

EFFECTOS DE LA EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA SOL-AIRE SOBRE EL FLUJO DE CALOR TRANSMITIDO A TRAVÉS DE LA ENVOLVENTE

N. Muñoz, B. M. Marino y L. P. Thomas

Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería (CIFICEN)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas – Universidad Nacional del Centro de la
Provincia de Buenos Aires – Pinto 399, 7000 Tandil
E mail: lthomas@exa.unicen.edu.ar

Recibido: 1-11-20; Aceptado: 20-12-20.

RESUMEN.- Se presenta una metodología simplificada para calcular el calor intercambiado a través de las componentes opacas de la envolvente edilicia en los regímenes estacionario y variable, incluyendo los efectos de la radiación solar. Los flujos de calor constante y variable se obtienen a partir del desarrollo en serie de Fourier de la temperatura equivalente sol-aire y de la aplicación del método de la admitancia. Como caso de estudio se evalúa el comportamiento térmico de un muro típico cuando se lo orienta al norte y al sur en diez ciudades distribuidas en la extensa geografía argentina. Se presentan los resultados correspondientes a los meses de enero y junio, los más demandantes de energía para lograr el confort interior de los edificios. De este modo, es posible estimar cuantitativamente las pérdidas y ganancias de calor de una construcción considerando el clima local, ya en la etapa de diseño, y aprovechando las características térmicas del muro evaluado.

Palabras claves: Envolvente. Comportamiento térmico. Flujo de calor dinámico. Temperatura sol-aire. Método de la admitancia.

EFFECTS OF THE SOL–AIR TEMPERATURE EVOLUTION ON THE HEAT FLUX TRANSMITTED THROUGH THE BUILDING ENVELOPE

ABSTRACT.- A simplified methodology to estimate the heat exchanged through opaque building envelopes under steady state and time-dependent regimes including the solar radiation effects is presented. The dynamic heat flux is obtained from the Fourier series expansion of the equivalent sol–air temperature and the application of the admittance method. A typical wall is considered as case study and its thermal behaviour is assessed when it is facing north and south in ten Argentinean cities throughout the country. Results corresponding to January and June, the most energy demanding months to reach the building interior comfort, are presented. Thus, the heat losses and gains are quantitatively estimated considering the local climate and taking advantage of the thermal properties of the assessed wall.

Keywords: Building envelope. Thermal behaviour. Dynamic heat flux. Sol–air temperature. Admittance method.

1. INTRODUCCION.

La relación entre los flujos de calor intercambiados a través de muros en los regímenes estacionario y dinámico, las propiedades dinámicas de las componentes opacas de la envolvente y la influencia de la radiación solar son factores importantes a considerar en el diseño de edificios energéticamente eficientes. Es bien conocido también que, para reducir la demanda de energía en edificios, el parámetro crítico a tener en cuenta es la resistencia térmica de la envolvente (Kaynakli, 2012). Los códigos de edificación establecen valores máximos del coeficiente de transferencia global del calor, U , para las diferentes componentes edilicias bajo la hipótesis de que flujo de calor transferido por conducción a través de las mismas es unidireccional y estacionario. El cálculo de U , asociado con el intercambio del calor entre el exterior e interior, involucra a la conductividad térmica, el espesor y las resistencias superficiales de las capas de aire interna y externa de la envolvente (IRAM 11601, 2002; ISO 6946, 2017; ASHRAE, 2011) pero ignora el

intercambio dinámico de calor generado por las variaciones temporales de la temperatura externa y la radiación solar incidente, entre otros factores. Las condiciones del análisis térmico dinámico de las componentes constructivas son proporcionadas por la norma ISO 13786 (2017), con las diversas mejoras propuestas por Gasparella et al. (2011), Mazzeo et al. (2015) y Corrado y Paduos (2016), entre otros. Esta norma emplea el método de la admitancia para resolver la ecuación del calor dependiente del tiempo (Ibarra, 2012; Karnele y Davies, 2008; Thomas et al., 2018) teniendo en cuenta, además de la conductividad térmica, la densidad y el calor específico de cada capa de material que compone la envolvente. Como resultado, se obtienen los parámetros de respuesta dinámicos de los muros (e.g., transmitancia térmica dinámica, factor de decremento, tiempo de retardo, admitancia térmica) considerando la variación sinusoidal diaria de la temperatura externa del aire, los coeficientes de transferencia de calor constantes de las capas de aire en contacto con las superficies interna y externa de la envolvente, y la temperatura interna constante.

Un problema frecuente que se presenta al evaluar el intercambio conductivo de calor a través de una pared es el considerar por separado los flujos de calor transmitidos en los regímenes estacionario y dinámico evitando incorporar al análisis los efectos del calentamiento de los muros por la radiación solar. Recientemente, Thomas et al. (2019) relacionaron los flujos de calor transferidos por conducción al interior de un edificio en Tandil en los regímenes estacionario y dinámico considerando los materiales usados y los efectos de la radiación solar usando el desarrollo en serie de Fourier de la temperatura sol-aire. Sin embargo, y puesto que el flujo de calor dinámico se expresa en términos de números complejos, no relacionados en forma directa con la temperatura sol-aire, los cálculos son dificultosos y la aplicación metodológica a construcciones en otros sitios resulta poco viable.

El objetivo del presente estudio fue desarrollar una metodología para calcular el valor medio y la amplitud de las variaciones diarias de la temperatura sol-aire en cualquier lugar o región del país, y establecer relaciones sencillas entre tales valores medios y los flujos de calor estacionario y dinámico transmitidos a través de envolventes opacas. El procedimiento se aplica a un muro típico tomado como caso de estudio cuyo comportamiento térmico se evalúa para las orientaciones más significativas del muro en diez ciudades argentinas con diferentes altitud y latitud. Se ofrece así una perspectiva alternativa para que arquitectos, desarrolladores y constructores optimicen la eficiencia energética edilicia ya en la etapa de diseño o mediante las evaluaciones técnicas de edificios preexistentes.

