

INDICADOR DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA VIVIENDA MODELADO DE LA TEMPERATURA INTERIOR

L. M Iannelli¹, J. A. Fiora², S. Gil³

Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), Escuela de Ciencia y Tecnología
Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Energía
Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS)
e-mail: sgil@unsam.edu.ar

Publicado en Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente

Año 2015

<https://www.mendoza-conicet.gob.ar/lahv/soft/averma/lista.php?a=2015>

RESUMEN: El consumo de energía en edificios para acondicionamiento, es aproximadamente el 16 % del total en Argentina. Uno de los grandes desafíos es mitigar emisiones de Gases de Efecto Invernadero y buscar un uso racional y eficiente de la energía. Disminuir el consumo de energía nos beneficia económicamente, preserva recursos naturales y disminuye la necesidad de importar energía. En este trabajo se presenta un modelo para predecir las temperaturas interiores de una vivienda, como función de la temperatura exterior, condiciones de aislación térmica, masa de la construcción y número de renovaciones de aire. En nuestro modelo estas características determinan el valor de un parámetro, cuyo valor puede obtenerse estudiando cómo varía la temperatura interior como función de la exterior. El modelo predice la cantidad de energía para acondicionamiento de dicha vivienda, en distintas regiones bioclimáticas del país. Este parámetro podría ser útil como un indicador de eficiencia energética de una vivienda.

Palabras Claves: Indicadores; eficiencia energética; ahorro de energía; reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

INTRODUCCIÓN

El consumo de energía en edificios (Lloyd, 2012) por acondicionamiento térmico, es aproximadamente el 16% del total en Argentina, Figura 1. Este consumo es comparable a la energía que se importa anualmente, del orden del 12%. Existen varias maneras de disminuir y eficientizar el consumo de energía en calefacción y refrigeración: adecuada aislación térmica de paredes, techos y aberturas (Bourges, 2014), disminución del tamaño de los equipos de acondicionamiento de interiores, regulación adecuada de las temperaturas de los termostatos (Prieto, 2014), etc. Reducir el consumo beneficia a usuarios, aminora las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y reduce la importación de energía (Gil, 2014).

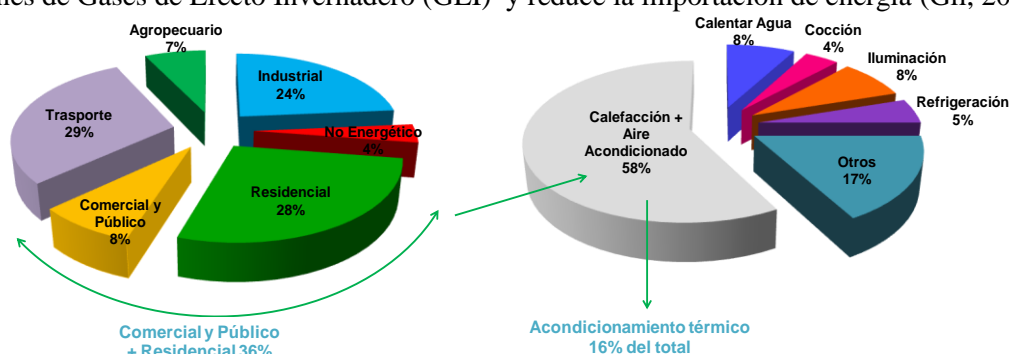


Figura 1: Usos de la energía en Argentina. Aproximadamente el 16% (igual al 58% del 36%) del total de la energía, se utiliza en acondicionamiento térmico de ambientes (calefacción y aire acondicionado). Secretaría de Energía de la Nación Argentina, 2013.

¹ Investigadora UNSAM

² Profesional INTI-Energía

³ Profesional UNSAM

Uno de los grandes desafíos del siglo XXI es mitigar emisiones de GEI, responsables del calentamiento global y buscar un uso más racional y eficiente de la energía (Decreto 140, 2007). Eficientizar el consumo de energía beneficia económicamente a los usuarios y al país: contribuye a disminuir el costo de nuestras facturas y disminuye la necesidad de importar gas (Figura 2); preservar recursos naturales y satisfacer demandas de energía.

