

MODELIZACION DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR AL SUELO EN LOS PROGRAMAS DE SIMULACION TERMICA DE EDIFICIOS EnergyPlus y SIMEDIF

Silvana Flores Larsen¹

**INENCO – Universidad Nacional de Salta – CONICET - Avda. Bolivia 5150, 4400 Salta, Argentina
Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255389 – Email: seflores@unsa.edu.ar**

RESUMEN: La inclusión de modelos 2D y 3D de transferencia de calor al suelo en programas de simulación de consumo energético y comportamiento térmico transitorio de edificios es un tema complejo aún en pleno desarrollo. Estudios realizados muestran variaciones de hasta un 30% en los consumos energéticos simulados por diferentes programas existentes en el mercado internacional. El acoplamiento con la tierra influye fuertemente en la temperatura ambiente interior y en la energía consumida para acondicionar los ambientes, especialmente cuando los pisos no cuentan con aislación térmica, como en el caso de las construcciones en Argentina. El presente trabajo compara el modelo utilizado por SIMEDIF y tres modelos de EnergyPlus para la transferencia de calor hacia el suelo para un prototipo ubicado en la ciudad de Salta. Los datos obtenidos de las simulaciones se comparan con datos experimentales obtenidos del monitoreo del prototipo y se establecen conclusiones respecto de cada uno de los modelos estudiados para su utilización en futuras simulaciones.

Palabras clave: EnergyPlus, SIMEDIF, transferencia de calor al suelo, simulación térmica

INTRODUCCIÓN

La transferencia de calor hacia el suelo a través del piso de una construcción puede ser un componente significativo de la carga de calefacción o refrigeración del edificio (Andolsun et al., 2011). El acoplamiento con el suelo es considerado todavía un fenómeno difícil de modelizar debido a que involucra una simulación en tres dimensiones, transporte de humedad, grandes constantes de tiempo, propiedades termofísicas variables, acumulación, entre otros. Para el suelo sin perturbar existen modelos simplificados (Labs et al., 1989), pero cuando se construye un edificio las condiciones del suelo varían, de tal forma que el modelo del suelo sin perturbar pierde validez. La presencia del edificio modifica la distribución de temperatura del suelo desde el momento de su construcción y a través de los años, hasta que se alcanza un estado “cuasi-estacionario” con diferencias significativas respecto de la distribución inicial de temperatura. Esta perturbación puede llegar a ser significativa si el edificio no tiene aislación en el piso y/o si el edificio está calefaccionado o refrigerado. En Argentina no se acostumbra aislar los pisos ni basamentos de edificios, por lo que el acoplamiento térmico entre el edificio y el suelo ejerce una influencia notoria en la temperatura interior y, en consecuencia, en la energía consumida para acondicionar los ambientes que debe ser tenida en cuenta en las simulaciones térmicas.

La simulación de la transferencia de calor desde los edificios hacia el suelo ha sido estudiada en profundidad por varios autores (Clements, 2004; Bahnfleth y Peersen, 1990; Hernández, 2001; Deru, 2003; Alberto y Cardón, 2007; Neymark y Judkoff, 2008) y los métodos de resolución utilizados comúnmente son métodos numéricos 3D de diferencias finitas o elementos finitos, con mallas de discretización que dependen de la geometría del piso o basamento a simular. La inclusión de modelos 2D y 3D en programas de simulación térmica de edificios es un tema complejo debido principalmente a que los modelos de edificios consideran que las superficies son unidimensionales e isotermas (en superficies en contacto con el suelo pueden existir variaciones significativas de temperatura dentro de la misma superficie, por ejemplo, entre el centro y los bordes del piso de un local) y a que la escala de tiempo involucrada en la transferencia de calor en edificios es del orden de horas (en el suelo es de meses). Por estas razones, los programas de simulación utilizan modelos con distintos niveles de complejidad. Algunos estudios realizados sobre estos modelos muestran diferencias de hasta 30% en los consumos energéticos simulados por los programas DOE-2 y EnergyPlus para clima cálido-húmedo (Andolsun et al., 2011). El presente trabajo compara los modelos utilizados por SIMEDIF y EnergyPlus para la transferencia de calor hacia el suelo para un prototipo ubicado en la ciudad de Salta. Los datos obtenidos de las simulaciones se comparan con datos experimentales obtenidos del monitoreo del prototipo, de forma de establecer conclusiones que permitan discernir cuál es el modelo que mejor describe los datos experimentales para el caso analizado y brindar a la comunidad de simulación información relevante a la hora de tomar decisiones sobre los modelos a utilizar y su efecto en las temperaturas y consumos energéticos.

