

## APLICACIÓN PARA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO DE VIVIENDAS METODOLOGÍA DE DIAGNÓSTICO

H. Girini , R.Navas , R.Romarión, M. Girini

Centro de Investigación para la Racionalización de la Construcción Tradicional (CIRCOT)

Facultad de Ingeniería - CP5400-San Juan

Av. Libertador 1109 oeste

Tel. 0264- 4211700 . Fax 0264- 4200289 .e-mail: [circot@unsj.edu.ar](mailto:circot@unsj.edu.ar)

Universidad Nacional de San Juan

República Argentina

**RESUMEN:** El trabajo se enmarca principalmente en el desarrollo de la Arquitectura e Ingeniería Bioclimáticas con el fin de lograr proyectos y obras adaptadas a las condiciones particulares del clima y a la obtención del confort interior con el menor costo posible. como asimismo lograr un mejor aprovechamiento térmico de los materiales de construcción.

La determinación del comportamiento con una precisión razonable y posible según nuestras propias posibilidades y para nuestro medio se vuelve fundamental para diagnosticar viviendas ya construidas o proyectos en ejecución.

Los objetivos fundamentales y alcances del trabajo de investigación fueron: Desarrollar una metodología para evaluar los principales componentes responsables del comportamiento higrotérmico de viviendas, con el consiguiente desarrollo del software requerido. Este software consistió en el desarrollo de una aplicación en régimen variado bajo entorno Excel de Windows y es lo que se expone en el presente artículo.

Las principales limitaciones son directamente proporcionales al programa base usado. Se comprobó su utilidad en varios trabajos de diagnóstico de problemas encomendados, como asimismo en la posibilidad de comparación de distintas viviendas, concluyendo en que se ha obtenido una buena herramienta de diagnóstico y diseño.

**Palabras claves:** Viviendas, Confort, Simulación térmica, Predicción, Diagnóstico, Comparación.

### INTRODUCCIÓN

Si bien el proyecto tiene como suficiente justificativo el marco de las ciencias Bioclimáticas, surge posteriormente a un estudio desarrollado en el mismo Centro referente a Calidad de Diseño de Viviendas de Interés Social, en donde quedó demostrado que el tema higrotérmico ocupaba un lugar importante en la problemática de habitabilidad.

Surge así la idea de desarrollar la herramienta principal que nos permitiera llevar a cabo los estudios necesarios de diagnóstico y planteo de posibles soluciones a los diferentes problemas encontrados. Asimismo y como su principal ventaja, es que presenta gran flexibilidad y adaptabilidad a diferentes situaciones que no dispondríamos con otros programas ya que permite aplicaciones a construcciones como invernaderos, silos, piletas climatizadas, etc. es decir tipo de edificación donde existan problemas de humedad y temperatura. Por otro lado se ha desarrollado un nuevo software disponible y utilizable por alumnos de nuestra Facultad de Ingeniería.

La aplicación denominada Site 1, desarrollada en planilla de cálculo realiza simulaciones del comportamiento higrotérmico de ambientes edilicios. La resolución matemática del problema físico se realiza por el método de diferencias finitas, obteniéndose como resultados la temperatura y la humedad en el interior de los ambientes y su evolución en el tiempo, además de obtener los distintos flujos horarios de calor diferenciados, tales como infiltraciones de aire, conducción, inercia térmica, radiación en elementos opacos, radiación en elementos translucidos, y aportes internos.

La planilla de cálculo realizada dispone de referencias circulares y cálculo iterativo, para la actualización de los valores de las variables estudiadas; también dispone de macros para mejorar la selección de materiales, y de filtros que limitan la entrada de datos erróneos.

### DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Se considera un ambiente, que puede intercambiar calor con elementos expuestos al exterior, en contacto con el terreno, dentro del mismo ambiente y con otros ambientes interiores. El intercambio de masa de aire se considera solamente con el ambiente externo.