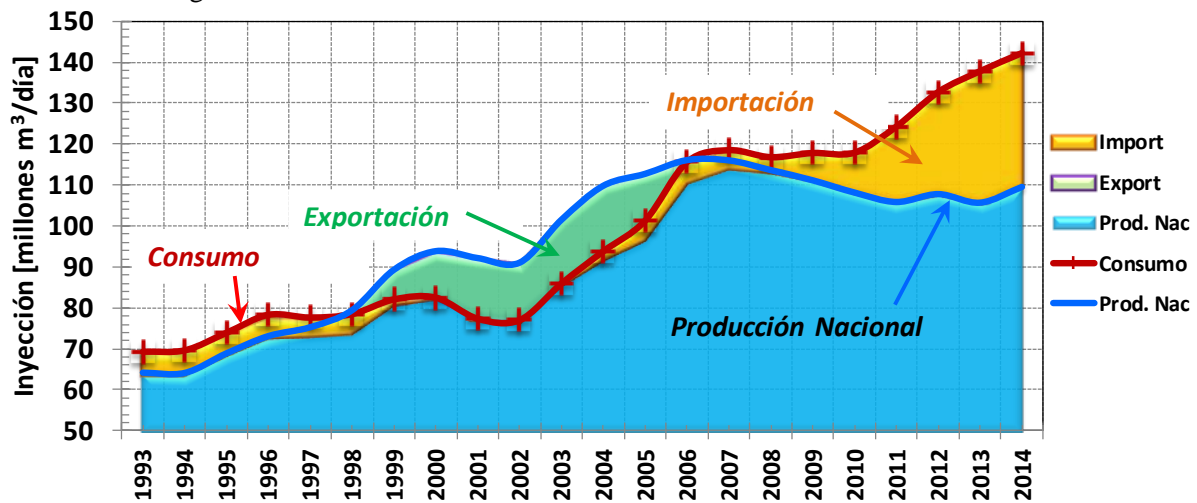


Figura 2: Evolución de la producción nacional (ENARGAS, 2014) e importación de gas natural en función de los años. A partir de 2005, la producción nacional de gas ha venido disminuyendo, hasta 2013. Consecuentemente la fracción de gas importado creció.

La necesidad de encender la calefacción o refrigeración en una vivienda depende de su temperatura interior. La propuesta de este trabajo es modelar la temperatura interior, como función de la temperatura exterior, las condiciones de aislación térmica de la envolvente y masa de la construcción y el número de renovaciones de aire de la casa. Para poner a prueba el modelo, se midió la temperatura ambiente interior y exterior de dos viviendas que no tienen calefacción ni aire acondicionado, durante varios meses. Los resultados del modelo elaborado se contrastan con estos datos empíricos.

En el modelo elaborado, la temperatura interior depende de dos parámetros independientes, la ganancia solar y la aislación térmica de la envolvente y la temperatura exterior. A partir de estos estudios es posible obtener un parámetro crítico para caracterizar las propiedades térmicas de la envolvente, las renovaciones de aire y la masa de la construcción. Este parámetro se obtiene fácilmente y confiablemente de los datos medidos, aún sin conocer las características constructivas de la vivienda. Además, podría ser útil como un indicador para caracterizar la eficiencia térmica de una construcción.

Por otra parte, este modelo permite predecir la cantidad de energía necesaria para la calefacción y refrigeración, en distintas regiones bioclimáticas del país (IRAM 11603, 1996).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron data loggers de temperatura "Thermochron iButton", para medir las temperaturas interiores en forma horaria. Dichos registradores se colocaron en dos habitaciones sin calefacción o aire acondicionado de sendas construcciones, con distintas características de aislación térmica. La temperatura exterior se registraba en forma horaria en una estación meteorológica. Se estudiaron las temperaturas interiores por varios meses.



Figura 3: Data-logger de temperatura "Thermochron iButton".