MODELO DE SUELO DE SIMEDIF

Las oscilaciones horarias de temperatura en la superficie del piso se amortiguan al aumentar la profundidad: a 2m de profundidad estas oscilaciones son prácticamente despreciables y la temperatura de la tierra puede considerarse constante y cercana a la temperatura media anual del aire del lugar. Si se supone que el suelo es homogéneo y que la transferencia es

¹ Investigador Adjunto de CONICET

unidimensional, éste puede modelarse como una placa plana de cierto espesor, con propiedades térmicas constantes, cuya temperatura en la base inferior es también constante. Si a esta placa de tierra le agregamos las capas correspondientes al contrapiso del edificio (el cual puede estar compuesto de varias capas de materiales) y si permitimos además que la superficie en contacto con el local pueda recibir radiación solar (proveniente, por ejemplo, de las áreas vidriadas), el modelo resultante es el de la transferencia de calor unidimensional en una placa plana compuesta de varios materiales, con una superficie con flujo de calor proveniente de la absorción de la radiación solar e intercambio convectivo-radiativo hacia el aire interior y con la superficie inferior a temperatura constante e igual a la temperatura media del aire exterior. Este modelo puede incorporarse fácilmente en SIMEDIF utilizando el elemento másico denominado PARED (Figura 1), metodología utilizada desde los '80 para simular pisos con este programa. Para ello, se define al piso como una PARED que conecta el local con el aire exterior: se definen las capas que tuviera el contrapiso, con sus correspondientes propiedades térmicas y se le adiciona una capa de al menos 1m de tierra (usualmente 2m, aunque las simulaciones muestran que con 1m es suficiente). Deben ingresarse los datos de los coeficientes convectivo-radiativos internos y externos, área del piso, área que recibe radiación solar, absorptancia solar y número de puntos con los que se discretizará el elemento. Para la superficie del piso en contacto con el aire interior, los coeficientes globales convectivo-radiativos que se utilizan usualmente son $4-6\text{W}/(\text{m}^2\text{°C})$ (piso que no recibe radiación) y $6-8\text{W}/(\text{m}^2\text{°C})$ (piso asoleado). Debido al modelo físico utilizado por SIMEDIF, estos coeficientes se mantienen constantes para todas las horas de la simulación. Para la superficie "exterior" del piso, se supone un coeficiente convectivo nulo (condición adiabática) de forma que la temperatura a 1m de profundidad se mantiene prácticamente constante e igual a la temperatura

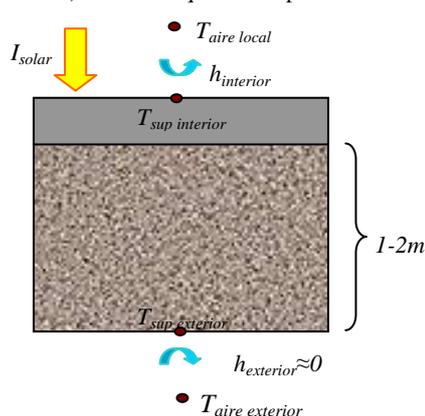


Figura 1. Modelización del piso en SIMEDIF

inicial que el usuario debe ingresar al momento del cálculo (normalmente se utiliza como valor inicial la temperatura promedio del aire exterior en un periodo previo al inicio de la simulación). Este modelo es aproximado, puesto que en realidad la temperatura a 1m de profundidad no necesariamente coincide con la temperatura media del aire. Si el local es acondicionado, una sugerencia es utilizar la temperatura media del local -2°C (Manual de EnergyPlus), valores que pueden ser discutibles en edificios no acondicionados, pequeños y/o sin aislación en el piso. De todas maneras, esta incertidumbre en el valor inicial a ingresar se diluye cuando se simulan varios días previos antes del periodo de interés, cuyo número dependerá de cuán másico sea el edificio. Este periodo previo permite al edificio (es decir, a los nodos con masa, sin masa y a los nodos aire) "entrar en régimen", es decir, que se "olvide" de la temperatura inicial y responda exclusivamente a las condiciones meteorológicas. SIMEDIF utiliza el método de diferencias finitas explícito para discretizar los elementos con masa.

MODELO DE SUELO DE ENERGY-PLUS

EnergyPlus permite al usuario seleccionar entre varios modelos de transferencia de calor al suelo de diferentes niveles de complejidad. El más simple consiste en ingresar un valor de temperatura media de suelo para cada mes del año, el cual es utilizado como condición de borde para la superficie del piso en contacto con la tierra. El programa supone por default una temperatura de 18°C para todo el año que puede ser modificada para ingresar valores de acuerdo al clima del lugar. El manual sugiere no utilizar las temperaturas medias mensuales del suelo "sin perturbar", como las provistas por el Servicio Meteorológico, debido a que se consideran demasiado extremas. Para Estados Unidos la documentación sugiere, para espacios acondicionados, el uso de la temperatura promedio interior del edificio menos 2°C . Como se explicó previamente, este valor no necesariamente es adecuado para Argentina, en donde no es común utilizar aislación térmica en pisos y basamentos.

