisores* son también *buenos absorbentes*. Las superficies negras tienen emisividades mayores que las claras o brillantes. Esto hace que los objetos negros y oscuros absorben casi toda la radiación que les llega y es la causa de que la ropa clara sea preferible a la oscura cuando el día es caluroso. Si un objeto de temperatura T_1 está en un medio a una temperatura T_2 el objeto estará absorbiendo y emitiendo radiación, la potencia radiada neta será:

$$P_{irr_neta} = A \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot \sigma_{SB} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (xx.45)$$

En equilibrio, $P_{irr_neta}=0$, o sea $T_1=T_2$. Si T_1 es próximo a T_2 , entonces:

$$P_{irr_neta}(T) \approx 4 \cdot A \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot \sigma_{SB} \cdot T_2^3 \cdot (T - T_2) \quad (xx.46)$$

Un cuerpo de masa m y calor específico c , se enfriará siguiendo la ecuación:

$$\frac{dT}{dt} \approx (4 \cdot A \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot \sigma_{SB} \cdot T_2^3 / m \cdot c) \cdot (T - T_2) = k_{ir} \cdot (T - T_2) \quad (xx.47)$$

5. Radiación del cuerpo negro

Todo objeto caliente emite radiación electromagnética. Cuando encendemos una estufa eléctrica, de esas que tienen un tubo de cuarzo, notamos que a medida que se calienta, va irradiando más calor y cada vez más copiosamente; también su color va cambiando. Al principio sentimos el calor, pero el tubo no brilla. Al aumentar más la temperatura el tubo se pone rojo incandescente y si se calienta más aún, el mismo se parece a una lámpara incandescente, la luz irradiada se vuelve similar a la luz de Sol (luz blanca). Esta es una característica de todos los objetos: a medida que aumenta la temperatura la cantidad de energía radiada aumenta fuertemente y su color va cambiando.

En la Figura xx.7 se presentan los espectros de radiación de un cuerpo (negro) a distintas temperaturas absolutas (la temperatura absoluta es la temperatura en grados centígrado más 273, sus unidades son grados Kelvin, o sea, $T_{absoluto} [K] = T[^\circ C] + 273.15$). Si la radiación de un cuerpo caliente, llamado comúnmente “cuerpo negro”, se hace pasar por un prisma, la misma se descompone en distintas frecuencias (colores). Vemos que a medida que aumenta la temperatura, el área de las curvas de la Figura xx.7 aumenta rápidamente (esto es la energía total emitida por unidad de tiempo), justamente esta área viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann, Ec.(xx.29). Además, notamos que el máximo de la curva, representado por las flechas verticales, se va corriendo a frecuencias mayores a medida que aumenta la temperatura. Se puede escribir una relación entre la frecuencia de máxima radiación para cada temperatura. Esta relación se llama ley de Wien [3]:

$$f_{Maximo} [Hz] = 1.038 \times 10^{11} \cdot T [K] \quad (xx.48)$$

La ley de Wien afirma que el máximo de la intensidad de la radiación térmica emitida por un cuerpo negro ideal se desplaza, con el aumento de la temperatura, hacia las frecuencias más grandes, o equivalentemente a regiones de longitudes de onda más cortas. Esta ley nos permite entender por qué un cuerpo al calentarlo, primero se pone rojizo y a medida que se calienta más se va volviendo más azul, pasando por un color blanco incandescente. Esta propiedad de los cuerpos calientes es lo que posibilita la visión de mamíferos en la oscuridad. Dado que los mamíferos mantenemos una temperatura muy estable, de $37^\circ C (= 310 K)$, nuestro espectro de radiación tiene un máximo en el infrarrojo. Si usamos un visor sensible a esta radiación podremos ver la silueta de un mamífero en la oscuridad. Estas propiedades de la radiación de un cuerpo caliente también se aplican en termografía, que es una técnica que permite tomar una foto que muestra la distribución de las temperaturas de una persona. Esta técnica permite detectar, por ejemplo, un cáncer, ya que los tejidos cancerosos tienen una temperatura levemente mayor a los sanos.

La ley de Wien se utiliza también para determinar las temperaturas de las estrellas, a partir de los análisis de su radiación. En general, estudiando el espectro de emisión de un cuerpo podemos determinar su temperatura.

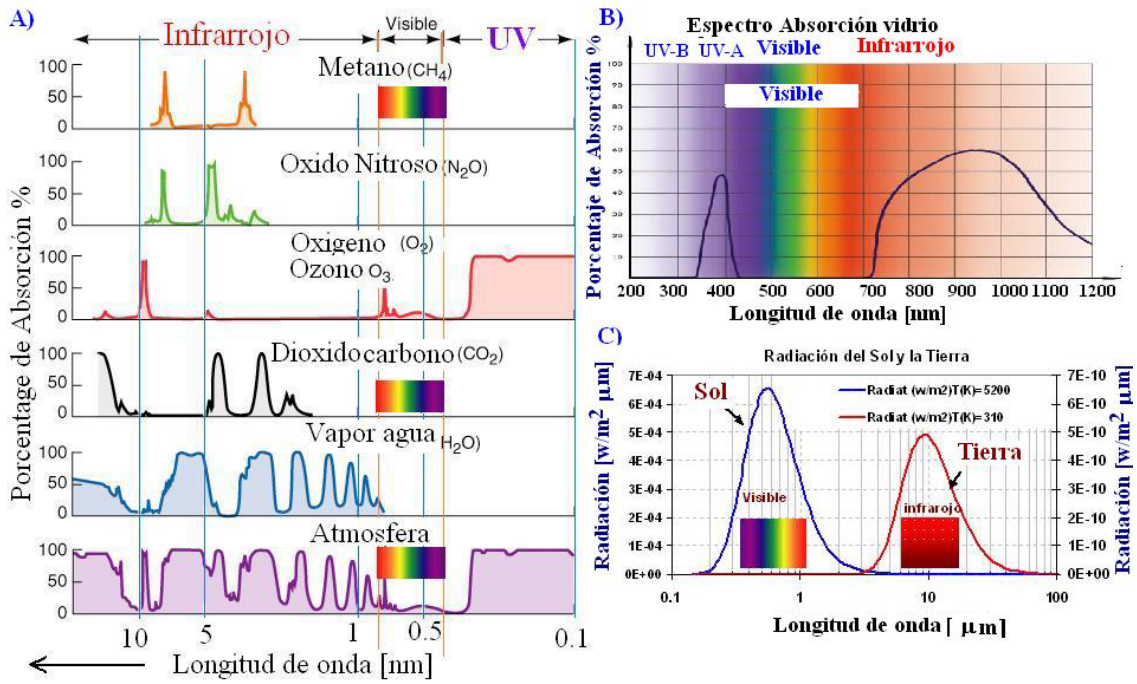


Figura xx.8. A) Espectros absorción para distintos gases presentes en la atmósfera terrestre. B) Espectro de Absorción del vidrio. C) Curvas de emisión de dos cuerpos negros a dos temperaturas diferentes: $T=5200\text{ K}$ (Sol) y a $T=310\text{ K}$ (Tierra).

6. Efecto de Invernadero

El efecto invernadero se produce cuando la radiación solar incide sobre un recinto cerrado, con paredes transparentes a la radiación visible, pero opacas o muy absorbentes de la radiación infrarroja, por ejemplo, vidrio, metano o CO_2 , Ver Figura xx.9.

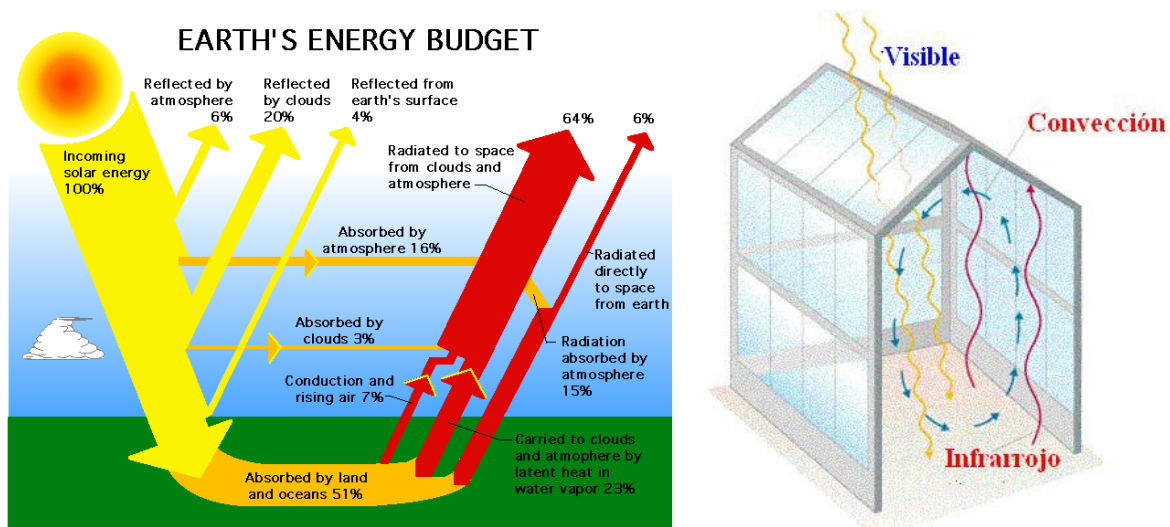


Figura xx.9. A la izquierda, balance energético en la atmósfera terrestre. A la derecha un invernadero de paredes y techo de vidrio. El vidrio, transparente al visible, no lo es al infrarrojo, que es la radiación emitida por los objetos a temperaturas próximas a la ambiental, $T \sim 30^\circ\text{C}$.



Figura xx.10. Fotografías en visible e infrarrojo (IR) de la misma situación o personas. Arriba a la izquierda vemos que una bolsa de plástico negra es opaca en el visible pero transparente en el IR. Arriba, derecha y abajo, vemos como un vidrio común es transparente al visible pero opaco en el IR.

En el caso de un recinto de vidrio, invernadero, Figura xx.9, la radiación del Sol pasa por el vidrio, pero la radiación emitida por la Tierra y los objetos interiores, que están a más baja temperatura ($T \sim 30^\circ\text{C}$), lo hacen en la región de infrarrojo (IR), que no escapa con facilidad del recinto ya que el vidrio si bien es transparente al visible, es opaco al IR, ver Figura xx.8.B) y C) y también Figura xx.10. Algo similar ocurre en la atmósfera terrestre, Figura xx.8.A). La radiación térmica de la superficie de la Tierra es en gran medida absorbida por los gases de efecto invernadero (GEI), vapor de agua, metano, CO_2 , ozono, etc. La radiación absorbida es re-emitida en todas direcciones. Como resultado, la temperatura de la superficie de la Tierra es mayor, en unos 30°C aproximadamente, que lo sería si no hubiese efecto de invernadero. La Luna, que no tiene atmósfera, y en promedio está a igual distancia del Sol que la Tierra, tiene una temperatura media en su ecuador de unos $-19^\circ\text{C} \pm 4^\circ\text{C}$. Asimismo su amplitud térmica es notable, varía entre: 110°C y -153°C ! Estos datos ilustran el efecto moderador de la temperatura que ejerce la atmósfera terrestre. El efecto invernadero fue descubierto y explicado por J. Fourier [12], J. Tyndall [13] y S. Arrhenius [14]. Si la Tierra fuese un cuerpo negro, su temperatura de equilibrio sería, en ausencia de efecto de invernadero (EI) de unos 5°C . Dado que la *reflectividad* de la Tierra es de aproximadamente el 30% (*albedo*), su temperatura de equilibrio, en ausencia de EI, sería de unos -18°C . El efecto de invernadero eleva la temperatura media de la Tierra en unos 27°C , para dejarla en un agradable promedio de 15°C . Ver sección de temperaturas de los planetas.