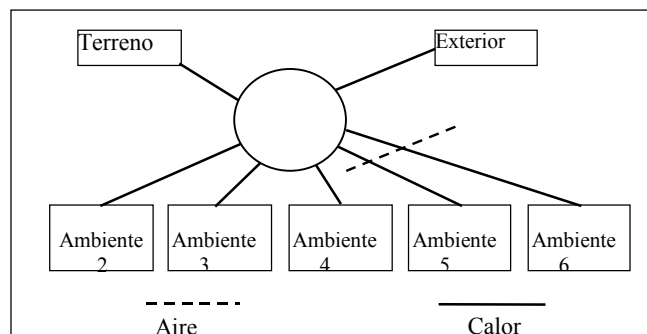


Figura 1: Esquema de intercambio de masas de aire y calor con el ambiente 1 en estudio.

Dichos elementos pueden ser opacos o translucidos, con o sin capacidad de almacenar calor, con la posibilidad de absorber radiación solar en superficies exteriores e interiores, inclusive elementos translúcidos pueden absorber radiación solar en cada una de las capas que los forman. Cada elemento puede tener cualquier orientación e inclinación.

Los elementos se consideran formados por capas de hasta 10 materiales diferentes, dichos materiales se seleccionan de una base de datos modificable por el usuario, en donde se almacenan las propiedades físicas que interesan en el comportamiento térmico.

Se puede considerar la opción de colocar cortinas interiores, opacas o que permitan el paso de la luz, en los elementos translucidos. Se tienen en cuenta elementos con sombra parcial.

Es necesario disponer de datos horarios de temperatura, que pueden ser experimentales, para el lapso de una semana, simulados, en donde se asume una variación sinusoidal diaria y anual, en función de datos globales, tales como temperatura máxima, media y mínima anual, o mixtos, en donde dados los valores horarios de temperatura para el lapso de un día cualquiera y de datos globales, se obtiene una curva de temperatura que posee la misma forma que la experimental, pero extrapolada a la semana concreta de estudio.

Los valores horarios de Irradiancia solar sobre superficie horizontal pueden ser experimentales, o simulados automáticamente para cielo claro o para días completamente nublados, según el método de Hottel (1976) ; Liu y Jordan (1960)

Además son necesarios valores horarios de humedad relativa y velocidad de viento.

## MÉTODO DE CALCULO

Como método de calculo, se reemplazan los diferenciales de las variables por sus incrementos, avanzando a intervalos de tiempo  $\Delta t$ , en donde  $\Delta t$  no es constante, sino que puede disminuir cuando se detectan errores en los valores de incrementos de temperatura  $\Delta T$  de cualquier capa, dado por una secuencia de sus signos alternantes, o aumentar linealmente hasta un valor  $\Delta t$  máximo dado como dato.

Se parte de valores conocidos de temperatura en el centro de cada capa, para lo cual se adopta una temperatura variable dentro del elemento, correspondientes al régimen estacionario, según la siguiente ecuación:

$$T^{\circ}(i) = (T^{\circ} \text{ ext} + (\alpha \text{ ext} \cdot G \text{ Text} \cdot R \text{ se})) - [K \cdot [(T^{\circ} \text{ ext} + (\alpha \text{ ext} \cdot G \text{ Text} \cdot R \text{ se})) - (T^{\circ} \text{ int} + (\alpha \text{ int} \cdot G \text{ T int} \cdot R \text{ si}))] \cdot (R \text{ se} + \sum_{j=1}^{j=i-1} \frac{e_j}{\lambda_j} + \frac{e_i}{\lambda_i \cdot 2})] \quad (1)$$

$T^{\circ}(i)$  = Temperatura inicial en el centro de capa  $i$ , numerada desde la capa exterior ( $i=1$ ) hasta la capa interior ( $i=10$ )