MODELOS TEÓRICOS

En este trabajo se comparan los resultados medidos de las temperaturas interiores y exteriores medidas con dos modelos para vincular estas temperaturas y junto a demás parámetros de la construcción. El primer modelo (**modelo 1**) analizado para obtener la temperatura de una vivienda, es un modelo sobre simplificado, utiliza sólo la temperatura exterior. La razón de considerar este modelo, es que a menudo el parámetro resultante del mismo, la *temperatura efectiva*, es frecuentemente usado para determinar los consumos de gas, (Gil, 2004). En este esquema se compara la temperatura interior con la temperatura efectiva, T_{ef} , que se define como el promedio entre la temperatura diaria externa y la temperatura promedio externa de los dos días anteriores.

$$T_{ef}(i) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{T_{i-2} + T_{i-1}}{2} + T_i \right), \quad (1)$$

donde; $T_{ef}(i)$ es la temperatura efectiva del día que se quiere hallar, T_{i-1} es la temperatura media externa del día anterior, T_{i-2} es la temperatura media externa de dos días anteriores y i es un índice que determina el día.

Una variación de la temperatura efectiva, Ec.(1), viene dada por:

$$T_{ef}^c(i) = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{T_{i-2} + T_{i-1}}{2} + T_i \right) + \Delta T_0, \quad (2)$$

donde ΔT_0 , es un "offset" de temperatura, que se determina empíricamente.

En el **modelo 2** se asimila la vivienda a una caja o recinto, que suponemos se comporta como una caja de volumen V y masa efectiva M_{ef} (incluye las paredes, techo y aire interior), cuya capacidad calorífica efectiva es C_{ef} y el coeficiente de conductividad térmica efectiva de la envolvente es K_{ef} . La temperatura interior, que es lo que se desea predecir, se designa con $T_{in}(t)$. La temperatura exterior es $T_{ex}(t)$.

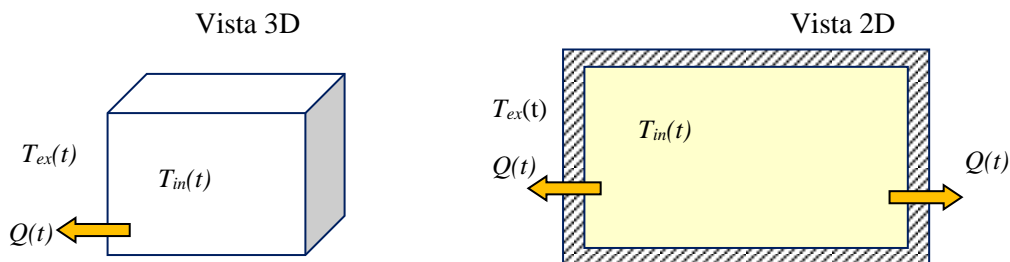


Figura 4: Modelo simple de una vivienda, $T_{in}(t)$ es la temperatura interior de la vivienda y $T_{ex}(t)$ es la temperatura exterior.

Del balance energético y la ley de Fourier (Cengel 2007) obtenemos la siguiente ecuación diferencial:

$$M_{ef} \cdot C_{ef} \cdot \frac{dT_{in}(t)}{dt} = -\tilde{K}_{ef} [T_{in}(t) - T_{ex}(t)] - n \cdot c_a \cdot m_{air} [T_{in}(t) - T_{ex}(t)], \quad (3)$$

en donde el término de la izquierda es la variación energía por unidad de tiempo o potencia necesaria para incrementar la temperatura del interior del recinto o vivienda, el término de la derecha es la

transmisión de calor por conducción y la pérdida de calor por renovaciones de aire. Aquí n es el número de renovaciones de aire por unidad de tiempo, c_a el calor específico del aire y m_a la masa de aire de la vivienda. Si definimos la magnitud $K_{ef} = \tilde{K}_{ef} + n \cdot c_a m_{air}$, la Ec. (3) se puede escribir como:

$$\frac{dT_{in}(t)}{dt} = -\frac{K_{ef}}{M_{ef} \cdot C_{ef}} [T_{in}(t) - T_{ex}(t)] = -\frac{1}{\tau} [T_{in}(t) - T_{ex}(t)], \quad (4)$$

donde se define $\tau = M_{ef} \cdot C_{ef} / K_{ef}$. Esta ecuación diferencial también puede escribirse como:

$$\tau \frac{dT_{in}(t)}{dt} + T_{in}(t) = T_{ex}(t). \quad (5)$$

Una posible solución de esta Ec.(5) puede escribirse como:

$$T_{in}(t) = A_0 \cdot e^{-t/\tau} + c \cdot \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t-t'}{\tau}} \cdot T_{ex}(t') \cdot dt'. \quad (6)$$