2. MARCO TEÓRICO

Por razones de claridad, los conceptos y ecuaciones fundamentales empleados en el cálculo del flujo de calor transmitido por conducción a través de una pared se resumen en esta sección (Thomas et al., 2019). La temperatura

$$T_{sa}(t) = \overline{T_{sa}} + T_{ve}(t) = \overline{T_{sa}} + T_{ve,10} \cos(\omega_1(t - \tau_{Te,10})) + T_{ve,20} \cos(\omega_2(t - \tau_{Te,20})) \quad (3)$$

donde $\overline{T_{sa}}$ es el término constante que determina el flujo de calor estacionario q_{ss} . Los términos periódicos que dan cuenta de las variaciones temporales de la temperatura exterior determinan la respuesta dinámica de la envolvente y, por tanto, el flujo de calor variable transmitido. En la Ec. (3), $T_{ve,10}$ ($T_{ve,20}$) = amplitud de las oscilaciones de frecuencia angular ω_1 ($\omega_2 = 4\pi/P$) con $P = 24$ h, y $\tau_{Te,10}$ ($\tau_{Te,20}$) = tiempo de retraso de la función coseno de frecuencia ω_1 (ω_2) con respecto al origen del día (i.e., 00:00 h). Notar que la Ec. (3) da cuenta tanto de las variaciones diarias de T_{sa} (asociadas con ω_1) y que normalmente tienen mayor amplitud, como de su principal término correctivo, el armónico (asociado con ω_2) relacionado con al calentamiento solar de los muros. Puesto que la importancia relativa de $T_{ve,10}$ y $T_{ve,20}$ cambia con la amplitud térmica y la

equivalente sol-aire, T_{sa} , es la temperatura externa para la cual, en ausencia de radiación, el ambiente externo entrega el mismo flujo de calor a la superficie de un muro (Huelsz et al., 2014; Aoki y Mizutani, 2015; Marino et al., 2018). Se la utiliza para evaluar los efectos de la radiación solar sobre los flujos entrantes de calor estacionario y dinámico. Si la radiación emitida por la envolvente es despreciable, se tiene que:

$$T_{sa} = T_e + \frac{\alpha}{h_e} I_T + IR, \quad (1)$$

donde T_e es la temperatura externa del aire, $\alpha = 0.65$ es la absorptividad de la radiación solar de una superficie externa de un muro de color claro (ASHRAE, 2011), h_e es el coeficiente convectivo externo, I_T es la irradiancia solar total recibida por la superficie e IR es el aumento de temperatura debido al intercambio de radiación infrarroja con el cielo, la tierra y otros edificios y vegetación circundantes. Para el caso de superficies verticales es usual suponer $IR \approx 0^\circ\text{C}$ (ASHRAE, 2011). Para una pared orientada al norte (N) o al sur (S), el modelo de Liu-Jordan (1960) prevé que:

$$I_{TN} = \frac{\cos\theta_N}{\sin\beta} I_{H,dir} + \frac{1}{2} I_{H,dif} + \frac{1}{2} r I_{H,meas} \quad ,$$

$$I_{TS} = \frac{\cos\theta_S}{\sin\beta} I_{H,dir} + \frac{1}{2} I_{H,dif} + \frac{1}{2} r I_{H,meas} \quad (2)$$

respectivamente, donde $I_{H,dir}$ es la radiación horizontal directa, $I_{H,dif}$ es la radiación horizontal difusa y $\frac{1}{2} r I_{H,meas}$ es la radiación horizontal reflejada por el suelo, θ_N y θ_S son los ángulos de incidencia de los rayos solares respecto a la normal de los muros orientados al norte o al sur, β es la altitud solar y r es la reflectividad terrestre. La evolución de T_{sa} en un día típico se aproxima con los primeros términos del desarrollo en serie de Fourier:

irradiancia solar, el análisis de Fourier no puede reducirse a un periodo de 24 h como recomienda la norma ISO 13792. En este contexto, algunos autores proponen el uso de un mayor número de funciones armónicas (Marletta et al., 2013; Gasparella et al., 2011). No obstante, el desarrollo en serie expresado por la Ec. (3), con un número limitado de términos, mostró ser conveniente para alcanzar el objetivo propuesto.

La diferencia entre la temperatura $T_{sa}(t)$ en el exterior, y la temperatura interna del edificio, T_i , produce un flujo de calor no-estacionario a través de la envolvente. Como la ecuación del calor dependiente del tiempo es lineal, el flujo de calor total resultante es la suma de los flujos de calor determinados por los diferentes términos del desarrollo de Fourier de $T_{sa}(t)$, los cuales contribuyen con diferentes factores de respuesta dinámicos pues tienen distintos períodos. Luego, el flujo de calor total que atraviesa las superficies externa e interna del muro, resulta ser:

$$q_e(t) = q_{ss} + q_{ve} = q_{ss} + |q_{ve,10}| \cos(\omega_1(t - \tau_{qe,10} - \tau_{Te,10})) + |q_{ve,20}| \cos(\omega_2(t - \tau_{qe,20} - \tau_{Te,20})) \quad (4)$$

$$q_i(t) = q_{ss} + q_{vi} = q_{ss} + |q_{vi,10}| \cos(\omega_1(t - \tau_{qi,10} - \tau_{Ti,10})) + |q_{vi,20}| \cos(\omega_2(t - \tau_{qi,20} - \tau_{Ti,20})) \quad (5)$$

respectivamente, donde $\tau_{qe,10}$, $\tau_{qe,20}$ y $\tau_{qi,10}$, $\tau_{qi,20}$ son los tiempos de retraso con respecto a $T_{ve}(t)$ de las oscilaciones (de frecuencias ω_1 y ω_2) del flujo de calor que atraviesa las caras externa e interna.

Debido a la linealidad de la ecuación del calor y la ortogonalidad de los términos del desarrollo en serie de Fourier, la superposición de soluciones conduce a la siguiente relación entre q_{ss} y $\overline{T_{sa}}$:

$$q_{ss} = U(\overline{T_{sa}} - T_i) \tag{6}$$

(ISO 6946, 2017), mientras que las componentes variables q_{ve} y q_{vi} se calculan usando el método de la admitancia para las variaciones periódicas de frecuencias ω_1 y ω_2 . Para la frecuencia ω_1 resulta:

$$\begin{bmatrix} q_{ve,10} \\ q_{vi,10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ve,10} \\ T_{vi,10} \end{bmatrix}, \tag{7}$$

y para la frecuencia ω_2 resulta:

$$\begin{bmatrix} q_{ve,20} \\ q_{vi,20} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ve,20} \\ T_{vi,20} \end{bmatrix}. \tag{8}$$

Los coeficientes complejos a_{ij} y b_{ij} se relacionan con las propiedades dinámicas de la envolvente, las resistencias superficiales de las capas de aire interna y externa, y la frecuencia ω_1 o ω_2 . Por lo tanto, si se conocen las amplitudes $T_{ve,10}$, $T_{ve,20}$, $T_{vi,10}$, $T_{vi,20}$ de las oscilaciones de T_{sa} y se considera $T_i = const$ (es decir, $T_{vi} = T_{vi,10} = T_{vi,20} = 0$), se obtiene la solución $q_e(t)$

con q_{ss} , $|q_{ve,10}|$, $|q_{ve,20}|$ y los desfases $\tau_{qe,10} = \arg(q_{ve,10})$ y $\tau_{qe,20} = \arg(q_{ve,20})$ calculados con las Ecs. (7) y (8). En forma similar, se obtiene la solución $q_i(t)$ con q_{ss} , $|q_{vi,10}|$, $|q_{vi,20}|$ y los desfases $\tau_{qi,10} = \arg(q_{vi,10})$ y $\tau_{qi,20} = \arg(q_{vi,20})$.