$T^{\circ} \text{ ext}$  = Temperatura exterior

$T^{\circ} \text{ int}$  = Temperatura interior

$\alpha \text{ ext}$  = Absortancia de la luz solar de superficie exterior

$\alpha \text{ int}$  = Absortancia de la luz solar de superficie interior

$G \text{ T ext}$  = Irradiancia sobre superficie exterior

$G \text{ T int}$  = Irradiancia sobre superficie interior

$R \text{ se}$  = Resistencia superficial exterior

$R \text{ si}$  = Resistencia superficial interior

$e$  = Espesor de capa

$\lambda$  = Coeficiente de conductibilidad térmica

$K$  = Transmitancia térmica del elemento

Dado un incremento de tiempo  $\Delta t$ , se determina el calor transmitido por conducción entre capas adyacentes, el calor ganado por absorción de radiación en capas superficiales expuestas al exterior y al interior (efecto invernadero), la entalpía de la masa de aire que ingresa y egresa, la energía aportada por fuentes internas, el calor transmitido entre el aire y superficies expuestas, luego se realiza un balance térmico de cada capa y del aire interior, para determinar en función de su masa y calor específico, la variación de temperatura correspondiente y la temperatura final del instante  $t + \Delta t$ . La ecuación que determina la temperatura del aire interior en el instante  $t + \Delta t$  es la siguiente:

$$T^{\circ} 1(t + \Delta t) = \frac{\sum H + [T^{\circ} 1(t) \cdot c_p(t) \cdot \rho(t) \cdot Vol 1]}{c_p(t + \Delta t) \cdot \rho(t + \Delta t) \cdot Vol 1} \quad (2)$$

$T^{\circ} 1(t + \Delta t)$  = Temperatura del aire del ambiente 1, en  $^{\circ} \text{k}$ , en el instante  $t + \Delta t$

$T^{\circ} 1(t)$  = Temperatura del aire del ambiente 1, en  $^{\circ} \text{k}$ , en el instante  $t$

$\sum H$  = Suma de todos los calores aportados al aire interior, durante el intervalo  $\Delta t$ , incluyendo el aportado por infiltraciones de aire.

$c_p$  = Calor específico del aire húmedo a presión constante

$\rho$  = Densidad del aire húmedo

$Vol 1$  = Volumen de aire del ambiente 1

La humedad del aire interior se determina en función de los caudales de aire que ingresan y egresan y de sus contenidos de vapor de agua, realizando un balance según el principio de conservación de la materia. La dificultad radica en determinar dichos caudales. En un primer momento se realizó un modelo que contemplaba el cálculo de caudales por diferencias de presión, entre el interior y el exterior, para cada una de las aberturas, determinando la presión exterior según su orientación con respecto a la dirección del viento y su velocidad, pero se comprobó que eran necesarios incrementos de tiempo muy

pequeños, haciendo el cálculo lento (aprox. 12 horas en PC 566 mhz), y que además no se tenía en cuenta la circulación de aire por convección natural, por lo que se adoptó un criterio simplificado de determinación de las renovaciones de aire, con valores horarios, dados por el tipo de carpintería, su superficie y la velocidad del viento, sin tener en cuenta su orientación, con esta modificación el tiempo de cálculo se redujo a 5 minutos, para una semana de simulación. Las ecuaciones empleadas en la determinación de la humedad son las siguientes:

Humedad absoluta:

$$\rho_{\text{vapor 1}}(t = t + \Delta t) = \frac{\rho_{\text{vapor 1}}(t) \cdot Vol_1 + \rho_{\text{vapor ext}}(t) \cdot Q_{\text{ing}}(t) \cdot \Delta t - \rho_{\text{vapor 1}}(t) \cdot Q_{\text{egr}}(t) \cdot \Delta t - \frac{Masa_{\text{vapor cond.}}(\text{en } \Delta t)}{Vol_1}}{Vol_1} \quad (3)$$

$\rho_{\text{vapor}}$  = Densidad de vapor = Humedad absoluta  
 $Q_{\text{ing}}$  = Caudal de aire húmedo ingresante  
 $Q_{\text{egr}}$  = Caudal de aire húmedo saliente