Si se deriva esta expresión, se tiene:

$$\tau \frac{dT_{in}(t)}{dt} = -A_0 \cdot e^{-t/\tau} - c \cdot \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t-t'}{\tau}} \cdot T_{ex}(t') \cdot dt' + c \cdot \tau T_{ex}(t) = -T_{in}(t) + c \cdot \tau T_{ex}(t), \quad (7)$$

que claramente satisface a la Ec.(5). Por lo tanto la Expresión (7) es una solución posible, si $c \cdot \tau = 1$ o sea $c = 1/\tau$. El coeficiente A_0 depende de las condiciones iniciales, es decir del valor de $T_{in}(0)$. Por lo tanto, la solución buscada es:

$$T_{in}(t) = A_0 \cdot e^{-t/\tau} + \frac{1}{\tau} \cdot \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t-t'}{\tau}} \cdot T_{ex}(t') \cdot dt'. \quad (8)$$

Si para $t=0$, $T_{in}(0)=T_0$:

$$T_{in}(0) = A_0 \cdot e^{-0/\tau} + \frac{1}{\tau} \cdot \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{0-t'}{\tau}} \cdot T_{ex}(t') \cdot dt' = T_0, \quad (9)$$

donde, despejando A_0 se obtiene:

$$A_0 = T_0 - \frac{1}{\tau} \cdot \int_{-\infty}^0 e^{\left[\frac{t'}{\tau}\right]} \cdot T_{ex}(t') \cdot dt'. \quad (10)$$

Otra forma de expresar la Ec.(8) es:

$$T_{in}(t) = T_0 \cdot e^{-t/\tau} + \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^t e^{-\left[\frac{t-t'}{\tau}\right]} \cdot T_{ex}(t') \cdot dt'. \quad (11)$$

Resulta útil introducir en este modelo un parámetro adicional para tener en cuenta otros posibles efectos, a través de un parámetro aditivo ΔT_0 , es decir:

$$T_{in}(t) = T_0 \cdot e^{-t/\tau} + \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^t e^{-\left[\frac{t-t'}{\tau}\right]} \cdot T_{ex}(t') \cdot dt' + \Delta T_0. \quad (12)$$

RESULTADOS

Durante 168 días (desde el 11 de noviembre de 2014 hasta el 28 de abril de 2015) se realizaron las mediciones de las temperaturas ambiente interior de las habitaciones, una ubicada en San Martín (SM) y la otra en Vicente López (VL). Posteriormente, se realizó un gráfico en el que se incluyeron además de las mencionadas temperaturas, las temperaturas ambiente exterior de la estación meteorológica automática de la UNSAM (edificio Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, 3IA), ver Figura 5.