Variación de la temperatura en la expansión de un gas

Posiblemente todos hemos experimentado el hecho de que cuando inflamos la rueda de una bicicleta con un inflador manual, el extremo de este por donde sale el aire, se calienta. Este fenómeno ocurre toda vez que se comprime un gas sin que entre o salga energía del sistema (proceso adiabático). Por ejemplo, en el caso del inflador, la compresión ocurre rápidamente y no da tiempo para que se intercambie energía con el medio. Este proceso es reversible, es decir si se expande el gas, él se enfría. De hecho, un refrigerador funciona gracias a este principio. Un gas comprimido por el compresor de la heladera se descomprime rápidamente en la región del congelador, enfriándose y tomando calor del medio. Este mismo principio opera en gran escala en el Universo. A medida que el Universo se expande, el mismo se va enfriando. Podemos determinar la temperatura media del Universo, midiendo la radiación electromagnética de fondo. En las secciones que siguen investigaremos este efecto en más detalle.

♣ ♣ Radiación Cómica de Fondo (CMB)

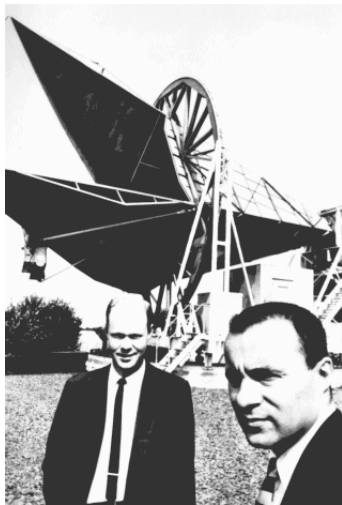


Figura xx.11. Penzias y Wilson recibirían el premio Nóbel de Física en 1978 por el descubrimiento de la radiación cósmica de fondo (CMB). G.Gamov, uno de los primeros en predecir su existencia en los años 40, murió unos diez años antes.

Haciendo una analogía, podemos decir que la evolución del Universo equivaldría, en cierta forma, a lo que ocurre con una nube de vapor de agua que se expande al subir por la atmósfera. A medida que se expande se enfría, el vapor se transforma en líquido, el líquido se condensa en gotitas de agua que finalmente precipitan en forma de lluvia. La relación entre expansión y enfriamiento es tan estrecha, que los científicos han logrado, a partir de ella, calcular con gran exactitud la temperatura teórica a la que debería encontrarse el Universo en la actualidad. Tal temperatura es de 3 K (en la escala absoluta de Kelvin) ó -270 grados Celsius bajo cero.

Como vimos antes, un cuerpo a una temperatura determinada emite radiaciones electromagnéticas características de esa temperatura (ver Figura xx.7) y era de esperarse que existiese algún tipo de radiación que confirmase los 3 K calculados para el Universo. No fue sino hasta 1964 cuando los ingenieros de la Bell Telephone Arno Penzias y Robert Wilson, efectuando mediciones de ondas de radio en New Jersey, descubrieron una radiación de fondo que interfería con su trabajo y que no podían eliminar, ya que parecía provenir de todo el Universo. Inmediatamente dieron la noticia a los físicos de la Universidad de Princeton que trabajaban en la teoría del Big Bang [15], [16].

Ellos confirmaron que dicha radiación era el "fósil físico" buscado por los científicos que correspondería a la radiación electromagnética que emite un cuerpo a 3 grados Kelvin. Naturalmente, este descubrimiento, uno de los más importantes de la radio astronomía, significó un fuerte respaldo a la teoría del Big Bang. Penzias y Wilson recibieron el premio Nóbel de física por el descubrimiento de lo que posteriormente se denominó "radiación térmica cosmológica" o CMB. De hecho, se estima que cerca del 10% del ruido de fondo que se observa en un televisor común, al sintonizar en un canal no ocupado por una señal de una emisora, esa especie de *lluvia* es consecuencia de la radiación de fondo. Es interesante notar que la radiación CMB puede detectarse con un simple televisor. Cuando un TV se sintoniza en una canal sin servicio, se ve una especie de "lluvia" y se escucha un ruido característico. Aproximadamente, 10% de ese ruido proviene de la CMB, o sea es una señal primordial antiquísima.

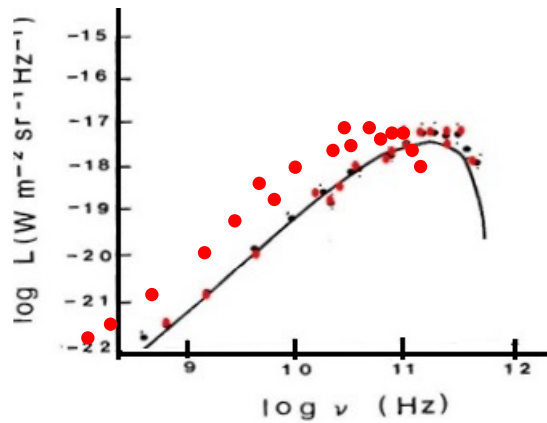


Figura xx.12. Espectro de radiación de fondo cósmica medida por Penzias y Wilson. Los puntos discretos son los valores medidos. La curva continua es la predicción de la radiación de un cuerpo negro a la temperatura $T=3$ K ($=270$ °C).

En resumen:

- ✓ El espectro de la radiación de fondo (CMB) corresponde al de un cuerpo (negro) a la temperatura de 2.725 Kelvin.
- ✓ La CMB es una reliquia del momento en que el Universo estaba muy caliente, era muy denso y opaco. Mas precisamente del instante en que la temperatura era tal, que los fotones interactuaban fuertemente con los átomos de H ionizándolos. A mediada que el Universo se enfrió, la radiación no pudo seguir ionizando los átomos, es decir la radiación se desacopló de la materia y siguió viajando hasta el presente.
- ✓ Los puntos más calientes o "Hot spots" en la CMB resultan de fluctuaciones en la temperatura del Universo en el momento del desacople de la radiación con la materia.

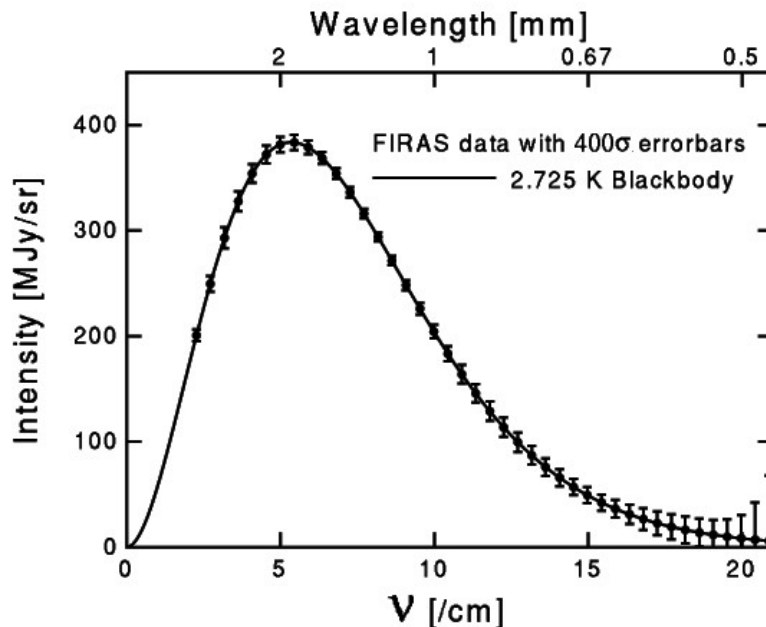


Figura xx.13. Espectro de radiación de fondo cósmica obtenido en la década de los 90 con el instrumento FIRAS del Satélite COBE de la NASA. La línea continua corresponde a la radiación de un cuerpo negro a $T=2.725$ K.

7. Aislación térmica de interiores – Calefacción y refrigeración de viviendas

Imaginemos una vivienda simple, consistente en una cabaña de lado a y b . Su altura es h . Consta de una puerta y una ventana. Por supuesto techo y paredes. Ver Figura xx.15. Además, vamos a suponer que todo el aire interior se renueva n veces por hora. Supondremos que la temperatura exterior es T_{ex} y la interior es T_{in} ($> T_{ex}$), por lo tanto $\Delta T = T_{in} - T_{ex}$.

En general las paredes y el techo están formadas de varias capas, con distintos espesores de materiales (revoque fino, revoque grueso, paredes, capa de aislación, etc. que se disponen en serie como se indica en la Figura xx.14.

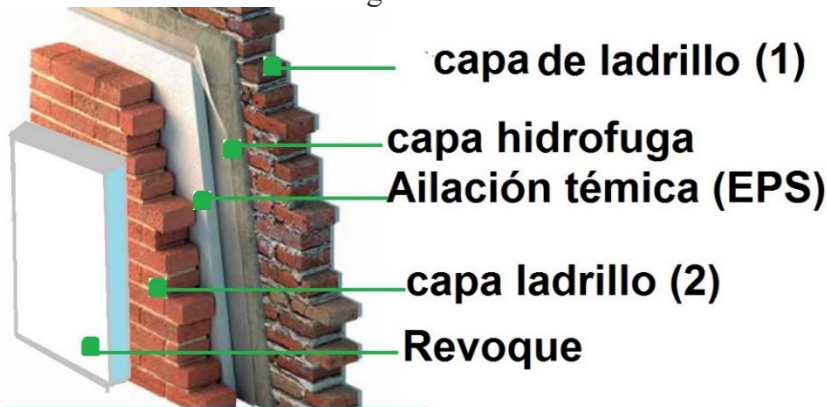


Figura xx.14. Ejemplo de paredes construidas de diversas capas: Revoque (1), capa de ladrillo (1), capa hidrófuga, aislación térmica (EPS), capa ladrillo (2), revoque (2). En este caso todas las capas están en serie. Por lo tanto, sus resistencias térmicas se suman.

Transmitancia térmica o valor U o K (U-Value)

La **transmitancia térmica** de un material (como el ladrillo, el hormigón, etc.) o un conjunto compuesto (como una pared o una ventana) se expresa como un valor U, a veces K (mayúscula). Como vimos antes, Ec.(xx.5), la transmitancia es igual a la inversa de la resistencia equivalente de un compuesto por unidad de área. En definitiva, es igual a la potencia transmitida de por el sistema, por unidad de área cuando la diferencia de temperatura entre las dos caras externa del mismo es de 1K. Se mide en general en el SI por $W/K.m^2$. Las transmitancias térmicas de la mayoría de las paredes y techos se pueden calcular utilizando diversas normas internacionales como la ISO 6946 o nacionales IRAM 11.601, de modo que, al adquirir una puerta, una ventana o un tabique, mirando el valor U indicado, ya tenemos una idea del nivel de aislación térmica de un material o componente. En la Tabla xx.4, se muestran algunos valores característicos de varios componentes comunes de construcción. En la Figura xx.14 se indican algunos valores de U o K para paredes típicas. [17], [18]

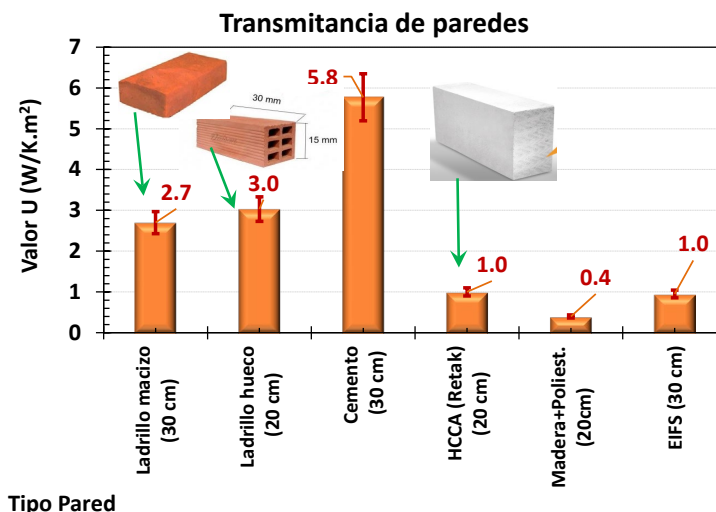


Figura xx.15. Ejemplo de paredes típicas usadas en la construcción.