Humedad relativa:

$$HR[\%] = \frac{P_{\text{vapor}}}{P_{\text{vapor saturado}}} \cdot 100 = \frac{\frac{\rho_{\text{vapor}} \cdot R \cdot T^\circ}{M_{\text{vapor}}}}{P_{\text{vapor saturado}}} \cdot 100 \quad (4)$$

HR[%] = Humedad relativa  
 $M_{\text{vapor}}$  = Peso molecular del vapor = 0,0180 kg/mol  
 $T$  = Temperatura [k°]  
 $R$  = Cte general de los gases = 8,3144 joule / mol \* k°  
 $P_{\text{vapor}}$  = Presión parcial de vapor

La presión de vapor saturado se obtiene de la relación de Clapeyron:

$$\text{Log } P_{\text{vapor saturado}}[\text{Pa}] = 11,4051 - \frac{2353}{T [\text{k}^\circ]} \quad (5)$$

## RESULTADOS

Los resultados se almacenan cada intervalos de tiempo fijados previamente por el usuario, donde para intervalos de 1 hora, se obtienen series de valores de temperatura, humedad relativa y humedad absoluta del ambiente en estudio para una simulación de duración semanal. Se determinan secuencias de valores horarios de flujos de calor, que se intercambian con el aire interior, correspondiente a infiltraciones de aire en rendijas de carpintería, aportes internos, un flujo que engloba la conducción, la inercia térmica y la radiación y por último se determina el flujo de calor por conducción pura. La separación de los flujos de calor combinados se efectúa realizando tres simulaciones, como se indica a continuación:

1° Simulación: Completo, se obtiene el flujo de calor horario debido a la combinación de (Radiación + Conducción Pura + Inercia térmica)

2° Simulación: Sin radiación, se obtiene el flujo de calor horario debido a la combinación de (Conducción pura + Inercia térmica.)

La diferencia de ambos flujos de calor da como resultado el flujo de calor debido a la radiación solar

Es importante separar el flujo de radiación que ingresa al aire interior en dos: El que ingresa a través de ventanas y superficies expuestas transparentes (efecto invernadero) y el debido a la incidencia de radiación en superficies opacas exteriores. Para ello realizamos una tercer simulación, en donde se suprime la radiación absorbida por elementos opacos, interviniendo solamente la absorbida por efecto invernadero, esto da como resultado:

3° Simulación: Sin radiación en elementos opacos, se obtiene el flujo de calor horario debido a la combinación de (Efecto invernadero + Conducción pura + Inercia térmica.)

La diferencia del flujo combinado obtenido en la primer simulación menos el flujo obtenido en la tercer simulación da como resultado el flujo de calor que llega al aire interior debido a la radiación absorbida en cerramientos opacos

Como resumen, los flujos de calor horarios, que se intercambian en el aire interior de la vivienda obtenidos en forma separada son:

- 1) Flujo de calor aportado por refrigeración o calefacción
- 2) Flujo de calor aportado por infiltraciones de aire en rendijas de carpintería.
- 3) Flujo de calor aportado por efecto invernadero.
- 4) Flujo de calor aportado por radiación solar absorbida en elementos opacos exteriores
- 5) Flujo de calor aportado por conducción pura.
- 6) Flujo de calor aportado por inercia térmica.
- 7) Flujo de calor total

A continuación se ejemplifican resultados y gráficos obtenidos con el programa:

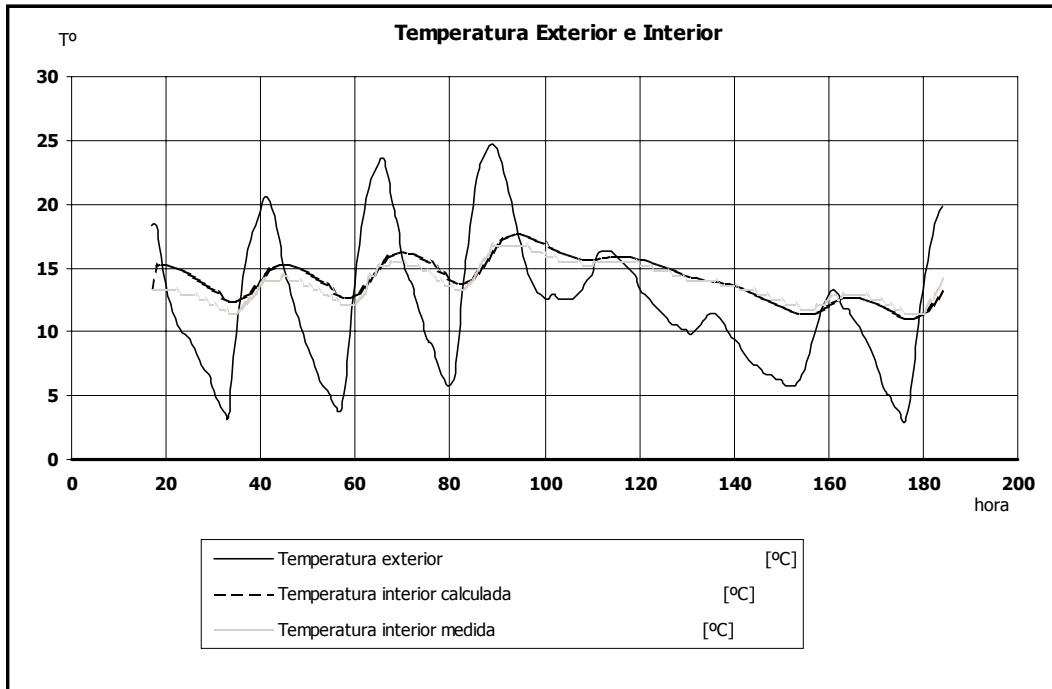


Figura 2: Gráfico de temperaturas para una vivienda del Barrio Santa Lucia, Provincia de San Juan. Las temperaturas exteriores fueron medidas in situ y las interiores una medida y otra obtenida mediante la simulación.

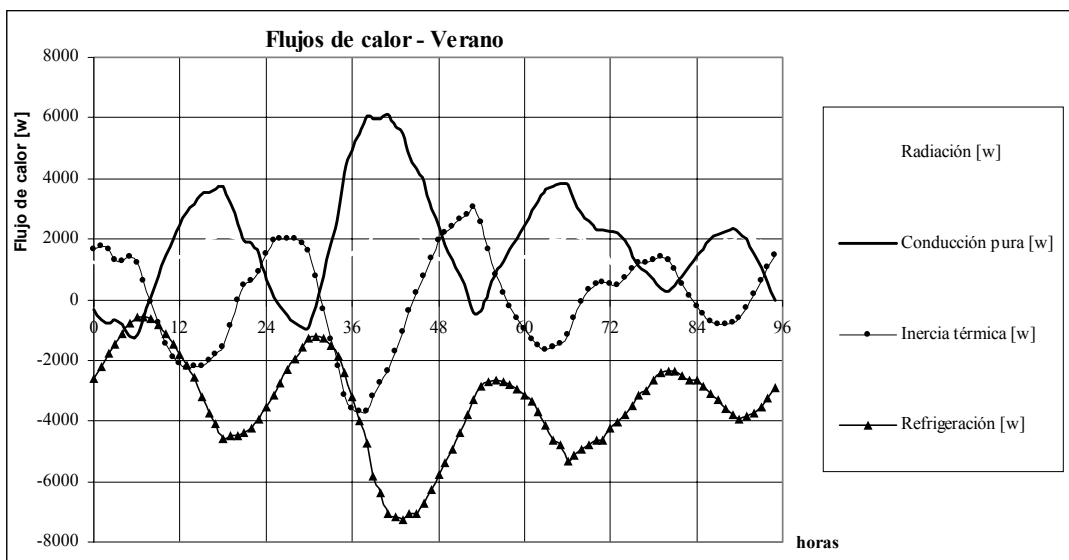


Figura 3: Gráfico de flujos de calor de vivienda del Barrio Presidente Arturo Frondizzi, Provincia de San Juan. Corresponden al mantenimiento de una temperatura interior constante de 21° C.