La segunda opción que ofrece EnergyPlus es utilizar el programa auxiliar *Slab* que se instalan automáticamente con este soft. El modelo utilizado por dicho programa fue desarrollado originariamente por Bahnflet (1989) y Cogil (1998) como un módulo independiente de cálculo, modificado luego por Clements (2004) a fin de adaptarlos al programa EnergyPlus. Bahnflet estableció mediante un estudio detallado 3D de diferencias finitas que el factor de escala para la transferencia de calor de pisos rectangulares y en forma de L no es el perímetro sino el cociente Área/Perímetro, y que el sombreado producido por el mismo edificio modificaba la temperatura del suelo por lo que era necesario considerarlo en los cálculos. El modelo resultante es un problema de condiciones de contorno en 3D. Las propiedades de contorno adoptadas fueron la temperatura interior del piso, la del suelo sin perturbar, la del suelo a gran profundidad y la temperatura superficial del suelo. El usuario debía ingresar las dimensiones del dominio y el espaciamiento de la grilla (máximo de 10.000 celdas, espaciado mínimo de 0.1m), las condiciones meteorológicas, las propiedades termofísicas del suelo (incluidas evaporación y albedo) y del piso (de un único material, con posibilidad de incorporar aislación), la geometría del piso, la temperatura del suelo a gran profundidad y la altura del edificio para el cálculo de sombras. Este modelo fue mejorado por Cogil en 1998, quien incorporó condiciones de borde adicionales en la superficie del piso en contacto con el aire ambiente, cambió el algoritmo de cálculo a diferencias finitas resueltas con el esquema de direcciones alternadas implícito, incorporó la transferencia hacia el ambiente de partes del piso en contacto con el mismo (convección y radiación) y modeló las aislaciones por debajo de las fundaciones y las camas de drenaje bajo pisos y fundaciones.

Para acoplar este modelo 3D del suelo al modelo de EnergyPlus basado en balances de calor en cada zona, se divide el cálculo en dos pasos. En primer lugar, se desacoplan parcialmente ambos problemas (el de la zona térmica y el del suelo), eligiendo como plano de separación la superficie exterior del piso (es decir, aquella que está en contacto con el suelo). El problema de suelo se resuelve mediante el modelo 3D mencionado (para lo cual será necesario conocer la temperatura de la superficie de separación cuya estimación se explica luego) mientras que el problema de la zona térmica se resuelve mediante

el modelo de EnergyPlus (para lo cual también será necesario conocer la temperatura de la superficie de separación, con la cual se calcula la temperatura del piso en contacto con el aire interior). Se asume que la temperatura superficial media mensual de suelo es un valor razonable para utilizar en este plano de separación durante todo el mes, debido a que las escalas de tiempo de la transferencia de calor en el edificio son mucho menores que las del suelo. El método de resolución es iterativo (con una sola iteración) y consiste en suponer una temperatura del plano de separación de 18°C con la cual se calcula la temperatura media mensual del aire de cada local. A continuación se ingresan estos datos en el módulo *Slab* y se calcula la temperatura corregida de la superficie exterior del piso (la que está en contacto con el suelo). Con esta temperatura corregida se recalcula la temperatura interior del local cuyo valor se reporta en los archivos de salida. El programa *Slab* permite elegir dos modalidades de trabajo: piso con temperatura promedio en toda su superficie (en este caso los pisos tendrán una temperatura uniforme en toda la superficie en contacto con el suelo, con un valor diferente para cada mes del año) o piso con dos zonas denominadas *corazón* y *perímetro* (en cuyo caso todos los pisos se describirán con estas dos temperaturas, con valores diferentes para cada mes del año). Por otra parte, el usuario puede seleccionar el tamaño del dominio 3D (los valores normales son 15m de profundidad y 15m desde la esquina del piso), la condición de borde inferior (suelo a gran profundidad, se puede seleccionar entre temperatura constante o condición adiabática, ambas dan resultados similares), el coeficiente convectivo en la superficie del suelo (puede ser autocalculado o ingresado a mano por el usuario), si se considerará la evapotranspiración y el número de años previos con los que se calculará la modificación de la temperatura de suelo, entre otros. De acuerdo al número de años elegido y a los detalles del edificio, la distribución de temperatura en el suelo puede o no alcanzar la convergencia (dicha convergencia no es informada por el programa *slab.exe* de manera notoria, sino que es el mismo usuario quien debe verificarla en la última línea del archivo *.slab). Usando la relación Área/Perímetro definida por el usuario, *Slab* genera un piso cuadrado equivalente, con áreas apropiadas de *corazón* y *perímetro* (las cuales no necesariamente coinciden con las dimensiones originales del piso) y simula la transferencia de calor del piso por un periodo de varios años (cuyo número elige el usuario) hasta que se alcanza la tolerancia de convergencia de la temperatura. Entonces se genera archivo que contiene los valores mensuales de temperatura del *corazón* y del *perímetro* en el plano de separación. Estos valores son los que utiliza EnergyPlus para recalculando la temperatura de la zona, ingresándolos en el objeto Site:GroundTemperature:BuildingSurface. El cálculo descrito puede hacerse en forma manual, utilizando el programa *Slab* por aparte e ingresando los resultados en el archivo *.idf de ingreso de datos de EnergyPlus, o bien puede hacerse automáticamente mediante el objeto GroundHeatTransfer.