Tabla xx.4 – Tabla de transmitancia de algunos materiales de construcción. Los datos fueron obtenidos de la Ref. ([17]).

	Valor U (W/K.m2)	k (K.m/W)
Ladrillo macizo (30 cm)	2.70	0.9
Ladrillo hueco (20 cm)	3.03	0.33
Cemento (30 cm)	5.77	0.052
HCCA (Retak) (20 cm)	1.00	
Madera+Poliest. (20cm)	0.40	
EIFS (30 cm)	0.95	
Ladrillo macizo 30cm + revoque (4 cm)	2.41	
Ladrillo hueco (20cm) + revoque 4cm	1.54	
Ventana Vidrio Simple	5.82	
Ventana Vidrio Doble (DVH)	3.08	
Ventana Vidrio Simple + Cort. Madera (cerrada)	2.79	

Nota: Cuando se indica la transmitancia U de un elemento por unidad de área, por ejemplo, una pared o un tipo de ventana o una placa de yeso, lo que se brinda es la Transmitancia total, en la que ya se incluyen los efectos de capa de aire. Así, para la pared del ejemplo de la Tabla xx.4, el valor de $U(\text{pared sin EPS}) = 2,15 \text{ W/m}^2.\text{K}$ y $U(\text{pared con EPS}) = 0,88 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

NOTA: tanto la resistencia térmica (R_{ter}) como la transmitancia térmica (U_{ter}), a veces se expresan por elemento completo (pared, etc.) incluyendo su área. Otras veces se expresan por unidad de área. Una forma de identificarlas, además de lo que se explica en el texto, es observar las unidades. Por ejemplo, la transmitancia por unidad de área se expresa en $\text{W/m}^2.\text{K}$, y la resistencia por unidad de área como $\text{m}^2.\text{K/W}$.

Ejemplos de cálculo de transmitancias térmicas de paredes compuestas

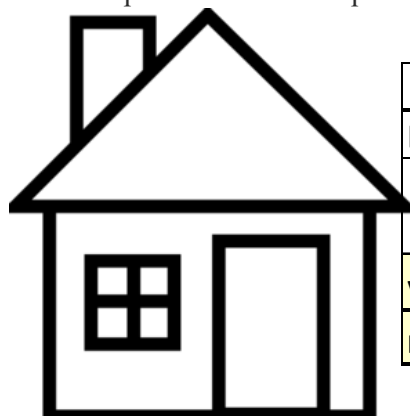
En la Tabla xx.5, se muestra un ejemplo de cálculo de la transmitancia de las paredes y techos.

Paredes				
Capas		Espesor	k	R (Unidad de área)
		(mm)	(W/m.K)	(m2.K/W)
1	Capa Límite Interior (aire)			0,13
2	Revoque fino	5	0,7	0,007
3	Revoque grueso	15	0,93	0,016
4	Ladrillo macizo	300	0,81	0,370
6	Placa EPS	20	0,037	0,541
7	Revoque grueso	20	0,93	0,022
8	Capa Límite Exterior (aire)			0,05
	Resistencia Total (m ² ,K/W)	Con EPS		1,13
	Transmitancia (W/K.m ²)	Con EPS		0,88
	Resistencia Total (m ² ,K/W)	Sin EPS		0,47
	Transmitancia (W/K.m ²)	Sin EPS		2,15

2,4

Techo				
Capas		Espesor	k	R (Unidad de área)
		(mm)	(W/m.K)	(m2.K/W)
1	Capa Límite Interior (aire)			0,13
2	Revoque fino	5	0,7	0,007
3	Revoque grueso	15	0,93	0,016
4	Loza	300	0,83	0,361
5	Placa EPS	50	0,037	1,351
6	Revoque grueso	20	0,93	0,022
7	Capa Límite Exterior (aire)			0,05
	Resistencia Total (m ² ,K/W)	Con EPS		1,88
	Transmitancia (W/K.m ²)	Con EPS		0,53
	Resistencia Total (m ² ,K/W)	Sin EPS		0,46
	Transmitancia (W/K.m ²)	Sin EPS		2,19

Tabla xx.5 – Cálculo de transmitancia de paredes y techos. Los datos fueron obtenidos de la Ref. ([18], [19]). Como vimos en las secciones anteriores, en paredes y techo hechas con capas en serie, las resistencias térmicas parciales se suman para obtener la resistencia total.



			Transm (W/K)
Dimensiones	Lado a (m)=	5	
	Ancho b (m)	6	
	Altura h (m)=	2,8	
Vidrios	A_{vidrios} (m ²)	10	5,8
Puertas	A_{puertas} (m ²)	1,44	2,77

Figura xx.16. Esquema simple de una vivienda. En este caso, tanto las paredes, como el techo, las puertas y las ventanas, son elementos que transmiten el calor en paralelo. Por lo tanto, sus transmitancias totales se suman.

Si suponemos un techo plano y paredes y techos como los descritos en la Tabla xx.5 y Figura xx.16, tenemos:

DGD=	850	Sin EPS			Con EPS			
	Sup (m2)	Transm (W/m2.K)	Consumo (kWh/año)	Porcentaje	Transm (W/m2.K)	Consumo (kWh/año)	Porcentaje	
Superf.(m2)=	30							
Volumen(m3)	84							
Superf. Later.(m2)	59,2							
Techo	30	2,19	1.341	23%	0,53	325	12%	
Pared	59,2	2,15	2.596	44%	0,88	1.068	41%	
Aberturas	10	5,80	1.183	20%	2,15	439	17%	
Puertas	2,88	2,77	163	2,8%	2,88	169	6,5%	
Renov.Aire	1	29,40	600	10%	29,40	600	23%	
Total (kWh/año)			5.883	100%	36	2.601	100%	2,3
Total (m3/año) GN			545			241		

Tabla xx.5 – Cálculo de transmitancia de paredes y techos. Valores de referencia de la Tabla xx.4 y Figura xx.14. Los datos fueron obtenidos de la Ref. ([18]). Los cálculos se realizaron suponiendo EPS en paredes y techos con los espesores indicados en la tabla y sin EPS. Para el caso de la casa con EPS, se usaron ventanas mejoradas (vidrio doble) la puerta es la misma en los dos casos. Nótese la influencia de la Aislación en el consumo anual. Hay un factor de consumo de 2,3. En este caso, tanto las paredes, como el techo, las puertas y las ventanas, son elementos que transmiten el calor en paralelo. Por lo tanto, sus transmitancias totales se suman.

7 Consumo de calefacción de una vivienda

Para la casa, tanto las paredes, como el techo, las puertas y las ventanas (aberturas), son elementos que transmiten el calor en paralelo. La discusión realizada en esta sección sigue las pautas de la Norma IRAM 11601/2004 [20]. Por lo tanto, sus Transmitancias totales ($U_T = U \cdot A = 1/R$) se suman. Ec. Xx.11. Esto es:

$$U_{tot} = \frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots = U_{T_1} + U_{T_2} + \dots \quad (\text{xx.49})$$

Por lo tanto, para una dada diferencia térmica ΔT entre el exterior e interior la potencia que deberemos suministrar a la estufa interior será:

$$P(W) = U_{tot} \times \Delta T. \quad (xx.50)$$

El consumo diario, para una *temperatura media diaria externa* $T_{ex}(i)$, será:

$$Consumo(Wh) = 24 \times U_{tot} \times (T_{in} - T_{ex}(i)). \quad (xx.51)$$

Para calcular el consumo medio anual tenemos que sumar sobre todos los días en el año que la *temperatura media diaria sea menor que la temperatura de referencia* T_{in} . O sea:

$$Consumo(kWh) = 0,024 \times U_{tot} \times \sum_{T_{in} > T_{ex}} (T_{in} - T_{ex}(i)). \quad (xx.52)$$

O usando en concepto de Déficit Grado Día (DGD):

$$Consumo_{anual}(kWh) = 0,024 \times U_{tot} \times DGD_{año}. \quad (xx.53)$$

Lo interesante de esta expresión es que, para una vivienda, el **consumo de energía** para calefacción depende de dos factores independientes: la **Transmitancia** U_{tot} de la envolvente (paredes, techo, aberturas, etc.) que depende de las características constructivas de la envolvente y de las condiciones térmicas del lugar donde está la vivienda a través de **DGD**_{año}.

Por otra, para calcular **la potencia** de los calefactores a usar, se toma una temperatura de invierno de referencia, que es representativa de las temperaturas media mínimas T_{min_ref} que se esperan acurrar en un día típico de invierno en esa zona. Un criterio practico, puede ser definir el valor de T_{min_ref} como la temperatura media de los 10 días más fríos del año en esa zona. Según (xx.50), la potencia requerida sería:

$$P(W) = U_{tot} \times (T_{in} - T_{min_ref}). \quad (xx.54)$$

Donde T_{in} es la temperatura de confort de referencia, típicamente $T_{in}=18^{\circ}C$. Para Buenos Aires, podríamos tomar $T_{in}=5^{\circ}C$, lógicamente si estamos en una ciudad con temperaturas invernales menores, este valor será menor y repetitivo de las temperaturas medias diarias más bajas registrada en ese lugar. Para Buenos Aires, $(T_i - T_{min_ref}) = (18-5)K=13 K$, tenemos:

$$P(W)|_{BA} = 13 \times U_{tot}. \quad (xx.55)$$

Perdidas de calor por renovaciones de aire.

Toda vivienda necesita realizar renovaciones de aire permanentemente. Estas renovaciones son necesarias para sacar el aire viciado, olores etc. A veces estas renovaciones ocurren por infiltraciones involuntarias o por efectos buscados a propósito. Vamos a suponer que la vivienda tiene un volumen de aire V_{air} , cuya densidad llamamos ρ_{air} y calor específico c_{air} . Vamos a suponer que hay n renovaciones de este volumen de aire por hora. Suponemos que el aire nuevo entra a la temperatura exterior, T_{ex} y la temperatura interior es $T_{in}(\approx 18^{\circ}C)$. En calor que se debe aportar por hora por las n - renovaciones de aire será:

$$\Delta E = n \cdot V_{air} \cdot \rho_{air} \cdot c_{air} \cdot (T_{in} - T_{ex}). \quad (xx.56)$$

En consumo energético diario asociado a un día (de 24 horas) i en este intercambio será:

$$\Delta E_{día}(Wh) = 24 \cdot n \cdot V_{air} \cdot \rho_{air} \cdot c_{p_air} \cdot (T_{in} - T_{ex}(i)), \quad (xx.57)$$

donde ($\rho_{air}= 1,225 \text{ kg/m}^3$ y $c_{p_air}= 1,04 \text{ kJ/kg.K}$), por lo tanto: $\rho_{air} \cdot c_{p_air}=1,27 \text{ kJ/m}^3.K= 0.35 \text{ Wh/m}^3.K$. Así, el consumo anual será:

$$\Delta E_{año}(kW) = 0,024 \cdot n \cdot V_{air} \cdot \rho_{air} \cdot c_{p_air} \cdot DGD = 0,024 \cdot 0,35 \cdot n \cdot V_{air} \cdot DGD_{año}. \quad (xx.58)$$

Para el caculo de la potencia, suponiendo un salto térmico entre el interior y exterior de ΔT , por un razonamiento análogo, tenemos

$$P(W) = n \cdot V_{air} \cdot \rho_{air} \cdot c_{p_{air}} \cdot \Delta T = 0.35 \cdot n \cdot V_{air} \cdot \Delta T. \quad (xx.59)$$