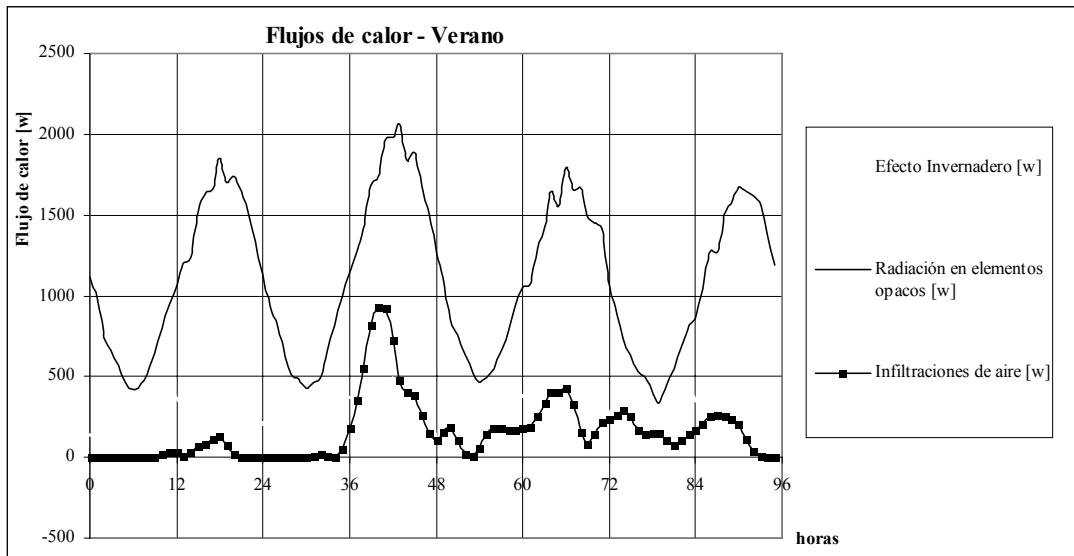


Figura 4: Gráfico complementario de anterior

## CONCLUSIONES

Concluimos que se ha desarrollado una buena herramienta para predecir el comportamiento higrotérmico de proyectos, lógicamente con algunas limitaciones propias dado el carácter de la aplicación.

En estudio de viviendas reales las mediciones de temperatura interior fueron muy aproximadas a las previstas con la simulación. Las pequeñas diferencias encontradas en los valores de humedad los consideramos debido a las simplificaciones que fueron necesarias adoptar por los motivos expuestos anteriormente.

Asimismo consideramos que lo obtenido constituye el primer paso y que en lo sucesivo iremos adaptando y perfeccionando según las diferentes necesidades. La principal limitación actual para este tipo de aplicación es la complejidad de la entrada de datos y tiempo de cálculo en relación a la exactitud de los resultados.

## REFERENCIAS

- Duffie J.A y Beckman W.A. (1980). Solar Engineering of Thermal Processes, 2° edición, capítulos 1-5.  
 Hütte (1965). Manual del Ingeniero, 3° edición española, Cap. III Termología.  
 Paparelli, Kurban, Cunsulo, De Rosa, Lelio y Solanes (1991). Arquitectura y Clima en zonas Áridas. EFU. U.N.S.J.  
 Roy J.Dossat (1970). Principios de Refrigeración, 5° edición, Procesos Termodinámicos, pp 51-83.  
 IRAM-Instituto Argentino de Normalización. Normas: IRAM 11604 (1990), IRAM 11601 (1996),

## ABSTRACT

Este trabajo trata sobre el desarrollo de una metodología de evaluación del comportamiento higrotérmico de ambientes a través de un programa de simulación, realizado en planilla de cálculo y aplicable principalmente a viviendas, edificios, invernaderos, etc.

**Keywords:** Housing, Comfort, Thermic Simulation, Prediction, Diagnosis, Comparative analysis.