DESCRIPCION DEL PROTOTIPO

Se cuenta con un prototipo que funciona como depósito, de 3.5m x 3.8m de superficie y un volumen de 39.4m³, orientado 17° hacia el Suroeste, como muestra la Figura 2. Las paredes son de ladrillo macizo de 15cm de espesor, sin revoque. El techo es de machimbre de pino con membrana hidrófuga y teja francesa roja, sin aislación térmica, con una pendiente de 13.8° hacia el Este. La altura del techo en la parte más baja es de 2.46m y en la parte más alta de 3.40m. El contrapiso es de hormigón de 15cm de espesor sobre malla de hierro, sin aislación. Las propiedades térmicas de los materiales del prototipo se obtuvieron de la literatura. El prototipo cuenta con una ventana de 1.10xm x 1.60m, con marco de madera y vidrio simple de 4mm, que se oscureció completamente durante el periodo de monitoreo, y una puerta de 2.0m de altura y 0.8m de ancho, que estuvo cerrada durante las mediciones. En el exterior, las superficies que producen sombreado son una medianera de 1.95m de altura hacia el Norte y Oeste. El prototipo se encuentra alejado al menos 25m de otras construcciones y el entorno es de césped. El prototipo fue construido en el año 2004 y no cuenta con ningún sistema de calefacción o refrigeración.

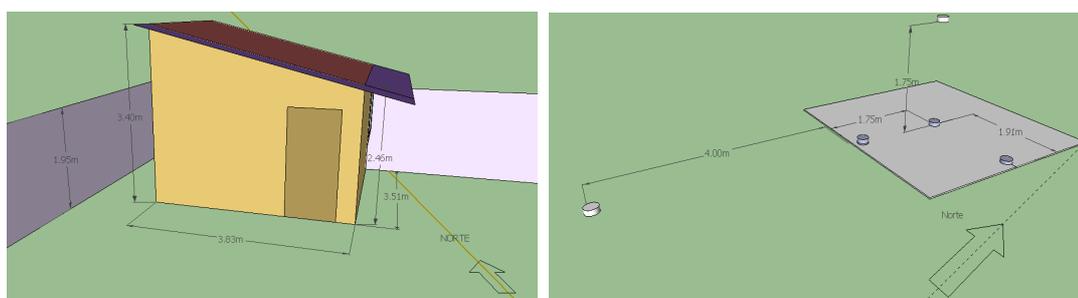


Figura 2. Esquema del prototipo y ubicación de los sensores de medición.

El monitoreo se realizó entre el 5 y el 17 de mayo de 2011. Se utilizaron dataloggers HOBO modelos U12-001, U12-006 y U12-012 para registrar cada 15 minutos la temperatura del aire interior y exterior, la temperatura superficial de la tierra y la temperatura del piso del prototipo. En el interior del local se ubicó un sensor en el centro geométrico del prototipo, a una altura de 1.75m del piso, como muestra la Figura 2. La temperatura superficial de la tierra se midió a 5 cm de profundidad, y a una distancia de 4m del prototipo, para lo cual se cavó un pequeño orificio de 1cm de diámetro que se rellenó con la misma tierra una vez ubicado el sensor. En el mismo HOBO que mide temperatura superficial de la tierra se ubicaron tres sensores adicionales para registrar la temperatura superficial del piso en el centro del local y sobre dos ejes perpendiculares, a una distancia de 0.2m de las paredes. La temperatura exterior se registró con un HOBO ubicado al abrigo de la radiación solar.

RESULTADOS DEL MONITOREO

Para el análisis de los datos se seleccionó la semana comprendida entre el 10 y el 17 de mayo de 2011. Las Figuras 3 y 4 muestran los resultados del monitoreo. En la Figura 3 se observa que los días fueron en su mayoría nublados, con radiación solar sobre superficie horizontal al mediodía de alrededor de 500W/m², excepto el primer y tercer día, que fueron soleados y con valores que alcanzaron los 700 y 650 W/m², respectivamente. Durante las noches del 12 y del 14 de mayo hubieron

garfías muy ligeras que apenas humedecieron el césped. La temperatura del aire osciló entre 11°C y 24.3°C, con una temperatura promedio en el periodo de 15.7°C, mientras que la temperatura de la tierra a 5cm de profundidad osciló entre 15.1°C y 25.4°C, con un promedio de 17.6°C. La temperatura de la tierra medida a 5cm de profundidad muestra, como es de esperar, una fuerte dependencia con la radiación solar, alcanzando sus valores más altos durante los días y horas en que la radiación solar es más alta. Además el máximo de temperatura superficial del suelo se produce simultáneamente con el máximo de radiación solar, y antes que el máximo de temperatura del aire. Se observa además que la temperatura superficial del suelo no presenta un comportamiento sinusoidal sino más bien del tipo parábola-exponencial decreciente, debido a la fuerte dependencia con la temperatura del aire exterior, que en climas áridos presenta este tipo de comportamiento.