Dado que este intercambio de calor por renovaciones de aire, sobre todo en viviendas con buena aislación térmica, es en muchos casos muy importante, se han desarrollado equipos especiales [20], [21] (*heat recovery ventilation* o ventilación con intercambiadores de calor) que al renovar el aire, realizan un intercambio de calor, es decir el aire caliente que sale, entrega parte de su calor al aire frío que entra, como se indica esquemáticamente en la Figura xx. 17 así si la eficiencia de transferencia de calor del equipo es f , el aporte de calor por intercambio de aire resulta:

$$\Delta E_{año}(kWh) = 0,024 \cdot 0,35 \cdot n \cdot (1 - f) \cdot V_{air} \cdot DGD_{año} \quad (xx.60)$$

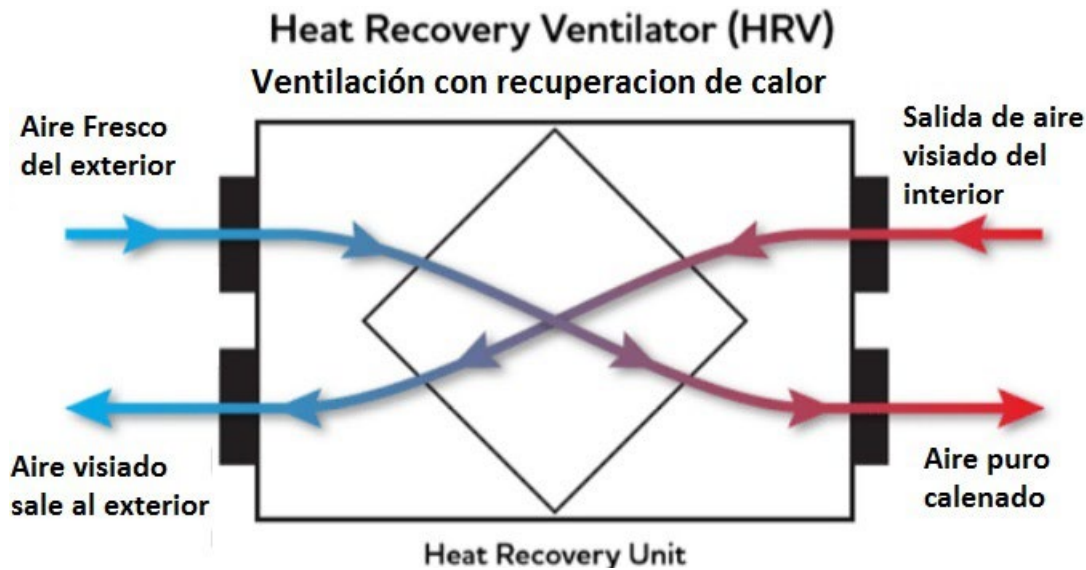


Figura xx.17. Esquema de un sistema de ventilación con intercambiadores de calor o *heat recovery ventilation* (HRV). [22], [23]

Combinando esta expresión con la Ec.(xx.54) tenemos que el consumo anual de una vivienda con n renovaciones de aire por hora será:

$$\Delta E_{año}(kWh) = 0,024 \times (U_{tot} + 0,35 \cdot n \cdot (1 - f) \cdot V_{air}) \times DGD_{año}. \quad (xx.61)$$

Mientras que la potencia será:

$$\begin{aligned} P(W)|_{BA} &= (U_{tot} + 0,35 \cdot n \cdot (1 - f) \cdot V_{air}) \times (T_{in} - T_{min \text{ ref}}) = \\ &= 13 \times (U_{tot} + 0,35 \cdot n \cdot (1 - f) \cdot V_{air}). \end{aligned} \quad (xx.62)$$

Coefficiente Volumétrico de pérdida de calor de un edificio G

Muchas veces resulta útil disponer de un solo coeficiente que represente las pérdidas globales de calor de un edificio o vivienda. De hecho si partimos de la Ec.(xx.61) definimos el parámetro G como:

$$G = \frac{\Delta E_{año}(kWh)}{0,024 \times V_{air} \times DGD_{año}} = \frac{U_{tot}}{V_{air}} + 0,35 \cdot n \cdot (1 - f). \quad (xx.63)$$

Aquí U_{tot} es la transmitancia total de la envolvente dada por la Ec.(xx.49). Para viviendas típicas de unos 50m² a 100 m² de superficie y altura de 2,7m, con una superficie vidriada inferior al 20%, las regiones templadas (como el centro de Argentina) se sugiere un valor de G inferior a 1,8, pero para regiones muy frías como Bariloche, por ejemplo, el valor recomendado de G debe ser inferior a 1,5. Estos valores se discuten en detalle en la Norma IRAM 11604. Alternativamente, conociendo el valor del G, se puede estimar el consumo energético para calefacción como:

$$\Delta E_{año}(kWh) = G \times 0,024 \times V_{air} \times DGD_{año}. \quad (xx.64)$$

Las unidades de G son kWh/m³.K, los valores extraídos de las figuras xx.21 son conscientes con los que se muestran en la Tabla 5.

Esto muestra la potencialidad que tiene la mejora de las envolventes en reducir los consumos energéticos para acondicionamiento térmico de viviendas y edificios. Este valor viene representado por la última columna de la Tabla xx.7

Tabla xx.7 - Valores de G (kWh/m3.K)				
	G_medio	G_desvStd	Dispers.%	Mejora
U.E.	0,49	0,09	18%	3,6
RA_Centro	1,6	0,6	35%	1,1
RA_prom	1,8	0,6	35%	1,0
RA_Sur	2,77	0,04	1%	0,6

8. Temperaturas efectivas, Déficit Grado Día (DGD) y Exceso Grado Día (EGD)

Para describir la necesidad de calefacción en una dada ciudad, resulta útil introducir el concepto de *Déficit Grado Día*. Como se comentó previamente demanda de calefacción está fuertemente asociada a la temperatura y esta componente del consumo depende de la diferencia entre la temperatura interior, representada por T_{ef} , y una temperatura de referencia, T_{ref} , próxima a la temperatura de confort. Hay gran consenso en que la temperatura de confort [24] se encuentra en el rango de 20°C a 25°C. Se observa que a medida que la temperatura efectiva defiende por debajo de 18°C, la calefacción de las viviendas se va incrementando monótonamente. Por tal razón es usual definir la temperatura de referencia $T_{ref}=18^\circ\text{C}$. A la diferencia ($DGD_{(día)} = (T_{ref} - T_{ef})_{día}$) la llamamos *Deficiencia Grado Día* o *Déficit Grado Día*. También es útil definir la $DGD_{(mes)}$ y $DGD_{(año)}$ como:

$$DGD_{(mes)} = \sum_i^{mes} (T_{ref} - T_{ex}(i))_{(T_{ref}-T_{ex}(i))}. \quad (xx.65)$$

y

$$DGD_{(año)} = \sum_i^{año} (T_{ref} - T_{ex}(i))_{(T_{ref}-T_{ex}(i))}. \quad (xx.66)$$

de cada zona para cada mes o año.

De este modo el consumo anual de calefacción resulta:

$$E \left(\frac{kWh}{año} \right) = 0,024 \times U_{tot} \times DGD \quad (xx.67)$$

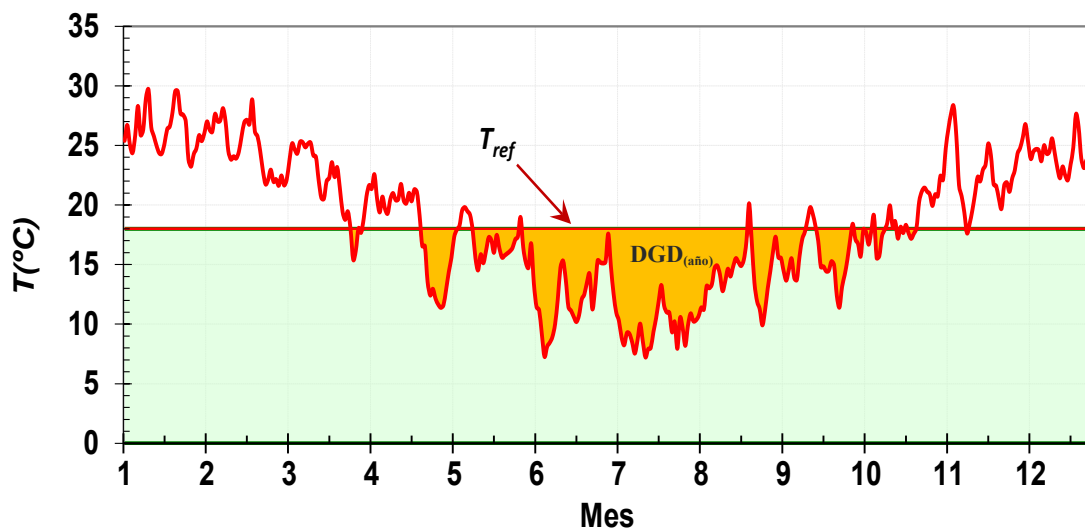


Figura xx.18. Representación de la temperatura efectiva, T_{ef} , diaria a lo largo de un año, la línea horizontal, representa la temperatura de referencia, $T_{ref} \approx 18^\circ\text{C}$, la $DGD_{(año)}$ viene dada por el área sombreada de esta gráfico. Los datos consignados corresponden a la Ciudad de Buenos Aires (CABA). La temperatura media anual es de $17,7^\circ\text{C}$ y la media invernal de $12,6^\circ\text{C}$.

Si se grafican las temperaturas efectivas diarias a lo largo de un año, ver Figura xx.18, el valor de $DGD_{(año)}$ viene dado por el área sombreada entre la temperatura de referencia y la curva que describe la temperatura media diaria. Dado que los números de usuarios varía a lo largo del tiempo, arrastrando consigo el consumo total, para analizar el comportamiento del consumo, resulta adecuado estudiar la variación del consumo por usuario, es decir el consumo total de cada día, mes o año, dividido por el número de usuarios. Este parámetro, llamado en consumo específico por usuario, permite analizar mejor en comportamiento del consumo a lo lardo de varios años, independientemente de la variación del número de usuarios.

Asimismo, es posible para cada región definir una deficiencia media diaria para cada mes del año ($DGD_{(mes)}$). De hecho, como las temperaturas medias mensuales varían fuertemente a lo largo del año, como así también los consumos específicos medios de cada mes, es posible analizar cómo varían los consumos de gas Residencial+ Comercial y Oficial (R+C+EO) con $DGD_{(mes)}$, como se muestra en la Figura xx.19 [25].

La Figura xx.18 muestra que los consumos asociados a la calefacción, son proporcionales a la $DGD_{(mes)}$. La ordenada en el origen está relacionada con el *consumo base*, es decir el consumo de gas asociado al calentamiento de agua sanitaria y a la cocción. De igual forma puede mostrarse que los consumos anuales asociados a la calefacción son, asimismo, proporcionales a las $DGD_{(año)}$. Esta relación entre *consumo* y DGD se observa que es válida para todas las ciudades y regiones de Argentina, pero presentando una variación en su comportamiento en el sur del país [25] debido a los mayores subsidios al gas que se aplican en esta región. La relación entre consumo de calefacción y DGD nos permite conocer en promedio los consumos de gas de distintas ciudades y regiones del país para las que podemos conocer el $DGD_{(año)}$.

El concepto de Déficit Grado Día (DGD) es utilizado en muchos lugares del mundo para caracterizar los consumos por calefacción. De hecho, en las normas IRAM de acondicionamiento térmico de edificios (IRAM 11604) utilizan este parámetro para el diseño y cálculo de los de la aislación térmica en cada región bioclimática de Argentina. Las Ecs. xx.54 y xx.60, son la justificación física de este comportamiento.