3. METODOLOGÍA

En la Tabla 1 se listan las 10 ciudades elegidas para aplicar la metodología, las cuales se encuentran distribuidas en la extensa geografía argentina, cubriendo una variación de unos 32° en latitud, 13° en longitud y 2800 m en altitud, y presentando diferentes características climáticas según la definición de las zonas bio-ambientales de Argentina proporcionada por la Norma IRAM 11603 (2012). Los valores medios mensuales de T_e se determinaron a partir de los valores horarios proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional en el periodo 2008–2018. Los valores de la irradiancia solar media diaria se obtuvieron a partir de las mediciones satelitales de la NASA disponibles en <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>, los que se correlacionan bien (0.96 para enero y 0.996 para junio) con los registrados en los mapas de radiación solar reportados por Grossi Gallegos (1997). A partir de los datos satelitales, se determinaron los valores horarios I_{meas} aplicando la metodología propuesta por Baig et al. (1991) que considera la irradiancia como una función Gaussiana con un semi-ancho que depende del día del año, la latitud, la altitud solar y la declinación solar. Así, se obtuvieron así unos 12 valores diarios no nulos (ya que la superficie terrestre recibe diariamente la radiación solar a lo largo más de 12 horas en enero y en menos de 12 horas en junio). Los promedios de estos valores horarios para enero y junio se reportan en la Tabla 1.

Tabla 1. Localización y valores medios mensuales de la temperatura externa del aire y de la irradiancia solar de las ciudades elegidas.

Ciudad	Latitud y Longitud	Altitud (msnm)	Clima	Mes	$\overline{T_e}$ (°C)	$\overline{I_{meas}}$ (W/m ²)
Bariloche	41.90 S 71.10 O	1172	Muy frío	Enero	15.0	537.9
				Junio	2.9	176.9
Comodoro Rivadavia	45.47 S 67.30 O	294	Muy frío	Enero	19.7	511
				Junio	6.9	176.4
Ezeiza	34.49 S 58.32 O	19	Templado –cálido	Enero	23.9	553.2
				Junio	10.3	265.4
La Quiaca	22.60 S 65.36 O	3108	Templado –frío	Enero	12.8	506.3
				Junio	4.4	457.2
Mendoza	32.53 S 68.51 O	967	Templado –frío	Enero	25.5	586.7
				Junio	8.4	318.9
Neuquén	38.57 S 68.80 O	469	Frio	Enero	23.7	586.2
				Junio	6.6	317.3
Pilar	31.40 S 63.53 O	294	Templado –cálido	Enero	23.4	527.1
				Junio	10.5	305.5
Tandil	37.14 S 59.15 O	172	Templado –frío	Enero	20.8	532.9
				Junio	7.2	235.5
Tartagal	22.39 S 63.49 O	389	Cálido	Enero	25.2	519.2
				Junio	14.9	288.4
Ushuaia	54.48 S 68.19 O	243	Muy frío	Enero	9.32	298.3
				Junio	2.4	53.7

Como caso de estudio, se consideró un muro doble de 0.30 m de espesor, compuesto de una capa externa de ladrillo visto (0.12 m), una capa de poliestireno expandido (0.035 m), otra de ladrillo hueco (0.12 m), con revoques grueso (0.02 m) y fino (0.005 m) en el interior. Esta pared presenta un coeficiente de transferencia global $U = 0.606 \text{ W/m}^2\text{°C}$ considerando las capas límites de aire externa e interna (IRAM 11601,2 002), admitancia $Y = 5.16 \text{ W/m}^2\text{°C}$, factor de decremento $f = 0.28$ y tiempo de retraso $\tau_{SO} = 10 \text{ h}$ (ISO 13786, 2017). Los valores de los elementos matriciales involucrados en las Ecs. (7) y (8), obtenidos aplicando el método de la admitancia, fueron $a_{11} = 3.449 + 2.173i$,

$$a_{12} = a_{21} = -0.165 - 0.08i, \quad a_{22} = 6.193 + 5.392i,$$

$$b_{11} = 4.461 + 2.022i, \quad b_{12} = b_{21} = -0.036 + 0.039i$$

$$\text{y } b_{22} = 8.870 + 5.041i \quad b_{22} = 8.870 + 5.041i, \text{ donde}$$

$$i = \sqrt{-1} \text{ es la unidad imaginaria.}$$

El análisis se efectuó en enero (verano) y junio (invierno), para muros orientados al norte y al sur. La metodología desarrollada consistió en la aplicación de los pasos descritos a continuación, esquematizados en el diagrama de flujo de la Figura 1.