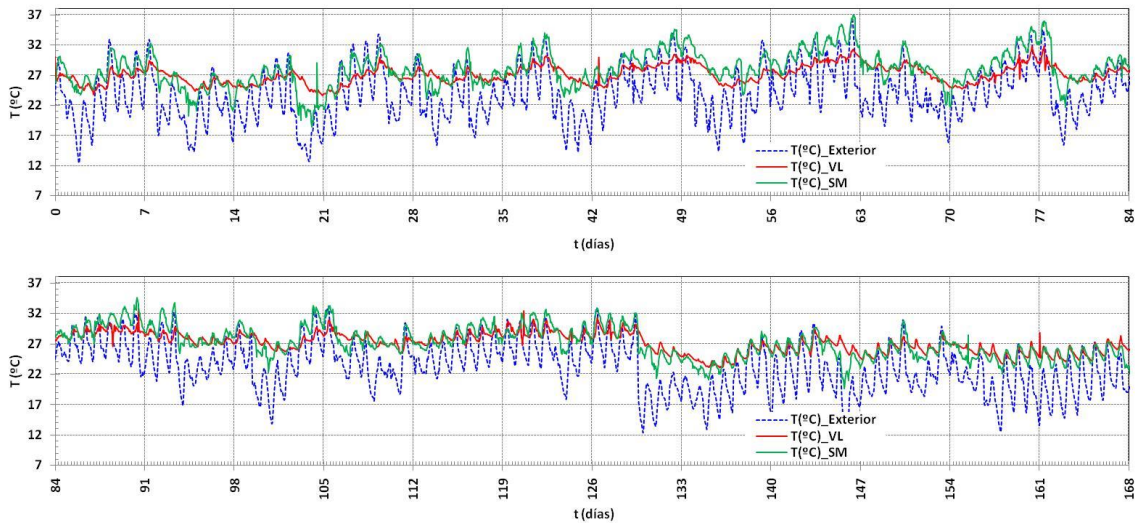


Figura 5: Temperatura ambiente exterior de la estación meteorológica del 3IA (curva azul), temperatura en una habitación de Vicente López (curva roja) y San Martín (curva verde).

En la Figura 6 se muestra esquemáticamente el modelo 1. Se observa que con este modelo simple y sencillo, se puede obtener una descripción aceptable de los datos de la temperatura dentro de una vivienda, a partir de los datos de la temperatura exterior. Esto sea quizás la explicación de porqué este parámetro resulta adecuado para describir los consumos de gas para calefacción. En el primer gráfico, la curva roja representa los datos de temperatura en el interior de la habitación ubicada en Vicente López. En el segundo gráfico, la curva verde indica los datos de temperatura en el interior de la habitación ubicada en San Martín. En ambos, la curva negra punteada representa el modelo 1.

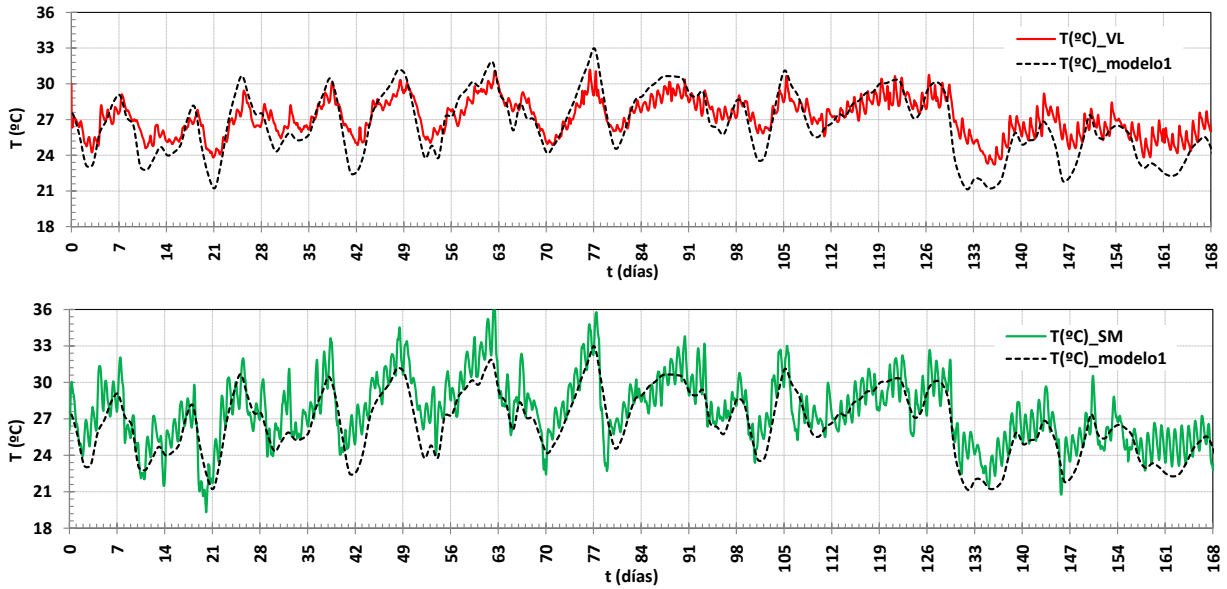


Figura 6: Temperatura en el interior de las habitaciones, en el gráfico de arriba habitación en Vicente López (curva roja) y en el de abajo en San Martín (curva verde), la curva negra punteada representa el modelado.