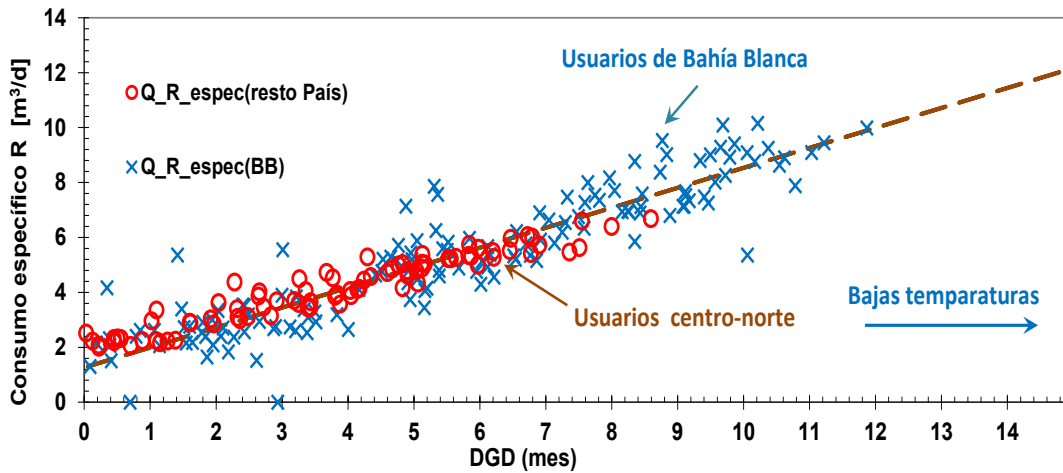


Figura xx.19. Variación de los consumos específicos diarios R, promediados para cada mes, en función del DGD (mes) de cada mes. Los círculos rojos indican los datos de consumo de los usuarios R para la zona norte y central de Argentina. Las cruces corresponden a la zona de Bahía Blanca, que por tener temperaturas relativamente más bajas, presenta valores de DGD (mes) más altas. Como puede verse, el consumo varía linealmente con DGD (mes). La ordenada en el origen corresponde al consumo base.

En la Figura xx.19, se muestra la variación de los parámetros DGD ($T_{ref}=18^{\circ}\text{C}$) para los años 1944 hasta 2018 y el EGD, referido a $T_{ref}=24^{\circ}\text{C}$, que mide la necesidad de refrigeración en verano.

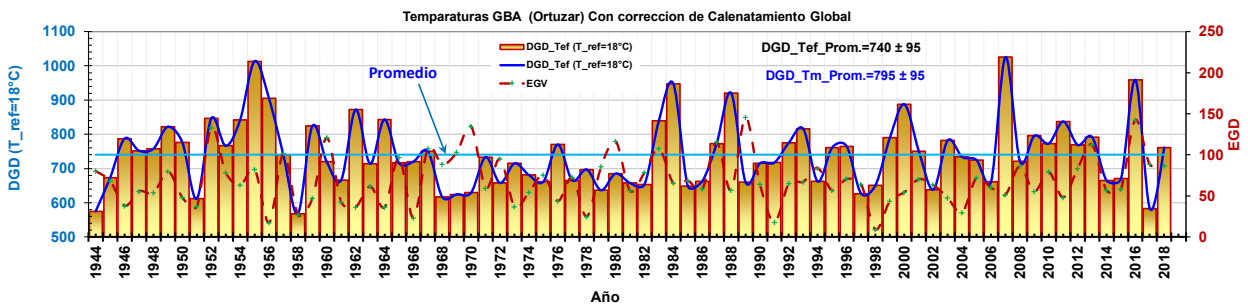


Figura xx.20. Variación de los coeficientes DGD para los años 1944 a 2014, el DGD, representado por la curva azul barras, está referido al eje vertical izquierdo. El EGD, que mide la necesidad de refrigeración está representado por la curva roja de trazos, referida al eje vertical derecho.

Un análisis de los resultados mostrados en la Figura xx.20, se ve que escenarios térmicos comparables al año 2007, tiene una probabilidad de ocurrencia de 2 veces en 70 años o sea del 3%. Por otro lado, eventos de frío intensos, como los ocurridos en el año 2000 tiene una recurrencia de 11 veces en 70 años o sea del 16%.

De modo análogo, se puede estimar el ahorro producido por aumentar en un grado la temperatura de los acondicionadores de aire. Para este análisis, es útil definir el Exceso de grado día anual como:

$$EGD(\text{año}) = \sum_{i=1}^{i=365} (T_{media} - T'_{ref}) \Big|_{T_{media} > T'_{ref}}, \quad (\text{xx.68})$$

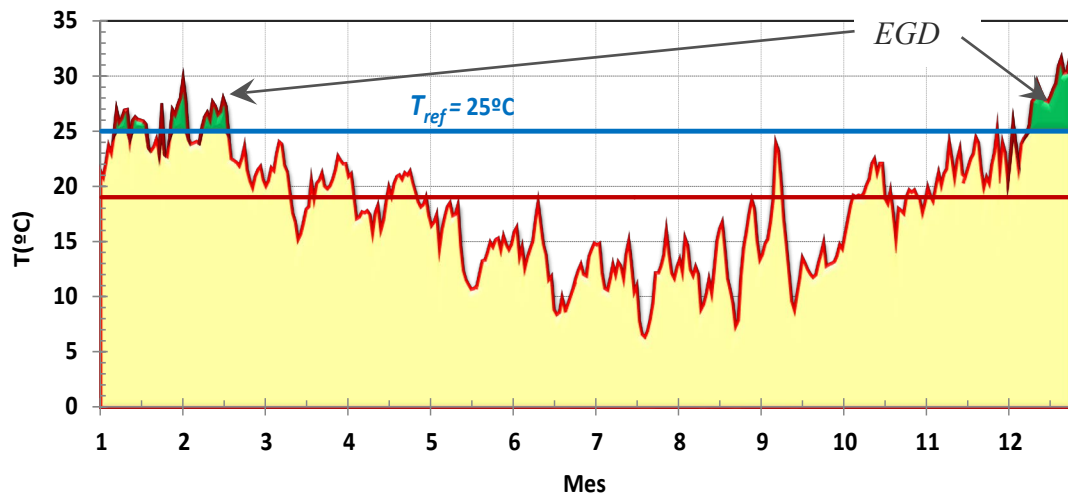


Figura xx.21 Representación de la temperatura media diaria a lo largo de un año, la línea horizontal, representa la temperatura de referencia, $T_{ref} \approx 25 \text{ °C}$, el $EGD_{(año)}$ viene dada por el área sombreada en verde de este gráfico. Estos datos corresponden a la ciudad de Buenos Aires.

El área sombreada en verde de la Figura xx.20 ilustra el valor del EGD para el caso de Buenos Aires en 2013. En este caso, la temperatura de referencia T'_{ref} se toma $\approx 25 \text{ °C}$ a veces se usa $T'_{ref} \approx 24 \text{ °C}$. De este modo, el EGD indica la magnitud de la necesidad de refrigeración y es de esperar que sea proporcional a la energía utilizada en refrigeración de ambientes interiores. Dado análogo a las Ec.(xx.67), podemos escribir que las necesidades de refrigeración se pueden escribir como:

$$E_{refr} \left(\frac{kWh}{año} \right) = 0,024 \times U_{tot} \times EGD \quad (xx.69)$$

O incluyendo las renovaciones de aire:

$$E_{refr} \left(\frac{kWh}{año} \right) = 0,024 \times (U_{tot} + 0,35 \cdot n \cdot (1 - f) \cdot V_{air}) \times EGD \quad (xx.70)$$

Así vemos que una casa con buena aislación puede ser adecuada tanto para verano como invierno. Sin embargo, esta ecuación no incluye un aspecto muy importante cómo el buen diseño, la buena orientación, etc. que pueden hacer una casa mucho más sustentable energéticamente y con mayor confort. Pero caramente la aislación térmica de la envolvente, determinada por U_{tot} , juega un rol clave.

Por último, en la Figura xx.22 se muestran los $DGD_{año}$ promedio para varias ciudades de Argentina y Europa, que dan una idea de las diferentes necesidades de calefacción es esto lugares y por lo tanto diferentes necesidades de aislación termina de las envolventes en cada lugar. Este grafico por si mismo sugiere lo poco efectivo que resulta trasladar modelos arquitectónicos de una región a otra si una muy cuidadosa adaptación a las distintas regiones bioclimáticas.

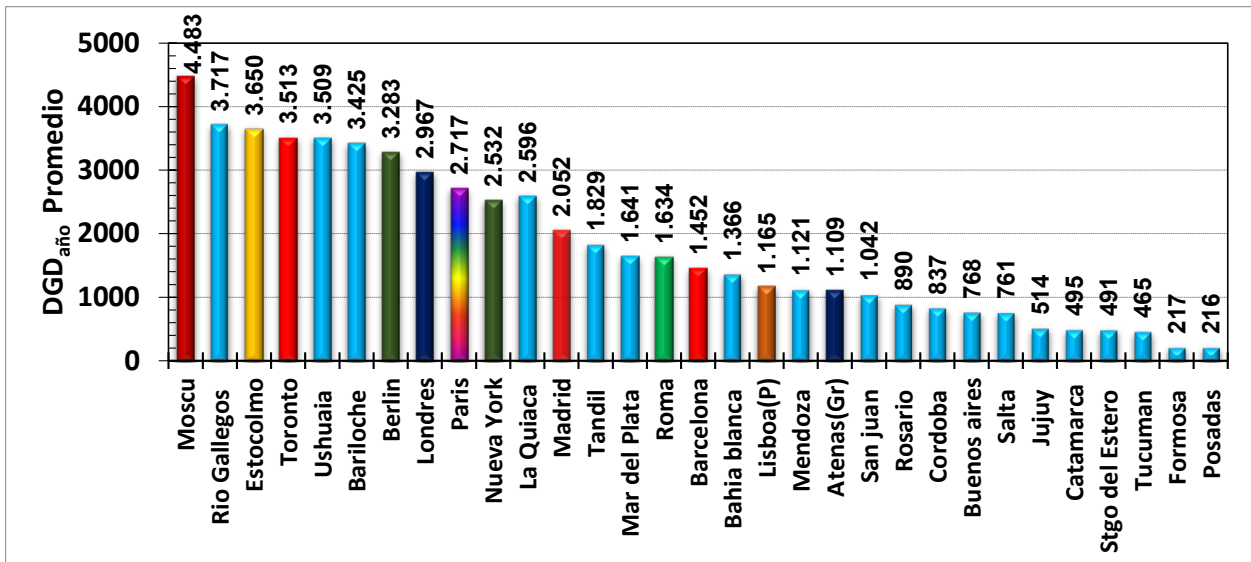


Figura xx.22 Representación de las $DGD_{año}$ promedio para varias ciudades de Argentina, América y Europa [26].

Por último, en la Figura xx.22 se muestra la relación entre los requerimientos de calefacción en diferentes ciudades del mundo, medidas en $kWh/m^2.año$ en función del $DGD_{año}$. Como se ve los efectos de una buena aislación térmica de la envolvente, es decir el coeficiente U_{tot} de la Ec.(xx.64), es crucial para determinar los niveles de consumo en calefacción.