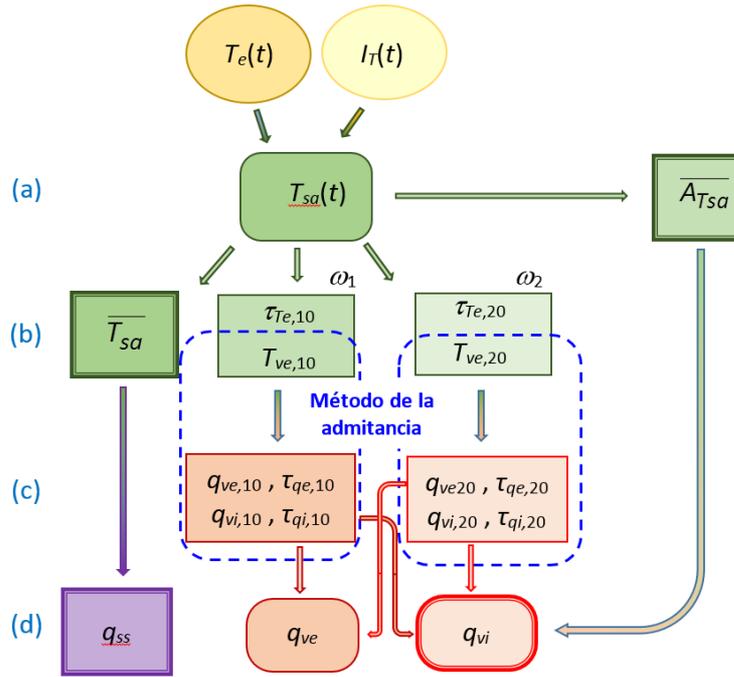


Fig. 1: Diagrama del flujo de la metodología aplicada.

a) Cálculo de $T_{sa}(t)$

Para cada ciudad seleccionada, se obtienen los promedios de los valores horarios de I_{meas} correspondientes a enero, por una parte, y a junio por otra, y se calculan I_{TN} e I_{TS} usando la Ec. (2) y los respectivos valores de β , θ_N y θ_S . Los valores horarios de $T_{sa,N}(TLE)$ y $T_{sa,S}(TLE)$ para cada ciudad, con $TLE =$ tiempo local estándar, se determinan recurriendo a la Ec. (1) y a los registros de $T_e(TLE)$ locales. Luego, a partir de las variaciones de T_{sa} , se determina la amplitud media $\overline{A_{Tsa}}$ restando los valores máximo y mínimo de T_{sa} para los meses de enero y junio.

b) Desarrollo en serie de Fourier de $T_{sa}(t)$

Mediante el desarrollo expresado por la Ec. (3) que mejor ajusta la evolución de $T_{sa}(t)$, se obtienen:

- el valor medio $\overline{T_{sa}}$ (= primer término del desarrollo), y
- las amplitudes $T_{ve,10}$ y $T_{ve,20}$ de la oscilación fundamental y de la primera armónica con sus correspondientes desfases temporales $\tau_{Te,10}$ y $\tau_{Te,20}$.

La Figura 2 muestra la evolución de $T_{sa}(TLE)$ para los muros orientados al N y S en tres ciudades que difieren en altitud (e.g., Tartagal y La Quiaca) y latitud (e.g., La Quiaca o Tartagal y Ushuaia). Los puntos de las gráficas representan los valores horarios de T_{sa} promediados a lo largo de enero y junio para las mismas horas del día. Cada conjunto de puntos se aproxima por el respectivo desarrollo en serie de Fourier dado por Ec. (3) representado por una línea roja. Se incluyen los respectivos valores de $\overline{T_{sa}}$ que alcanzan su máximo valor en Tartagal (clima cálido), un valor intermedio en La Quiaca (clima templado-frío) y el mínimo valor en Ushuaia (clima muy frío). En las tres ciudades, se observa que la amplitud térmica es similar en enero pero cambia completamente en junio siendo máximo en La Quiaca y mínimo en Ushuaia debido a la mayor y menor radiación solar recibida, respectivamente. Un valor intermedio se obtiene en Tartagal debido a que la nubosidad y la menor altura sobre el nivel del mar disminuyen significativamente la radiación incidente sobre la localidad. En invierno, la amplitud térmica es mayor en La Quiaca y casi despreciable en Ushuaia. Para otras ciudades, $\overline{T_{sa}}$ presentan valores intermedios a los presentados en Figura 2.