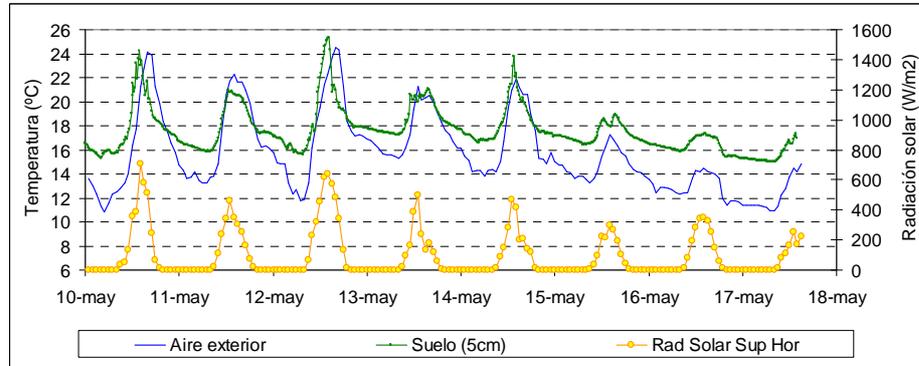


Figura 3. Temperatura del aire exterior, temperatura del suelo a 5cm de profundidad y radiación solar sobre superficie horizontal, para el periodo comprendido entre el 10 y el 17 de mayo de 2011.

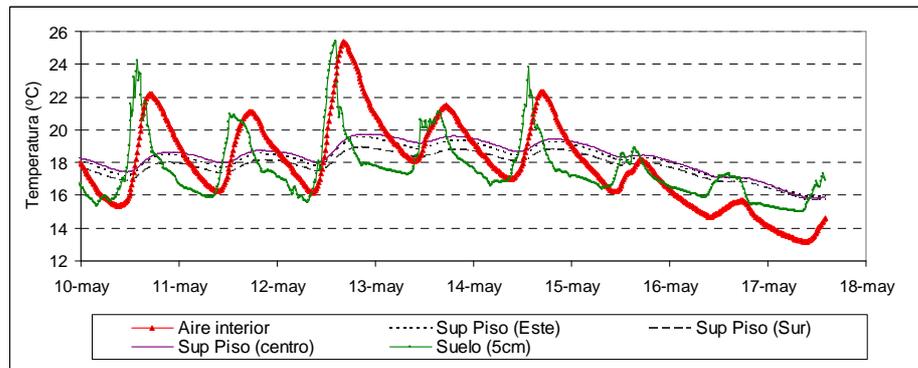


Figura 4. Temperatura del aire interior del prototipo, temperatura del suelo a 5cm de profundidad y temperatura superficial del piso en el centro y laterales Este y Sur del prototipo.

La Figura 4 muestra la evolución de la temperatura superficial del piso en los tres puntos de medición, la temperatura del aire interior del prototipo y la temperatura de la tierra a 5cm de profundidad. Se observan diferencias en la distribución superficial de temperatura, siendo mayor en el centro geométrico del piso y menor en los laterales, como se espera debido a que los sectores laterales tienen mayor contacto con el ambiente exterior. También se observa que existe una diferencia de aproximadamente 0.5°C entre la temperatura del lado Sur y Este del piso, lo cual se debe a la incidencia de la radiación solar en la pared Este. En la Figura 4, se ve claramente que el día con mayor radiación solar es el día en que más diferencia de temperatura se observa entre los puntos Sur y Este, mientras que hacia el final del periodo ambas temperaturas son similares en coincidencia con días de baja radiación solar. Esto significa que la superficie perimetral no es estrictamente isoterma como supone el modelo de EnergyPlus. La diferencia promedio registrada entre la temperatura superficial lateral y la central es de 0.6°C, mientras que la máxima diferencia registrada entre ambas es de 1.0°C. Si bien en este caso particular esta pequeña diferencia no justifica la división del piso en dos superficies (corazón y perímetro) a distintas temperaturas, esta conclusión no puede extrapolarse a todos los casos, puesto que en pisos con mayores dimensiones y en especial en ambientes climatizados, la diferencia puede ser significativa. En cuanto a los desfases, se observa un retardo de aproximadamente 6 horas entre la temperatura interior del aire y la temperatura superficial del piso, y un desfase de 3 horas entre el mínimo de temperatura superficial de la tierra (a 4m del prototipo) y el mínimo de temperatura superficial del piso. Por otra parte, la temperatura promedio superficial del piso en el periodo fue de 18.1°C, muy similar a la temperatura promedio del aire interior, que fue de 18.0°C. La amplitud de la temperatura superficial del piso fue pequeña, del orden de 1.7°C, debido a que el piso no absorbió radiación solar directa (la ventana permaneció tapada durante todo el periodo de medición).