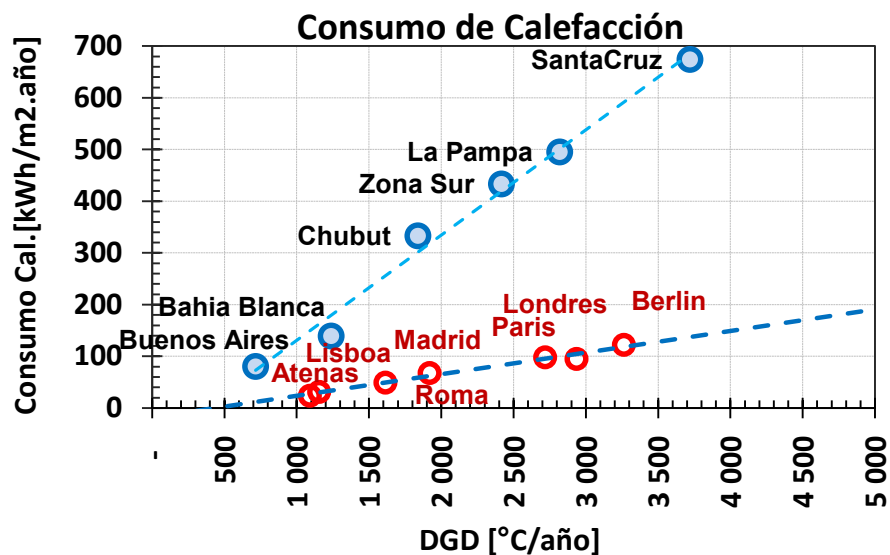


Figura xx.23 Relación entre los requerimientos de calefacción en diferentes ciudades del mundo, medidas en $kWh/m^2.año$ en función del $DGD_{año}$ para varias ciudades de Argentina y Europa. El hecho de que nuestros consumos sean tan altos, abre una importante oportunidad para la innovación en Argentina [25].

Ejemplo 1: A) Calcular las necesidades de calefacción en $kWh/año$ y m^3 (gas Nat.)/año de una vivienda de $a=6$ m x $b=10$ m, y altura $h=2,7$ m, en Buenos Aires. Con 12 m^2 de aberturas, que suponemos de vidrio simple (VS), de 4mm de espesor ($U_{VS}=5,82W/m^2.K$). Las paredes de ladrillo hueco, de 30 cm de espesor, con revoque grueso (7,5 mm) y fino (2,5 mm) de los dos lados. El techo lo suponemos plano de las mismas características que las paredes. B) Lo mismo con capa de EPS de 7 cm en paredes y techo. Suponga en este caso que las aberturas tienen vidrio doble (DVS) en las aberturas. Suponga en ambos casos un $n=1$ de renovación de aire por hora. Además suponga Para las aberturas: $U_{DVS}=2,15$ $W/m^2.K$; $U_{Puerta}=2,77$ $W/m^2.K$.

Solución. Siguiendo el mismo procedimiento de la Tabla xx.5 tenemos para las paredes y techo:

Paredes				
Capas		Espesor	k	R (Unidad de area)
		(mm)	(W/m.K)	(m2.K/W)
1	Revoque fino	5	0,7	0,007
2	Revoque grueso	15	0,93	0,016
3	Ladrillo macizo	300	0,81	0,370
5	Film Plástico			
6	Placa EPS	70	0,037	1,892
7	Revoque grueso	20	0,93	0,022
Resistencia Total (m ² .K/W)			Con EPS	2,31
Transmitancia (W/K.m ²)			Con EPS	0,43
Resistencia Total (m ² .K/W)			Sin EPS	0,42
Transmitancia (W/K.m ²)			Sin EPS	2,41

5,6

Techo				
Capas		Espesor	k	R (Unidad de area)
		(mm)	(W/m.K)	(m2.K/W)
1	Revoque fino	5	0,7	0,007
2	Revoque grueso	15	0,93	0,016
3	Loza	120	0,83	0,145
4	Placa EPS	70	0,037	1,892
5	Revoque grueso	20	0,93	0,022
Resistencia Total (m ² .K/W)			Con EPS	2,08
Transmitancia (W/K.m ²)			Con EPS	0,48
Resistencia Total (m ² .K/W)			Sin EPS	0,19
Transmitancia (W/K.m ²)			Sin EPS	5,28

Tabla xx.8 – Cálculo de transmitancia de paredes y techos. Los datos fueron obtenido de la Ref.(14). Con estas Transmitancias, podemos calcular los consumos de energía usando las Ec.(xx.64)

DGD=	850	Sin EPS			Con EPS	
	Sup (m2)	Transm (W/m2.K)	Consumo (kWh/año)	Porcentaje	Transm (W/m2.K)	Transm.T (kW)
Superf.(m2)=	60					
Volumen(m3)=	162					
Superf. Later.(m2)=	84					
Techo	60	5,28	6.464	49%	0,48	588
Pared	84	2,41	4.128	31%	0,43	743
Aperturas	12	5,80	1.420	11%	2,15	526
Puertas	1,44	2,77	81	0,61%	2,77	81
Renov.Aire	1	56,70	1.157	9%	56,70	1.157
Total			13.250	100%	63	3.095

Tabla xx.9 – Cálculo de transmitancia consumo asociado a cada elemento de la casa.

El consumo de gas se lo puede obtener a partir del hecho que 1 m³(GN)= 10,8 kWh. En la Fig.xx.22 se muestra la distribución de consumo de la casa en las dos situaciones. Se ve claramente que para hacer más efectiva la aislación térmica lograda en el segundo caso, es necesario instar algún sistema de recuperación del calor como el discutido en la Fig. xx.15, para reducir las pérdidas por renovaciones de aire.

En la Tabla xx.8 se indican valores típicos de transmitancia máximas de ventanas admitidas en varios países de Europa y el la ultima linea valores representativos de Argentina. Claramente, la eficiencia de una vntana depende de muchos otros factores que se deben de tener en cuenta como, porcentajes de superficie vidriada, niveles de insoloacion, infiltraciones de aire, iluminacion, etc. Las normas más recientes tando Europeas como nacionales tranta de acomodar estas complejidades. [27]

País	U (W/m ² .K)	País	U (W/m ² .K)	País	U (W/m ² .K)
Finlandia	1	Irlanda	1,6	Croacia	1,8
Noruega	1,2	Reino Unido	1,6	Francia	2
Alemania	1,3	Países Bajos	1,6	Suiza	2
Rumania	1,3	Hungría	1,6	Portugal	2,4
Dinamarca	1,4	Bulgaria	1,7	Macedonia	2,6
Austria	1,4	Polonia	1,7	Chipre	2,8

Eslovaquia	1,4	República Checa	1,7	Grecia	3
Luxemburgo	1,5	Bélgica	1,8	Italia	4,6
Lituania	1,6	Letonia	1,8	Malta	5,8
Ventana vidrio Simple 4mm	5,8	Ventana vidrio doble (4mm c/u)	2,15	Ventana vidrio doble (4mm c/u)	2

Tabla xx.10 – Valores máximos de transmitancia térmica completa (vidrio y marco en W/m²K) admisibles en Europa, Adaptado de Sack (2014) [28], última línea surge de la norma IRAM 11601 y Ref([29]). Sin embargo, en Argentina, la norma IRAM 11507-4 (2010) establece un valor máximo de 4 W/m²K (ventana completa) para certificar a la transmitancia térmica, por lo que en principio la mayoría de las ventanas que se usan en el país no cumplen esta norma!

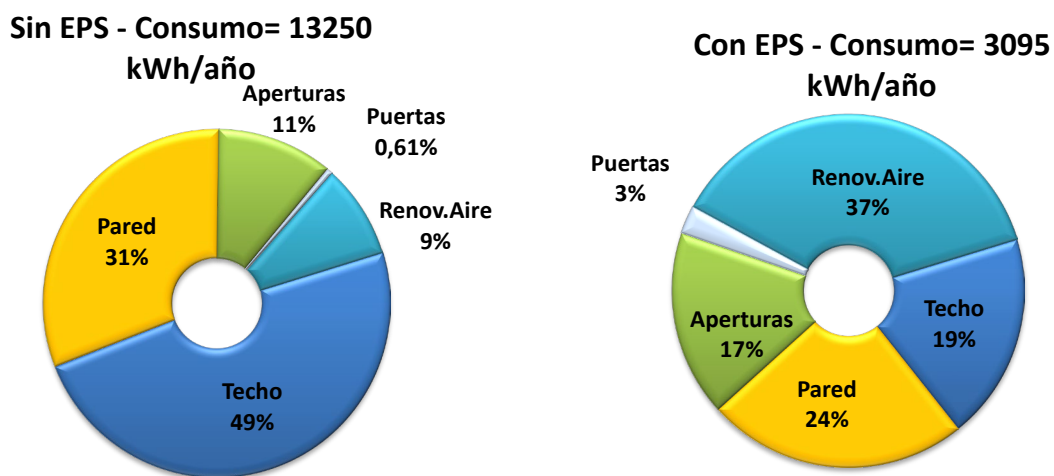


Figura xx.24 Distribución del consumo de la vivienda del ejemplo 1, en las dos situaciones descriptas: A) con poca aislación térmica (sin EPS) y con Buena aislación térmica (con EPS). Se ve que en el segundo caso el consumo se reduce en un factor 4,3 respecto del primero. Pero para reducir el consumo aún más, se requiere un equipo de ventilación con recuperación del calor como el discutido en la Fig. xx.16, para reducir las pérdidas por renovaciones de aire, que en el segundo caso son las más grandes (37%).

Enfriamiento y Evaporación

La evaporación es una transición lenta de las moléculas en la superficie de un líquido a la fase vapor. El vapor circundante, en la capa limita al líquido, en general pronto tiende a saturarse con la sustancia que se evapora. Cuando una molécula con alta energía cinética se acerca de la superficie, si su energía es mayor que un cierto valor, $\epsilon_{ev} = \frac{1}{2} \mu v_{esc}^2$, puede pasar a la fase vapor, es decir se evapora. Como las moléculas que preferentemente se evaporan, son la de mayor energía, $v > v_{esc}$, la que queda en la fase líquida tiene en promedio menos energía, es decir es proceso de evaporación genera enfriamiento. Ver Figura xx.24.

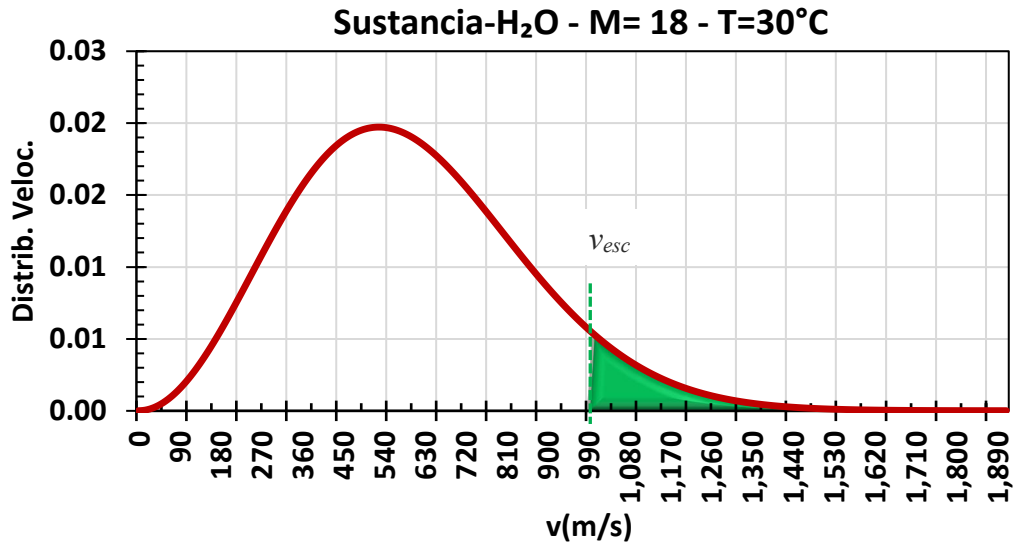


Figura xx.25. Distribución de las velocidades moleculares según la Ley de Maxwell-Boltzmann. A la izquierda se indican esquemáticamente: la velocidad más probable, media y la velocidad cuadrática media.