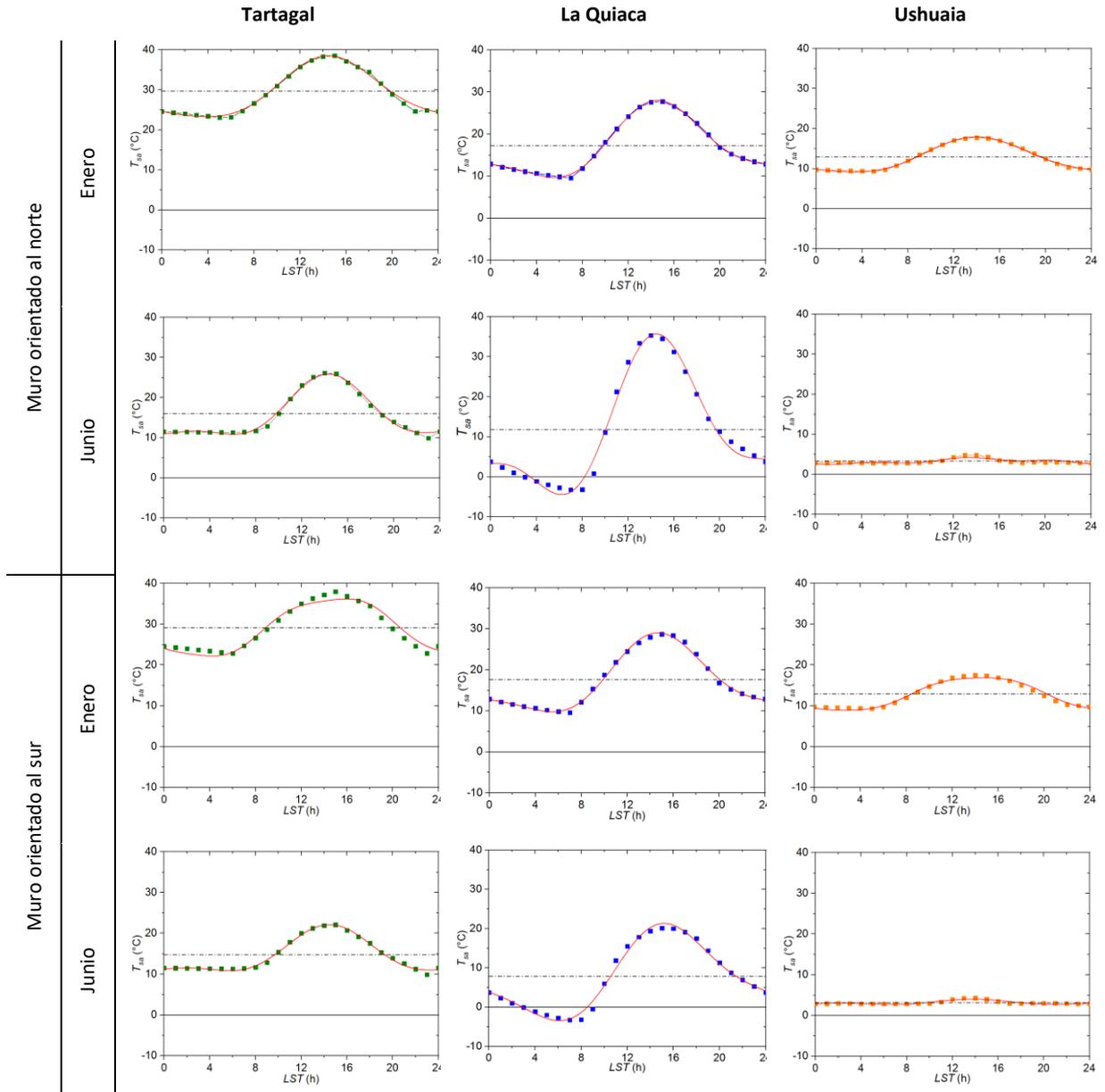


Fig. 2: Evolución de los promedios horarios de la temperatura sol–aire durante enero y junio (símbolos) y aproximación utilizando los correspondientes desarrollos en serie de Fourier (líneas rojas). Las líneas de puntos y trazos representan los valores de $\overline{T_{sa}}$.

c) Cálculo de las amplitudes y desfases temporales de los flujos de calor.

Se introducen los elementos a_{ij} y b_{ij} . Aplicando el método de la admitancia, usando $T_{ve,10}$ y empleando la Ec. (7) se obtienen las amplitudes $|q_{ve,10}|$ y $|q_{vi,10}|$ de los flujos oscilatorios entrante y saliente del muro y los respectivos desfases temporales $\tau_{qe,10}$ y $\tau_{qi,10}$. Del mismo modo, a partir de $T_{ve,20}$ y empleando la Ec. (8) se obtienen $|q_{ve,20}|$, $|q_{vi,20}|$, $\tau_{qe,20}$ y $\tau_{qi,20}$.

d) Cálculo de los flujos q_{ss} y q_{vi}

Con el valor de $\overline{T_{sa}}$ y la Ec. (6), se determina la magnitud del

flujo de calor transmitido por conducción a través del muro en el régimen estacionario q_{ss} . Por otra parte, el flujo de calor variable q_{vi} que atraviesa la cara interna de la envolvente se calcula con los dos últimos términos del desarrollo en serie de Fourier de $T_{sa}(t)$ de la Ec. (3). Sin embargo, en lugar de emplear $T_{ve,10}$, $T_{ve,20}$ para calcular q_{vi} , se establece una relación aproximada entre $A_{q_{vi}}$ y $A_{T_{sa}}$ similar a la expresada por Ec. (6) para q_{ss} . Para ello se determina un coeficiente $m \in \mathfrak{R}$ tal que

$$\overline{A_{q_{vi}}} = m \overline{A_{T_{sa}}}$$

y la fase de la onda de calor q_{vi} es aproximada por la fase de la primera componente oscilatoria del desarrollo de Fourier, quedando:

$$q_{vi} \approx \overline{A_{q_{vi}}} \cos[\omega_1(t - \tau_{q_i,10} - \tau_{\tau_e,10})] \quad (10)$$

Con estos valores de q_{SS} y $q_{vi}(t)$ se obtiene el flujo de calor total $q_i(t) = q_{SS} + q_{vi}(t)$ que atraviesa la cara interna del muro evaluado usando la Ec. (5), y los valores de T_{sa} y A_{Tsa} para la localidad de interés. De la misma forma, puede calcularse $q_e(t)$ usando la Ec. (4).

4. RESULTADOS

La Figura 3 muestra los valores del flujo de calor transmitido en régimen estacionario a través del muro evaluado en función del valor promedio de la temperatura sol-aire en las ciudades elegidas. La pendiente de las rectas es el valor de U .

En enero, $q_{SS} > 0$ (el interior gana calor) en todas las localidades excepto en Ushuaia (la ciudad más austral) y La Quiaca (con mayor altitud sobre el nivel del mar). Se observa una escasa diferencia entre los valores de q_{SS} para los muros orientados al sur y al norte para todas las ciudades. En junio, el muro pierde calor en todos lados; sin embargo, el orden de los puntos que identifican las localidades sobre las rectas cambia. Los mayores cambios corresponden a Mendoza y Bariloche, siendo máximo para esta última donde el muro analizado pierde casi tanto calor como otro ubicado en Ushuaia. Las pérdidas a través de este tipo de muro en Tandil, Neuquén y Comodoro Rivadavia son importantes, aunque menores que en Bariloche y Ushuaia.

Las Figuras 4a muestran las variaciones de T_{sa} para muros

orientados al norte en Tartagal, La Quiaca y Ushuaia. La serie de Fourier de T_{sa} (T_{ve} - línea continua roja), establecida por la Ec. (3), presenta una componente fundamental (línea continua negra) de frecuencia angular ω_1 ($P = 24$ h) y una armónica (línea de trazos) de frecuencia angular ω_2 ($P = 12$ h) con sus correspondientes tiempos de retraso $\tau_{\tau_e,10}$ y $\tau_{\tau_e,20}$ con respecto al comienzo del día (i.e., 00:00 h). Las amplitudes y fases dependen del sitio de emplazamiento. La armónica aumenta y adelanta el máximo de la componente fundamental de la serie de $T_{sa}(t)$ es menor. Las amplitudes $|T_{ve,10}|$ y $|T_{ve,20}|$ permiten calcular los valores complejos $q_{vi,10}$ y $q_{vi,20}$ usando las Ecs. (7-8) respectivamente, que proporcionan las amplitudes $|q_{vi,10}|$, $|q_{vi,20}|$ y los desfases $\tau_{q_i,10}$, $\tau_{q_i,20}$ por separado. Luego, se construye cada serie de Fourier de q_{vi} expresada por la Ec. (5) con la suma de los flujos de calor variable de ambas frecuencias, obteniéndose el flujo variable total q_{vi} .