El segundo modelo utilizado, modelo 2, es decir Ec. (12), se representa en la Figura 7:

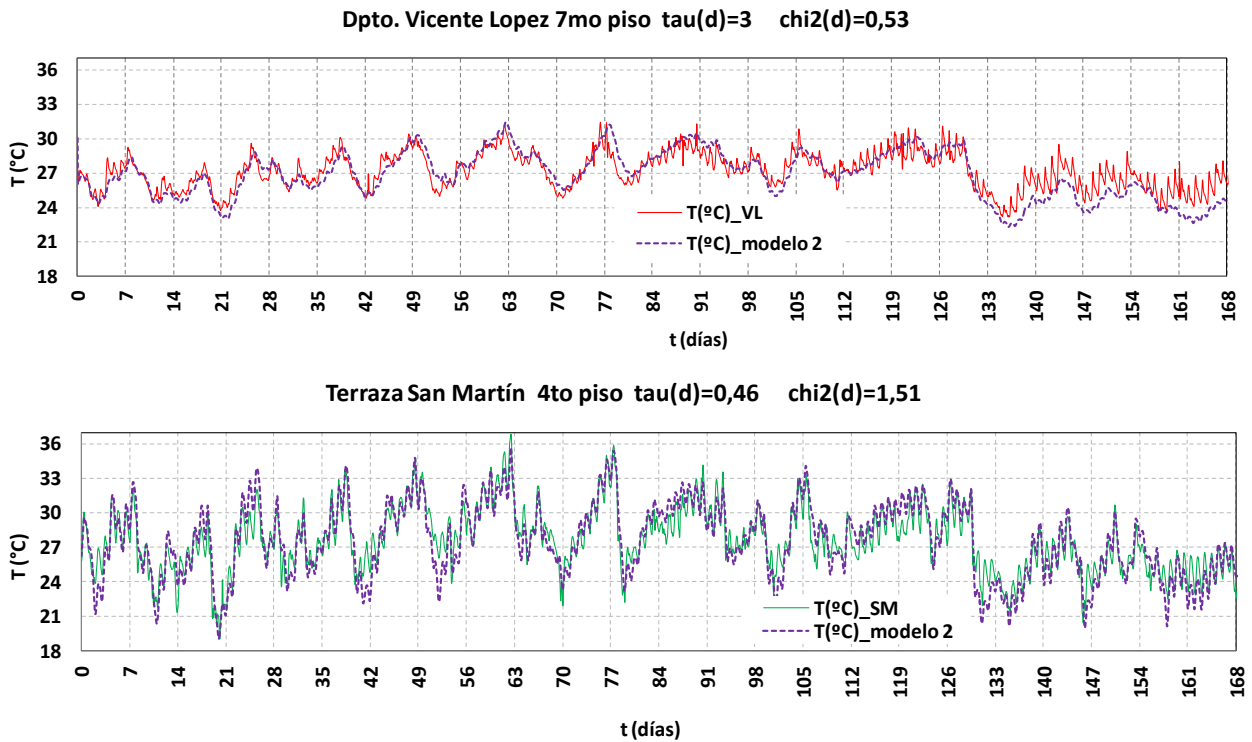


Figura 7: Temperatura en el interior de las habitaciones, en el gráfico de arriba habitación en Vicente López (curva roja) y en el de abajo en San Martín (curva verde), la curva violeta punteada representa el modelado.

En la Figura 7 la curva roja del gráfico superior, representa los datos de temperatura en el interior de la habitación ubicada en Vicente López. En el gráfico inferior, la curva verde indica los datos de temperatura en el interior de la habitación ubicada en San Martín. En ambos, la curva violeta representa el modelo 2.

Se puede observar que el modelo 2 (Figura 7), ajusta mucho mejor los datos medidos de temperaturas interiores que el modelo 1 (Figura 6).

Del mejor ajuste del modelo 2 se puede obtener el parámetro, τ , que está relacionado con la aislación térmica media de la envolvente de la vivienda y las renovaciones de aire. Es de esperar que una vivienda con buena aislación térmica tenga un τ alto.

Como se puede observar en la Tabla 1, el τ obtenido con los datos de la temperatura interior de Vicente López es mayor que el obtenido en la habitación de San Martín. Esto se corresponde con el hecho que efectivamente el departamento de Vicente López tenía una mejor aislación de la envolvente y además tenía una protección térmica adicional provista por pisos superiores e inferiores.