Las moléculas de un líquido preferentemente se evaporen, son la que están cerca de la superficie, deben moverse en la dirección adecuada y tener suficiente energía cinética para vencer las fuerzas intermoleculares de atracción de la fase líquida, es decir tiene energía cinética $\varepsilon > \varepsilon_{esc}$ [3]. Cuando solo una pequeña proporción de las moléculas cumple con estos criterios, la tasa de evaporación es baja. Dado que la energía cinética de una molécula es proporcional a su temperatura, la evaporación se acelera a temperaturas más altas. A medida que escapan las moléculas más energéticas, las moléculas restantes en la fase líquida se tienen menor energía cinética o sea la temperatura del líquido disminuye. Este fenómeno también se denomina enfriamiento evaporativo.

Este mecanismo lo podemos percibir fácilmente, mojándonos la de la mano con la lengua, si soplamos, experimentaremos una sensación de enfriamiento. De hecho, este es el mecanismo de enfriamiento natural de los humanos. Cuando hace calor, transpiramos, la brisa ayuda a evaporar la transpiración, de este modo nos refrescamos. Algunos animales, como los perros, usan la lengua como elemento de enfriamiento, cuando están acalorados jadean con la lengua afuera, lo que estimula la evaporación y enfriamiento de la lengua y su cuerpo. Asimismo, en los días húmedos, este efecto de evaporación se ve inhibido, ya que la humedad ambiente es próxima a la saturación. Con lo cual este mecanismo de enfriamiento se inhibe. De allí la famosa frase: “*lo que mata es la humedad.*”

Los sistemas de enfriamiento evaporativo utilizan el mismo principio que la transpiración para proporcionar enfriamiento a la maquinaria y los edificios. Una torre de enfriamiento es un dispositivo de rechazo de calor, que descarga aire caliente de la torre de enfriamiento a la atmósfera a través del enfriamiento del agua. Una cantimplora, con un paño humedecido, o una bota de vino funciona del mismo modo.

Consumo de calefacción y Refrigeración

Para describir la necesidad de calefacción en una dada localidad, resulta útil introducir el concepto de *Déficit Grado Día (DGD)* como vimos en las secciones previas, *Figura xx.17*. Como vimos antes el consumo de energía para calefacción depende del *DGD* y es válido para la mayoría de las ciudades del mundo. En forma análoga, el consumo de refrigeración depende del parámetro análogo, el Exceso Grado Día (EGD), para la refrigeración se toma como temperatura de referencia estival $T_{ref}=24^{\circ}\text{C}$ o 25°C , Ec. (xx.65) y *Figura xx.20*.

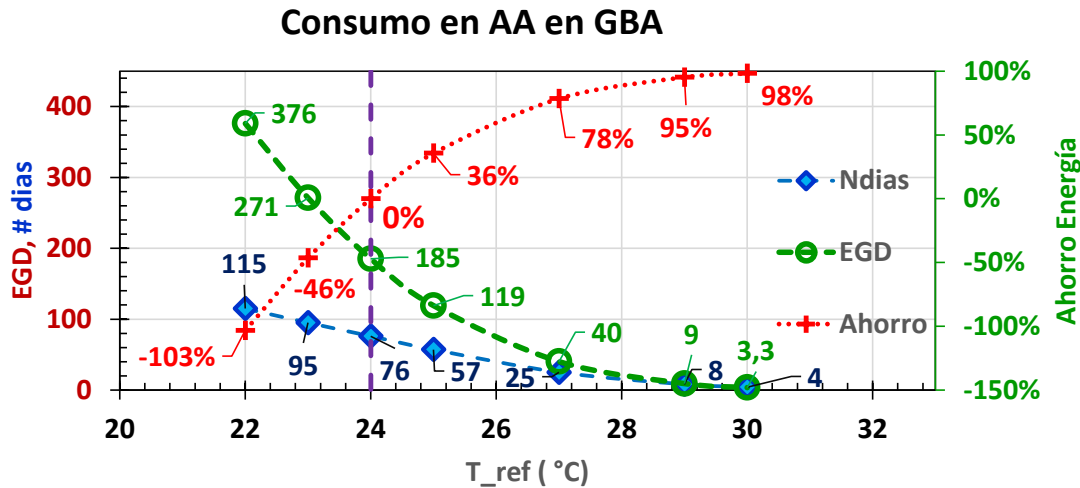


Figura xx.26. Variación del EGD como función de la temperatura de referencia (T_{ref}), símbolos circulares y líneas de trazos verdes. Los rombos azules, referidos al eje vertical izquierdo, indican el número de días al año en que la temperatura media diaria supera la temperatura de referencia. Las cruces rojas, referidas al eje vertical derecho, indican los niveles de ahorro en energía, variando la temperatura de referencia a la cual se encienden los acondicionadores de aire. Se toma como referencia para estimar los ahorros el valor de $T_{ref} \approx 24$ °C.

Como muestra la Figura xx.26, el valor del EGD varía fuertemente con el valor de la T_{ref} . Que correspondería la temperatura a la cual se comienza a encender la refrigeración. En esta figura se indican también los días al año en los que se necesita refrigeración y los potenciales ahorros de energía que pueden lograrse aumentando el umbral al cual se comienza a encender la refrigeración. Asimismo, la temperatura del termostato a la cual se ajusta la temperatura interior tiene mucha importancia, por lo que es aconsejable usar la temperatura de regulación interior: $T_{int} \approx 25$ °C (o mejor 26°C) en verano y $T_{int} \approx 19$ °C en invierno.

Los resultados mostrados en la Figura xx.26 justifican la estrategia de usar en verano un ventilador, cuando la temperatura es inferior a 30°C y el aire acondicionado cuando la temperatura supera 30°C. Dado que un ventilador en general tiene un consumo del orden de 1/10 a 1/15 al de un Aire Acondicionado estándar, con los cual podrían alcanzarse valores de ahorro en refrigeración cercanos al 80 % o 90 % en la zona central de Argentina, sin perder condiciones de confort. Otra alternativa muy buena, para días en que las temperaturas no son extremadamente calurosas ($T_{ext} < 30$ °C), es utilizar un climatizador evaporativo, ver Figura xx.27, que en esencia son ventiladores con una rejilla por la que circula agua, que con el flujo de aire, se evapora y por lo tanto enfría el aire que es forzado al exterior por el ventilador. Sus consumos energéticos son similares a un simple ventilador, [30], [31] es decir un décimo de un aire acondicionado típico. Estos equipos son particularmente adecuados para climas secos, como gran parte del centro y noroeste de Argentina, pero aún en Buenos Aires o Santa Fe funcionan muy bien. Además, pueden funcionar en el exterior como en el interior de una vivienda, el salto térmico que producen oscila entre unos 2°C a 6°C, [30] pero para la zona de temperatura entre 25°C y 30°C, es muy adecuado. Para viviendas de bajos recursos, esta característica hace que sean particularmente adecuados, ya que muchas veces esas viviendas no tienen buena aislación térmica, con lo que los aires acondicionados, además de consumir mucho, no tienen su mejor comportamiento y rendimiento.

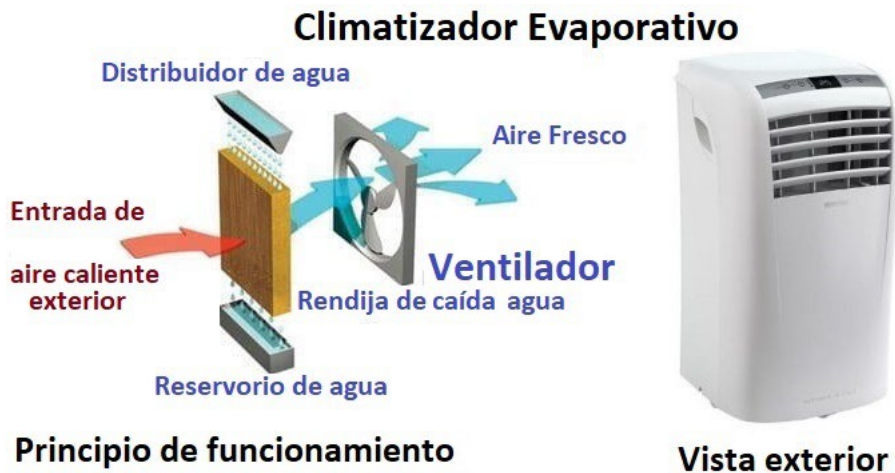


Figura xx.27. Climatizador evaporativo para refrigeración. A la izquierda se ilustra su funcionamiento, por una rejilla húmeda, se fuerza con el ventilador una corriente de aire caliente de medio. El agua de la rejilla se evapora absorbiendo calor, por lo que el aire se enfría y es impulsado al exterior. Así se genera un flujo de aire algunos grados más fríos que el entrante. Muy adecuado para climas de humedad relativa baja (secos).

A nivel individual, es decir a un nivel de familia, es clara la ventaja de usar estas pautas de uso racional de la energía en refrigeración; o sea usar ventiladores o climatizadores evaporativos para temperaturas inferiores a 30°C, por su impacto en las facturas de energía.

A nivel nacional y global estos ahorros son importantes y significativos como se ve en la Figura xx.27. El incremento de demanda por el incremento de 1°C, es de 340 MW/°C. Esto es equivalente a encender una central eléctrica como Atucha I por cada grado de incremento de temperatura por encima de los 23°C.

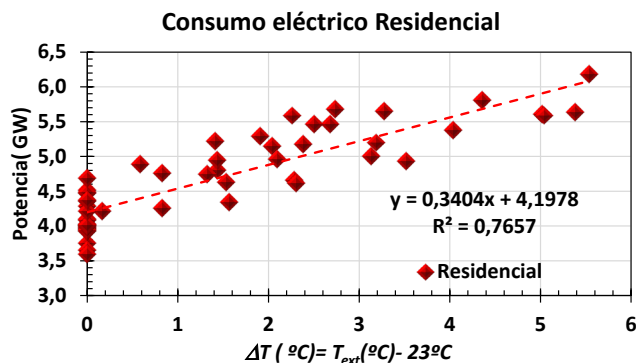


Figura xx.28. Variación del consumo eléctrico (potencia demandada) residencial nacional con la variación de temperatura. Aquí el exceso de temperatura se tomó respecto de $T_{ext}=23^{\circ}C$, es decir $\Delta T = T_{ext} - 23^{\circ}C$. Como se ve, el incremento de demanda por el incremento de 1°C, pendiente de la recta de ajuste, es de 340 MW/°C. O sea equivalente a la potencia de una central eléctrica como Atucha I por cada grado de incremento de temperatura. Fuente de datos: CAMMESA [32].

Claramente, medidas de eficiencia en el uso de la refrigeración, como las mencionadas anteriormente, tendrían una ventaja muy significativa para asegurar el suministro eléctrico en los días más calurosos cuando la demanda es mayor. Asimismo, como una fracción importante de la demanda residencial es subsidiada por el estado, una reducción en el consumo de las familias sería de mucho interés para el erario. Desde luego, las reducciones en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) también serían muy significativas.

A nivel individual, es decir a un nivel de familia, es clara la ventaja de usar estas pautas de uso racional de la energía en refrigeración; o sea usar ventiladores o climatizadores evaporativos para temperaturas inferiores a 30°C, por su impacto en las facturas de energía.