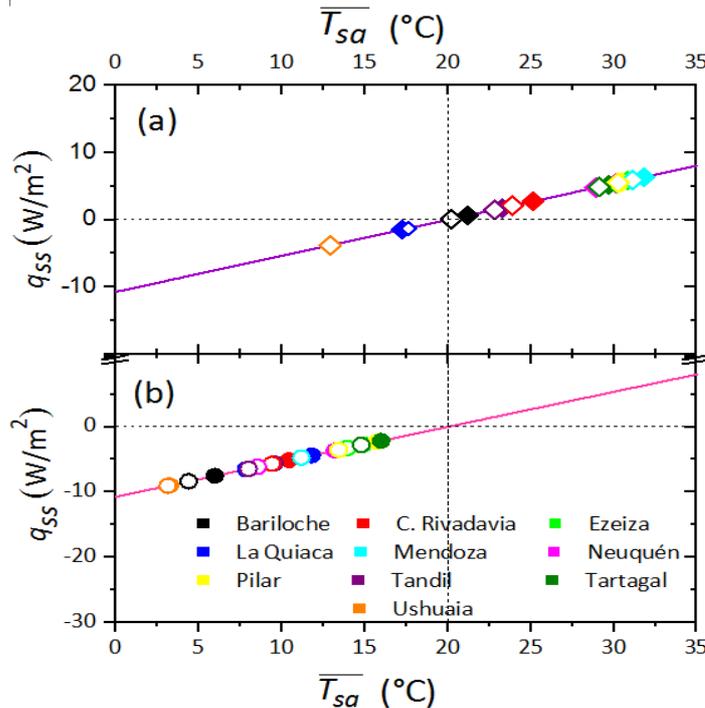


Fig. 3: Flujo de calor transmitido en régimen estacionario a través del muro evaluado orientado al norte (símbolos llenos) y al sur (símbolos abiertos) en (a) enero y (b) junio.

La Figura 4b muestra los flujos de calor variables resultantes de los desarrollos en serie de Fourier de q_{vi} (Ec. 10) con diferentes amplitudes y retrasos temporales de acuerdo a las propiedades dinámicas del muro para tres ciudades. Tanto la componente fundamental (frecuencia ω_1) como la armónica (ω_2) del q_{vi} son atenuadas fuertemente, pero la armónica lo es mucho más y el flujo resultante es determinado prácticamente por la componente fundamental. Como consecuencia, los máximos de calor en el interior se verifican entre las horas 0:00 y 1:00 y no cambian mucho con la ciudad. En La Quiaca, el máximo de q_{vi} se verifica a la hora 1:00, mientras que el máximo de T_{sa} se logra a la hora 13:30; es decir, el flujo de calor se retrasa unas 11.3 h respecto a la evolución de T_{sa} . En muros ubicados en Tartagal y Ushuaia, el retraso es de 10.3 h. Este retraso es mayor que el de la componente fundamental del flujo de calor respecto de la respectiva componente de T_{sa} ($\tau_{ISO} \approx 10$ h), ya que las correspondientes armónicas adelantan más el máximo de T_{sa}

que el de q_{vi} .

La Figura 5 muestra la amplitud de q_{vi} en función de la amplitud de las variaciones de T_{sa} . La relación lineal dada por la Ec. (9) con $m \approx |a_{21}|$ es una aproximación razonable para el conjunto elegido de localidades. La mayoría de los puntos se encuentran entre las líneas con pendientes $m \approx |a_{21}| + |b_{21}|$ y $m \approx |a_{21}| - |b_{21}|$, por lo que la incerteza de la aproximación $m \approx |a_{21}|$ es $|b_{21}|$.

5. ANALISIS

El cálculo del flujo entrante de calor variable implica usar números complejos, por lo que su amplitud y fase deben determinarse mediante dos componentes oscilatorias con diferentes frecuencias. A diferencia de los lineamientos de la norma ISO, en este trabajo la amplitud y la fase de dicho flujo se