SIMULACION CON SIMEDIF

Se realizó el ajuste de los datos medidos con el programa SIMEDIF para Windows, para lo cual el prototipo fue modelizado como una única zona térmica. La envolvente vertical se describió a través de PAREDES (ladrillo macizo de 15cm de espesor), el techo se consideró como TABIQUE y el piso se modelizó como una PARED de dos capas: 15cm de hormigón y 1m de tierra, utilizándose en la capa de tierra un punto cada 10cm para el cálculo por diferencias finitas. Se utilizó un valor de 4W/(m² °C) para los coeficientes convectivos de las superficies verticales interiores y para la superficie del piso. Para la

superficie interior del techo se utilizó un valor de $1W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$, debido a que se considera que durante el día el techo se encuentra a mayor temperatura que el aire interior, por lo que la estratificación térmica disminuye la transferencia de calor por conducción. El sombreado de la pared Oeste se consideró a través de la reducción en un 60% del área de radiación de dicha pared (valor obtenido de promediar las sombras arrojadas por la medianera sobre la pared Oeste, a lo largo del día). Se utilizó un albedo de 0.25 correspondiente al pasto. La variable de ajuste fueron las renovaciones horarias de aire, encontrándose que el valor que mejor ajustó los datos medidos y simulados fue de 0.5 renovaciones/hora. Se utilizaron los datos meteorológicos monitoreados, simulándose 15 días previos para eliminar los problemas de valor inicial y para que la simulación llegue al estado periódico. Se utilizó una temperatura inicial de $16.1^\circ C$, correspondiente a la temperatura media del aire exterior en el periodo previo de 15 días.

Los resultados obtenidos para la temperatura del aire del prototipo y la temperatura superficial del piso se observan en la Figura 5, en donde también se incluyeron las temperaturas monitoreadas. La temperatura del aire simulada ajusta la temperatura medida con un error promedio de $0.6^\circ C$, mientras que para la temperatura del piso el error promedio es de $0.2^\circ C$.

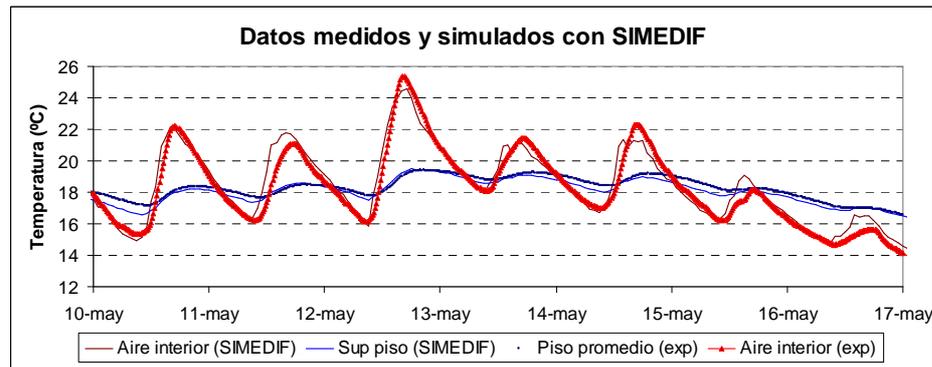


Figura 5. Temperatura del aire interior y temperatura superficial del piso del prototipo, medida y simulada con SIMEDIF para el periodo comprendido entre el 10 y el 17 de mayo de 2011.

SIMULACION CON ENERGY PLUS

En EnergyPlus el modelo utilizado del prototipo es similar al de SIMEDIF: se modelizó una única zona térmica, la envolvente vertical se definió a través de elementos con masa, el techo se ingresó como un elemento sin masa y para todos los materiales se utilizaron valores idénticos a los de SIMEDIF. Como método de cálculo se seleccionó el de Diferencias Finitas (Detallado). A diferencia de SIMEDIF, EnergyPlus permite considerar hora a hora el sombreado de todas las superficies circundantes e incluye en el cálculo la transferencia de calor por radiación, que en SIMEDIF está linealizada e incluida en el coeficiente global de convección-radiación. Además se utilizaron valores horarios de velocidad de viento, con lo que los coeficientes convectivos exteriores varían hora a hora (en SIMEDIF estos coeficientes se suponen constantes para todo el periodo de la simulación). En cuanto a los coeficientes convectivos interiores, se utilizaron los valores horarios calculados internamente por el programa (del análisis de los resultados, se observa que este coeficiente varió entre 1 y $4 W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$, de acuerdo a la geometría de la superficie y a las temperaturas involucradas).

Para simular el piso se estudiaron tres diferentes posibilidades:

CASO 1 (Modelo simplificado): Piso de 15 cm de hormigón, considerando la tierra a una temperatura superficial promedio de $17.6^\circ C$ (valor obtenido de datos monitoreados).

CASO 2 (Modelo de SIMEDIF): Piso de 15 cm de hormigón + 1m de tierra, suponiendo condición adiabática en el límite inferior (modelo de SIMEDIF).

CASO 3 (Modelo detallado): Piso de 15 cm de hormigón, utilizando el programa auxiliar *Slab*.