8 . Temperatura de los planetas

Un modelo muy útil simple de aplicación de los conceptos discutidos en este capítulo es la estimación de las temperaturas de los distintos planetas del sistema solar (SS). Para ello vamos a suponer que tenemos un planeta cualquiera del SS, que está a una distancia d_p del Sol y tiene una temperatura media T_p . La energía que llega a la Tierra del Sol, por unidad de superficie, se llama la Constante Solar (CS). Su valor será:

$$CS = \frac{P_{Sol}}{4\pi \cdot d_p^2} \approx 1.368 \text{ kW} \quad (\text{xx.71})$$

Si suponemos que el albedo del planeta es α_p . El *albedo* (palabra que tiene la misma raíz que *albino*, deriva del latín y significa *blancura o blanco*) es la relación entre la potencia reflejada o dispersada por la superficie del planeta y la potencia que le llega del Sol. Vamos a suponer que la Potencia Radiada por el Sol es P_{Sol} . Si la temperatura de espacio la designamos por $T_e \approx 3 \text{ K}$, en equilibrio térmico tenemos:

$$P_{Absorbida} = CS \cdot (1 - \alpha_p) \cdot \pi \cdot R_p^2 = 4 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot R_p^2 \cdot \sigma_{SB} (T_p^4 - T_e^4), \quad (\text{xx.72})$$

Donde el segundo término es la potencia absorbida por la cara del planeta expuesta al Sol y el tercer término la irradiada por el planeta en toda su superficie ($4\pi R_p^2$). R_p es el radio del planeta, por lo tanto, suponiendo que $T_e \ll T_p$, tenemos:

$$T_p = \left[\frac{P_{Sol}}{16\pi \cdot \epsilon \cdot \sigma_{SB} \cdot d_p^2} (1 - \alpha_p) \right]^{1/4} = \left[\frac{CS}{4 \cdot \epsilon \cdot \sigma_{SB}} (1 - \alpha_p) \right]^{1/4}. \quad (\text{xx.73})$$

En particular para la Tierra, ($\alpha_T \approx 0,3$ y $\epsilon_T \approx 1$) tenemos:

$$T_T = \left[\frac{CS}{4 \cdot \epsilon \cdot \sigma_{SB}} (1 - \alpha_T) \right]^{1/4} \approx 255 \text{ K} = -18 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (\text{xx.74})$$

Esta temperatura sería la que tendría la Tierra en ausencia de Efecto de Invernadero. Con lo que podemos escribir también:

$$T_p = T_T \left[\frac{(1 - \alpha_p)}{(1 - \alpha_T)} \right]^{1/4} \cdot \sqrt{\frac{d_T}{d_p}}. \quad (\text{xx.75})$$

Que nos permite calcular la temperatura de todos los planetas de SS conociendo sus distancias al Sol y sus respectivos albedos [33], [34]. En la Tabla XX.8, se indican los valores de estas distancias, y las temperaturas medidas de los planetas junto con las estimaciones de dichas temperaturas usando la Ec. (Xx.75). En esta aproximación hemos supuesto que los albedos de todos los planetas verían, pero en general caen en el rango [35]: $\alpha_p = 38 \pm 15$.

Planeta	dp (UA)	Tp_Exp (K)	Tp_Cal (K)
Mercurio	0.39	452	408
Venus	0.72	726	300
Tierra	1.00	255	255
Marte	1.52	230	207
Júpiter	5.20	120	112
Saturno	9.54	88	83
Urano	19.18	59	58
Neptuno	30.06	48	47
Plutón	39.53	37	41

Tabla xx.11 – Valores las distancias de los distintos planetas respecto del Sol, en Unidades Astronómicas, segunda columna y sus respectivas temperaturas medidas (tercera columna). La última columna son los valores de las Temperaturas calculadas usando la *Transmisión del calor* – UNSAM 2023 – S.Gil

Ec. Xx.70. Nótese que Venus tiene una temperatura mucho mayor que la prevista por este caculo, debito al importante efecto de invernadero que ocurre en este planeta.

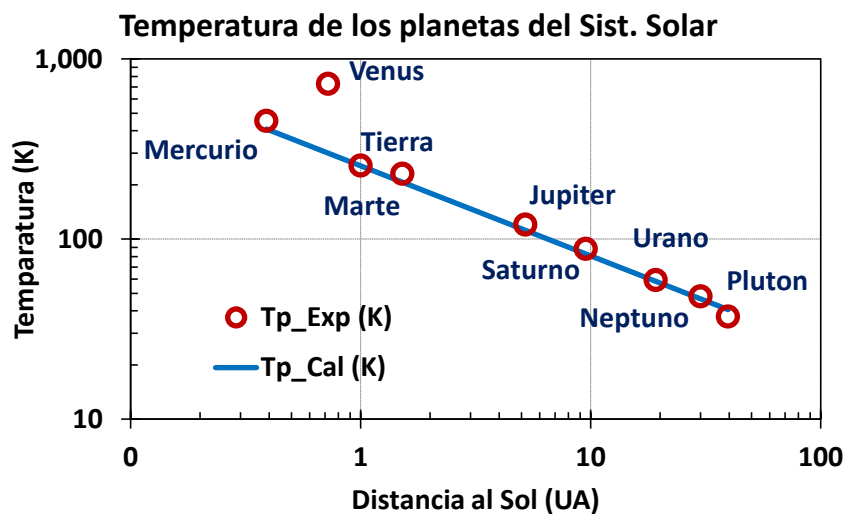


Figura xx.29 Temperatura de los distintos planetas como función de su distancia al Sol. Los símbolos rojos son los valores médicos y la curva azul las predicciones del modelo propuesto, Ec. Xx.75. Como se ve las predicciones del modelo son muy buenas.

Un hecho notable de esta estimación es la subestimación de nuestro modelo en la temperatura de planetas como Venus, aunque también en menor medida de la Tierra. Esto se deba al efecto de invernadero, claramente no incluido en este modelo simple. Como se sabe en la Tierra es de unos 33°C, pero en el caso de Venus este efecto es muchísimo mayor, del orden de 33°C [36].

Referencias

1. Department of Energy USA. Evaporative Coolers. [En línea] DOE, 202. <https://www.energy.gov/energysaver/home-cooling-systems/evaporative-coolers>.
2. Dutt, P.S.R. y Thamme Gowda, T.C.S. An Investigative Review on Recent Developments in Refrigeration by Evaporative Cooling. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*. May de 2015, Vol. 23, 6, págs. 289-292.
3. CAMMESA. CAMMESA - DEMANDA TOTAL PASO MENSUAL. [En línea] 2020. <https://portalweb.cammesa.com/>.
4. Wilson, J. D. *College Physics (7th Edition) 7th Edition*. N.Y. : Pearson, 2009.
5. Giancoli, D. *Physics Principles with Applications 7th Edition*. NY : Pearson, 2014.
6. Esteves, A. *Arquitectura Bioclimática y Sustentable*. Mendoza : s.n., 2018. Vols. ISBN:978-987-42-5102-2.
7. Sears, F., y otros. *College Physics*. NY : Pearson Ed., 2009.
8. NASA. Todo sobre Venus. [En línea] 2021. <https://spaceplace.nasa.gov/all-about-venus/sp/>.
9. Zemansky, M.W. . Calor y Termodinámica (Trad. de: Heat and Thermodynamics - 5th Ed. McGraw Hill N.Y. 1968). Madrid 1975 : Aguilar , 1975.
10. Wikipedia. Thermal transmittance. [En línea] 2022. https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_transmittance.
11. Wikipedia, the free encyclopedia. Wiedemann–Franz law. [En línea] 2022. http://en.wikipedia.org/wiki/Wiedemann%E2%80%93Franz_law.
12. Çengel, Y.A. *Transferencia de Calor – Y. A. Çengel- 2da. Ed.* Mexico DF : Mc Graw Hill , 2004.
13. Pitts, D.R. y Sissom, L.E. *Transferencia de Calor*. Bogotá : Mc Graw Hill (Trad. de: Heat Transfer. McGraw Hill N.Y. 1977), 1979.
14. Government of Canada. Safe Temperature Cooking. [En línea] 2017. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/general-food-safety-tips/safe-internal-cooking-temperatures.html>.

15. Gil, S. Clase interactiva de cosmología. [En línea] UDESA, 2003.
https://www.researchgate.net/publication/359774151_Introduccion_a_la_Cosmologia_-_Para_Principiantes.
16. Wikipedia. Svante August Arrhenius. [En línea] 2022.
https://es.wikipedia.org/wiki/Svante_August_Arrhenius.
17. —. John Tyndall. [En línea] 2022. https://es.wikipedia.org/wiki/John_Tyndall.
18. —. Joseph Fourier. [En línea] 2022. https://es.wikipedia.org/wiki/Joseph_Fourier.
19. *The History and Fate of the Universe*. Krauss, Lawrence M. . 2003, The Physics Teacher , Vol. 41, pág. 146.
20. P. Azqueta. *Manual Práctico Del Aislamiento Térmico* . Buenos Aires : s.n., 2017. AAPE Asociación Argentina del Poliestireno Expandido para una CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE.
21. Wikipedia. Intercambiador de calor. [En línea] 2018.
https://es.wikipedia.org/wiki/Intercambiador_de_calor.
22. LG. High efficiency Heat Exchanger. [En línea] LG, 2018. <https://www.lg.com/in/hrv-system/lg-LZ-H0806BA0-eco-v>.
23. *Regulación del termostato: un modo simple y racional de ahorrar energía en calefacción y refrigeración*,. Prieto , R. y Gil , S. Dic.2014, 2014, Petrotécnica (Revista del IAPG) , Vols. LV, N05, págs. 102-114.
24. Bize DegreeDay. Los DGD de casi todas las ciudades del mundo se pueden obtener de la Página de Bize DegreeDay:. [En línea] 2022. <https://www.degree-days.net/>.
25. *Determining Planetary Temperatures with the Stefan-Boltzmann Law* . LoPresto, M.C. y Hagoort , N. 2011, The Physics Teacher, Vol. 49, pág. 113.
26. *Planets on the table: A laboratory experiment on radiation and planetary effective temperature*. Karabanov, O., St. John, J. C. y Chameides, W. 2008, Am. J. of Phys., Vol. 76, pág. 692.
27. Wikipedia. Albedo. [En línea] 2022. <https://es.wikipedia.org/wiki/Albed>.
28. Secretaria de Vivienda de la nación Argentina. Guía para el cálculo de transmitancia Térmica Para Sistemas Constructivos Tradicionales, Cálculos de Transmitancia Térmica (Factor K) y Riesgo de Condensación. . [En línea] 2018.
29. Sack, N. Comparison of energy labeling schemes for windows in Europe. [En línea] 2014.
30. OVCIS Eficiencia Energética. Manual de Transmitancias de ventanas. [En línea] Univ. de Castilla la Mancha, 2022.
<https://ovcis.castillalamancha.es/OVCISEficienciaEnergetica/manuales/ventanas/CalculoTransmitancia.pdf>.
31. Wikipedia. Confort higrotérmico . [En línea] 2022.
http://es.wikipedia.org/wiki/Confort_higrot%C3%A9rmico .
32. *Incorporación de exigencias sobre eficiencia energética edilicia. Normativa caso Rosario. Acta del I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable*. Bordachar, F., Furno, F. y Lattuca, A. P. Rosario : s.n., 2016. Acta del I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable. Vols. Páginas 73–76.
33. The FREE online science and technology book. Heat-reflecting low-E glass. [En línea] Explainthatstuff, 2023. <https://www.explainthatstuff.com/how-low-e-heat-reflective-windows-work.html>.
34. Wikipedia. Anti-reflective coating. [En línea] 2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Anti-reflective_coating.
35. LG. Ventilation Solution (ERV). [En línea] LG. <https://www.lg.com/global/business/ventilation-solution-erv>.
36. David, Poz. HRV Maintenance, Heat Recovery Ventilator in Air-Tight House. [En línea] <https://www.youtube.com/watch?v=-SS88teioOQ>.
37. *Normas IRAM sobre aislamiento térmico de edificios térmico de edificios*. IRAM. 2004.