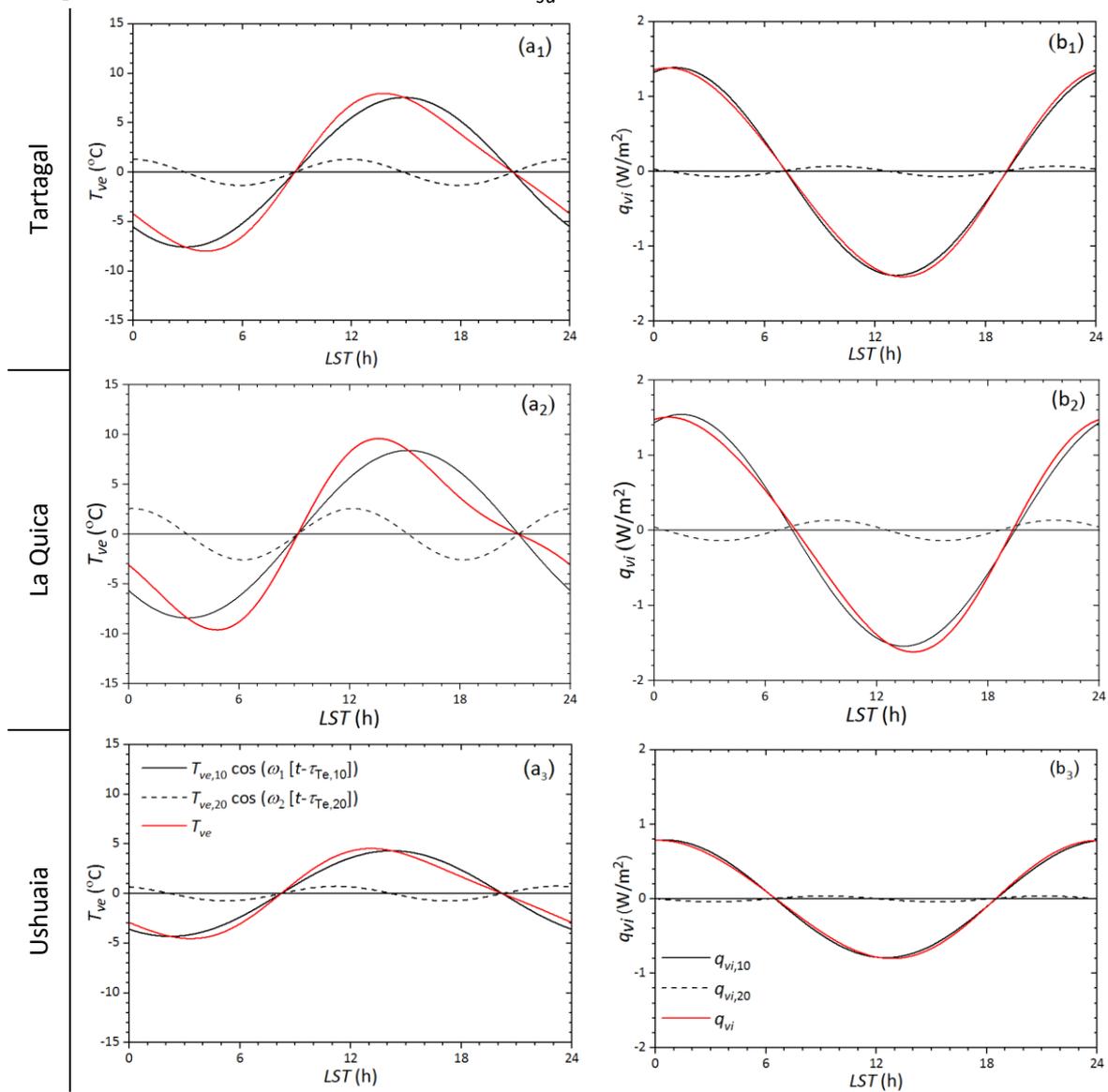


Fig. 4. (a) Primera y segunda componentes variables de la serie de Fourier de T_{sa} (líneas negra continua y discontinua, respectivamente), para muros orientados al norte en enero. (b) Flujo de calor variable resultante que atraviesa la cara interna del muro.

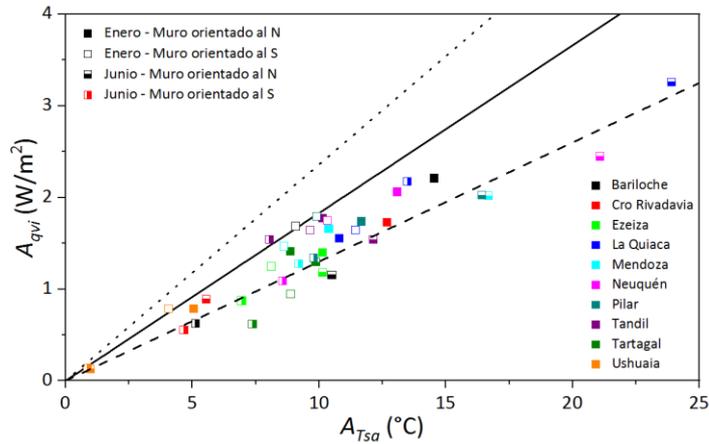


Fig. 5: Amplitud del flujo de calor variable que atraviesa la cara interna en función de la amplitud de las variaciones de T_{sa} . Las líneas continuas, de puntos y de trazos tienen pendientes $|a_{21}|$, $|a_{21}| + |b_{21}|$ y $|a_{21}| - |b_{21}|$, respectivamente.

calculan a partir de la variación diaria de T_{sa} (no de T_e). Si bien este tratamiento no es sencillo, tiene las ventajas de determinar el desfase de la onda de calor que atraviesa el muro con respecto a la variación de T_{sa} y la influencia del calentamiento solar del muro en el lugar de emplazamiento sobre q_{vi} . En general, cuanto mayor es la radiación solar y menores son las variaciones de temperatura en una localidad, $T_{sa}(t)$ difiere de una variación sinusoidal en amplitud y forma, como ocurre en La Quiaca. El muro tomado como caso de estudio reduce significativamente la amplitud $q_{vi,20}$, asociada con el armónico de frecuencia ω_2 , y la onda de calor que ingresa al interior de las construcciones es prácticamente una senoide con frecuencia ω_1 . Sin embargo, otros muros podrían dar un resultado diferente, lo cual se investigará en otro trabajo.

Otro aspecto importante es la proporcionalidad entre la amplitud del flujo de calor que llega al interior $\overline{A_{q_{vi}}}$ y $\overline{A_{T_{sa}}}$ similar a la existente para q_{ss} dada por la Ec. (6). Es decir, las Ecs. (3), (4-5) y (7-8) pueden aproximarse mediante un único parámetro empírico m para relacionar $|q_{vi,10}|$ y $|q_{vi,20}|$ con los valores de a_{21} y b_{21} asociados con las características de construcción del muro, y $T_{ve,10}$ y $T_{ve,20}$ con sus respectivas fases. En esta aproximación, el cálculo no utiliza números complejos y la dificultad matemática se reduce significativamente, conservando el cálculo simultáneo de los flujos de calor transmitidos en los regímenes estacionario y dinámico e incluyendo el efecto del calentamiento solar sobre la conducción del calor. Los factores clave son la utilización de la temperatura sol-aire que da cuenta de los efectos de la irradiancia solar sobre los muros y las relaciones entre $\overline{T_{sa}}$ y $\overline{A_{T_{sa}}}$ con los flujos q_{ss} y q_{vi} , respectivamente.

6. CONCLUSIONES

El procedimiento usado en este estudio permite calcular las pérdidas y ganancias de calor a través de las componentes

opacas de un tipo de envolvente edilicia en verano y en invierno en localidades seleccionadas por sus diferencias climáticas, considerando el aporte del calentamiento solar de los muros. Los flujos de calor en los regímenes estacionario y variable se cuantifican simultáneamente abordando un enfoque general basado en el uso de la temperatura sol-aire, el cual ofrece mayor información que el conocido grado-día basado en la diferencia entre la temperatura base del cálculo (18°C, 20°C, etc.) y la temperatura media del aire exterior en un determinado período de tiempo. Esta perspectiva mejora el entendimiento global del problema abordado y permite encontrar las relaciones existentes entre los parámetros físicos involucrados y los efectos de las características climáticas locales sobre el calor intercambiado por conducción entre el interior y el exterior de un edificio.

Para el cálculo de los flujos de calor transmitidos en los regímenes estacionario y dinámico, se adoptó el valor de la absorptividad de la radiación solar del muro correspondiente a un color claro, i.e. $\alpha = 0.65$, cercano al valor establecido por la norma IRAM 11605 ($\alpha = 0.7$). Según Volantino y Etchehoury (2002), $0.13 < \alpha < 0.955$ para superficies de color blanco y negro ébano, respectivamente. Para paredes de color oscuro ($\alpha > 0.65$), se espera una mayor diferencia entre T_{sa} y T_e lo cual genera un incremento del flujo de calor medio y una mayor amplitud del flujo de calor variable con respecto a los valores reportados aquí. Por el contrario, la diferencia entre T_{sa} y T_e podría ser muy escasa para paredes de colores muy claros. Estos aspectos serán estudiados con más detalle en un próximo trabajo. Con el fin de unificar la fuente de información para todas las localidades, se optó por emplear los valores de I_{meas} proporcionados por mediciones satelitales. Sin embargo, se espera contar con los datos de I_{meas} medidos en tierra proporcionados por las redes de medición existentes, y también agregar al estudio más ciudades, especialmente del NE argentino. También, se tratará la generalización de la metodología desarrollada para evaluar el comportamiento térmico de distintos tipos de muros en cualquier sitio del país y época del año mediante la aplicación de la técnica de regresión lineal múltiple, haciendo posible determinar cuando y donde es necesario considerar las características térmicas estacionarias (i.e., U) o las dinámicas (e.g., masa térmica, conductividad dinámica, tiempo de retraso, etc.) de los muros.