En cuanto al CASO 3, el programa auxiliar *Slab* permite que el piso cuente con a lo sumo una capa de material (de espesor mayor o igual a 15 cm) y una capa de aislación. En este caso, se utilizó una capa de hormigón de 15 cm sin aislación, un periodo de 7 años previos de simulación, albedo de suelo de 0.25, emisividad de 0.9, rugosidad 0.75, tamaño del dominio por default, condición de borde inferior del suelo adiabática (se puede seleccionar entre temperatura constante o condición adiabática, ambas dan resultados similares) y coeficiente convectivo en la superficie del suelo autocalculado por EnergyPlus (también puede ser ingresado a mano por el usuario). Además se debe ingresar la temperatura promedio mensual del aire interior, para la cual el manual de EnergyPlus aconseja estimarla mediante una simulación preliminar suponiendo que el piso está aislado (condición adiabática). Utilizando esta metodología se encontró un valor para la temperatura media del aire del prototipo (para el periodo entre el 10 y el 17 de mayo de 2011) de $17.6^\circ C$. Por otra parte, la bibliografía estima que los efectos perimetrales de un piso sin aislación se extienden hasta aproximadamente 1.5m de la pared (Thomas y Rees, 1999), en donde se produce un 60% de las pérdidas de calor del piso. Debido a las pequeñas dimensiones del prototipo, es de esperar que la temperatura promedio del piso sea muy cercana a la temperatura perimetral, por lo que se utilizó como temperatura representativa del piso esta temperatura.

En este punto apareció un problema para continuar el ingreso de datos, relacionado con la relación área/perímetro (A/P): las dimensiones del prototipo (3.83m x 3.51m), dan una relación $A/P=0.92$. EnergyPlus no permite que esta relación sea menor de 1.5, lo cual significa, para geometría cuadrada, un lado no menor a 6m. Los autores del presente trabajo no encontraron ninguna referencia a la razón de la existencia de este límite inferior. Los trabajos consultados de Bahnfleth (1989, 1990) no

mencionan ningún límite a la relación área/perímetro. Por otra parte, el manual de EnergyPlus no advierte esta situación ni explica la causa. La única referencia es una leyenda en el IDFEditor que limita el valor de A/P. Se procedió a consultar al grupo de soporte de EnergyPlus en el NREL, quienes indicaron que este límite está relacionado con el algoritmo de auto-gridding y que la alternativa es realizar un ingreso manual de la grilla, teniendo en mente que existe un límite numérico al tamaño de las celdas para asegurar una solución estable (convergencia). No existe actualmente en el Manual ni en la bibliografía consultada información suficiente para el armado de esta grilla, por lo que se decidió utilizar la relación A/P mínima aceptada por el programa y presuponiendo que al ser una construcción no aislada y sin sistemas de acondicionamiento, la diferencia entre ambas geometrías no debería ser demasiado grande.

Los resultados se observan en las Figuras 6 a 8. La Figura 6 muestra los resultados que entrega el preprocesador *Slab* para las condiciones meteorológicas de un año medido. Como se espera, en invierno la temperatura media mensual del perímetro es menor que la temperatura del corazón, a la inversa de lo que ocurre en verano. Además, se observa que durante todo el año y debido a las pequeñas dimensiones del prototipo, la temperatura promedio del piso en la superficie en contacto con la tierra se aproxima más a la del perímetro que a la del corazón del piso. La diferencia entre la temperatura del perímetro y del corazón es máxima en los meses de verano (en diciembre el perímetro está 1°C más caliente que el corazón). Según este modelo, en el mes de mayo la temperatura del corazón y del perímetro son muy parecidas (corazón a 0.2°C por encima del perímetro), un flujo promedio de 1.19 W/m² y una temperatura promedio de la superficie del piso en contacto con la tierra de 17.3°C.

PrototipoGourg_EquivSlab: bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```

! The following was created by the Slab preprocessor program.
! Check the convergence message at the end of this file.
! Weather File Location=Salta Capital Salta ARG Se usaron datos