Habitación	τ (día)	ΔT_0
Vicente López	$3,00 \pm 0,53$	3,3
San Martín	$0,46 \pm 1,51$	4,1

Tabla 1: τ y ΔT obtenidas del ajuste del modelo 2, en las habitaciones de Vicente López y San Martín.

De este modo, el parámetro τ , para un dado nivel de renovaciones de aire, podría utilizarse como indicador de las características de aislación de la envolvente o un indicador de eficiencia energética de la vivienda, cuyo valor se puede determinar fácilmente con un ensayo empírico como el indicado en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A la profesora Lic. Diana Mielnicki por brindar las mediciones de la Estación Meteorológica Automática del 3IA.

CONCLUSIONES

Se pudieron modelar muy adecuadamente las temperaturas interiores de dos construcciones diferentes, usando un modelo simple, que tiene en cuenta las temperaturas exteriores, las características térmicas de la envolvente, la masa de la construcción y el número de renovaciones de aire de la vivienda. En esta primera versión del modelo, los aportes de radiación solar directa no se han incluido. Del ajuste de los datos se obtuvo información de las características de aislación térmica media de la envolvente, sin necesidad de conocer las características constructivas. El modelo depende básicamente de dos parámetros: parámetro tau (τ) permite caracterizar la eficiencia energética de la construcción y ΔT , un parámetro empírico. En particular el parámetro tau depende de las características de aislación de la envolvente y podría usarse como un indicador de eficiencia energética de la vivienda.

BIBLIOGRAFÍA

- María Lloyd, ¿Cuánta energía consumirá tu casa?, Revista Clubhouse, 31 octubre de 2012.
- C. Bourges y S. Gil, Amortización del costo de mejoras en la aislación térmica de las viviendas, Revista Petrotecnia, Febrero de 2014. http://www.petrotecnia.com.ar/febrero14/Petro_1-2014.pdf
- S. Gil and J. Deferrari, Generalized model of prediction of natural gas consumption, Journal of Energy Resources Technology Journals of The American Association of Mechanical Engineers.(ASME International), Vol. 126 June 2004 90-98. ISSN: 0195-0738.
- Cengel, Y. A., Transferencia de Calor y Masa. Un enfoque práctico, Tercera Edición ed., México: Mc Graw Hill, 2007.
- S. Gil, ¿Es posible disminuir nuestras importaciones de gas?, Revista Petrotecnia, pág. 82-91, agosto de 2014. <http://www.petrotecnia.com.ar/agosto2014/xSeparadosinPublicidad/EsPosible.pdf>
- Secretaría de Energía de la Nación Argentina. (2010): <http://energia3.mecon.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3366>
- Decreto 140/2007, Programa Nacional de Uso Racional y Eficiente de la Energía, 21 de diciembre de 2007, <http://infoleg.mecon.gov.ar/infolegInternet/anexos/135000-139999/136078/norma.htm>

ENARGAS, Transporte y Distribución, Datos Operativos,
<http://www.enargas.gov.ar/DatosOper/Indice.php>
Instituto Argentino de Normalización (IRAM), Acondicionamiento Térmico de Edificios, Clasificación bioambiental de la República Argentina, diciembre de 1996.
Registrador de Temperatura, <http://ibutton.cl/>
R. Prieto y S. Gil, Regulación del termostato: un modo simple y racional de ahorrar energía en calefacción y refrigeración, Petrotécnica (Revista del IAPG) LV, N^o5, pág. 102-104, diciembre de 2014. ISSN 0031-6598.

ABSTRACT: Energy consumption in buildings for conditioning, is about 16% of the total consumption in Argentina. One of the great challenges is to mitigate emissions of greenhouse gases (GHG) and look for rational and efficient uses of energy. The reduction of energy consumption benefits the country economically, it preserves natural resources and reduces the need to import energy. This paper presents a model to predict the interior temperatures as a function of the outside temperature, of the thermal insulation of the building envelope, of the building mass and of the number of air exchanges in the building per unit of time. In our model, all these characteristics are described by the value of a single parameter. This value can be obtained by studying how the internal temperature varies as a function of the outside temperature. The model allows us to predict the amount of energy required for conditioning a house in different bioclimatic regions. The main parameter of the model may be used as an indicator of energy efficiency of a house.

Keywords: Indicators; energy efficiency; energy saving; reducing emissions of greenhouse gases.