NOMENCLATURA

A_T = amplitud térmica (°C)
 $A_{q_{vi}}$ = amplitud de la variación del flujo de calor que atraviesa la cara interna
 a, b = elementos matriciales
 I_{meas} = irradiancia solar medida (W m⁻²)
 I_T = irradiancia solar total (W m⁻²)
 P = período de oscilación (h)
 q_{ss} = flujo de calor en estado estacionario (W m⁻²)
 $q_{ve}(q_{vi})$ = flujo de calor total variable que atraviesa la cara externa (interna) del muro (W m⁻²)
 $q_{ve,10}; q_{ve,20}$ = amplitudes de las variaciones del flujo de calor que atraviesa la cara externa del muro (W m⁻²)
 $q_{vi,10}; q_{vi,20}$ = amplitudes las variaciones del flujo de calor que atraviesa la cara interna del muro (W m⁻²)
 TLE (o SLT por su sigla en inglés) = tiempo local estándar (h)
 t = tiempo (h)
 T_{sa} = temperatura equivalente sol-aire (°C)
 $T_{ve}; T_{vi}$ = contribuciones dependientes del tiempo a T_{sa} y T_i (°C)
 $T_{ve,10}; T_{ve,20}$ = amplitudes de las variaciones de la temperatura externa (°C)
 $T_{vi,10}; T_{vi,20}$ = amplitudes de las variaciones de temperatura interna (°C)
 U = coeficiente de transferencia global del calor (W m⁻² °C⁻¹)
 α = absorptividad de la radiación solar (-)
 τ = tiempo de retraso
 ω = frecuencia angular (s⁻¹)
Subíndices:
 0 amplitud de una función periódica
 1, 2 alude a la frecuencia ω_1, ω_2
 e, i valor externo, interno
 N, S alude a un muro orientado al norte, sur
 v alude a variaciones temporales

REFERENCIAS:

- Aoki T. y Mizutani A. (2015). Measurement of the vertical distribution of reflected solar radiation. *Journal of Engineering and Technological Sciences* **47**, 160–169.
- ASHRAE (2011). *Handbook Fundamentals*, SI edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Baig A., Achter P. y Mufti A. (1991) A novel approach to estimate the clear day global radiation. *Renew Energy* **1**, 119–23.
- Corrado V. y Paduos S. (2016). New equivalent parameters for thermal characterization of opaque building envelope components under dynamic conditions. *Applied energy* **163**, 313–322.
- Gasparella A., Pernigotto G., Baratieri M. y Baggio P. (2011). Thermal dynamic transfer properties of the opaque envelope: Analytical and numerical tools for the assessment of the response to summer outdoor conditions. *Energy and Buildings* **43**, 9, 2509–2517.
- Grossi Gallego H. (1997). (Recuperado de http://www.unlu.edu.ar/~gersol/backup/Atlas_Solar/desc-rip-cartas.html).
- Huelsz G., Barrios G. y Rojas J. (2014) Differences on results from steady-state and time-dependent wall/roof heat transfer models in Mexican climates. *Energy Procedia* **57**, 1825–1833.
- Ibarra M. C. (2012). La ecuación del calor de Fourier: Resolución mediante métodos de análisis en variable real y en variable compleja. Memorias II Jornadas de investigación en ingeniería del NEA y países limítrofes. Resistencia, Argentina. ISBN: 978-950-42-0142-7.
- IRAM 11601 (2002). *Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario*. Buenos Aires, Argentina.
- IRAM 11603 (2012). *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*. Buenos Aires, Argentina.
- IRAM 11900 (2017). *Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo y etiquetado de eficiencia energética*. Buenos Aires, Argentina.
- ISO 13786 (2017). *Thermal Performance of Building Components – Dynamic Thermal Characteristics – Calculation Methods*, International Organization for Standardization.
- ISO-6946 (2017). *Building Components and Building Elements – Thermal Resistance and Thermal Transmittance – Calculation Method*, International Organization for Standardization.
- Karmele U. M. y Davies M. G. (2008). One-dimensional solutions to Fourier's equation and measurements of heat transmission through walls: The role of wall decay times. *Building and Environment* **43**, 1433–1445.
- Kaynakli O. A (2012). Review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**, 415–25.
- Liu B.Y.H. y Jordan R.C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* **4**(3), 1–19.
- Marino B. M., Thomas L. P. y Muñoz N. (2018). Calculation of the external surface temperature of a multi-layer wall considering solar radiation effects. *Energy and Buildings* **174**, 452–463.
- Marletta L., Evola G., Giuga M. y Sicurella, F. (2013). The Admittance Method for Calculating the Internal Temperature Swing in Free Running Buildings. *BSA2013, (Bozen-Bolzano, Italy: IBPSA-ITALY)*, 59–68.
- Mazzeo D., Oliveti G., De Simone M. y Arcuri N. (2015). Dynamic thermal characteristics of opaque building components. A proposal for the extension of EN ISO 13786. *Energy Procedia* **78**, 3240–3245.
- Thomas L. P., Marino B. M. y Muñoz N. (2018). Evaluación de la importancia relativa de las contribuciones al flujo de calor a través de los muros de la envolvente incluyendo los efectos de la radiación solar. Memorias XLI Reunión de Trabajo de Energías Renovables y Ambiente, Córdoba, Argentina.
- Thomas L. P., Marino B. M. y Muñoz N. (2019). Steady-state and time-dependent heat fluxes through building envelope walls: a quantitative analysis to determine their relative significance all year round. *Journal of Building Engineering* **29** 101122.
- Volantino V. L. y Etchehoury E. M. (2002). Evaluación del comportamiento térmico de muros en función de su absorptancia solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **6**, 8.97–8.101.