Monthly Slab Outside Face Temperatures, C and Heat Fluxes(loss), W/(m^2)
Perimeter Area: 32.00
Core Area: 4.00

```

Month	TAverage	TPerimeter	TCore	TInside	AverageFlux	PerimeterFlux	CoreFlux
1	21.31	21.37	20.79	21.10	-1.055	-1.384	1.579
2	20.74	20.82	20.08	20.10	-3.256	-3.675	0.103
3	19.17	19.23	18.66	18.40	-3.892	-4.236	-1.301
4	16.51	16.55	16.23	15.60	-4.641	-4.818	-3.224
5	17.30	17.28	17.49	17.60	1.193	1.286	0.445
6	17.07	17.01	17.36	17.60	2.090	2.332	0.156
7	11.14	11.13	11.26	9.90	-6.318	-6.242	-6.921
8	12.05	12.08	11.82	11.60	-2.306	-2.453	-1.128
9	15.07	15.09	14.91	15.40	1.323	1.246	1.940
10	17.68	17.72	17.36	18.00	1.278	1.119	2.552
11	20.37	20.47	19.55	20.30	-0.357	-0.877	3.797
12	21.44	21.55	20.58	21.10	-1.740	-2.285	2.623

Figura 6. Temperatura y flujo de calor mensuales promedio, del perímetro y del corazón del piso.

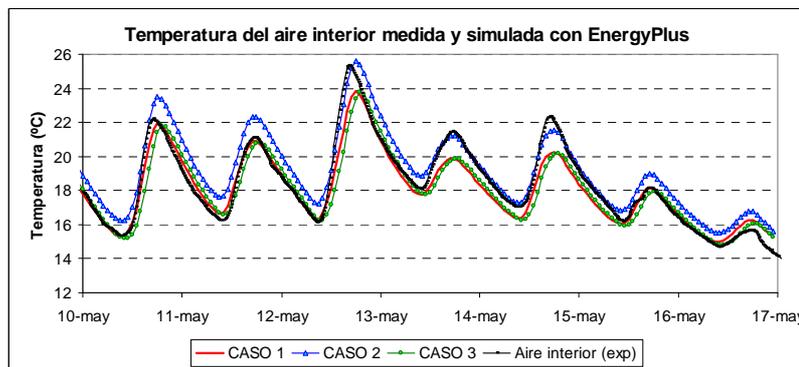


Figura 7. Temperatura del aire interior del prototipo simulada con EnergyPlus y medida experimentalmente, para tres posibilidades de simulación del piso.

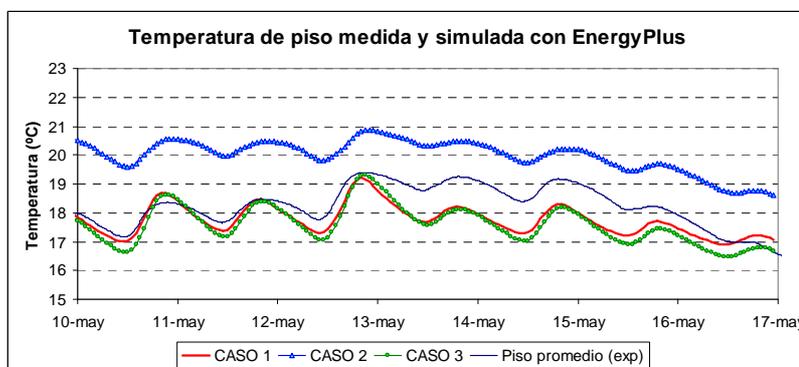


Figura 8. Temperatura de la superficie del piso simulada con EnergyPlus y medida experimentalmente, para tres posibilidades de simulación del piso.

La Figura 7 muestra las predicciones de los tres casos para la temperatura del aire interior del prototipo y los resultados experimentales. Los tres casos testeados tienen algún tipo de problema para ajustar los datos experimentales, siendo los CASOS 1 y 3 muy similares entre sí (esto se debe a que el CASO 1 utiliza una temperatura de contacto entre el piso y la

tierra de 17.6°C, mientras que el CASO 3 la estima en 17.3°C). Si bien del análisis de esta figura podría inferirse que para la temperatura del aire los tres casos ajustan razonablemente los valores experimentales (con errores de 1°C), no sucede lo mismo cuando se analiza la temperatura superficial del piso. En la Figura 8 se observa que ninguno de los tres modelos ajusta con precisión los datos medidos para el piso. El CASO 2 es el que da los peores resultados, alejándose en 2°C de los valores experimentales, aunque mirando las amplitudes térmicas es el que mejor las aproxima. Debido a las pequeñas dimensiones del prototipo y a que no hay radiación directa que incida en el piso (el cual al aumentar su temperatura aumentaría la transferencia convectiva hacia el aire), este error en la temperatura superficial no incide fuertemente en la temperatura del aire. Sin embargo, en construcciones en donde el área de piso es significativa y existe un contacto piso-tierra (piso sin aislación o construcciones semienterradas), un error en la temperatura superficial del piso puede causar grandes diferencias en la temperatura del aire y en los flujos de calor respecto de sus valores reales, lo cual incidirá fuertemente en las cargas de calefacción/refrigeración del edificio.

Por otra parte, en este punto surge indefectiblemente la pregunta de por qué el modelo de piso de SIMEDIF, que tan bien predice la temperatura del suelo, no se comporta de la misma manera cuando es ingresado en EnergyPlus. La explicación del origen de estas diferencias se debe a la distribución de temperatura del piso y de la tierra al inicio del periodo de análisis, reflejadas en las temperaturas iniciales asumidas para los nodos másicos (que en SIMEDIF son ingresadas por el usuario y en EnergyPlus no son accesibles al usuario) y en el número de días previos de simulación (que en SIMEDIF son ingresados por el usuario como un periodo previo y en EnergyPlus son calculados automáticamente). Por ejemplo, para este caso particular del prototipo EnergyPlus estima 3 días previos de simulación para alcanzar la convergencia, cuando en SIMEDIF se utilizaron 15 días. Este valor surge de experiencias previas realizadas de la estimación de la constante de tiempo para edificios másicos y livianos (la estimación del número de días se realiza simulando el edificio durante un periodo de varios días con las mismas condiciones meteorológicas para permitir al edificio alcanzar el régimen periódico, seguidas de un segundo periodo en que se modifican las mismas para determinar en cuántos días se alcanza el nuevo régimen periódico).

El criterio de convergencia utilizado por EnergyPlus para definir el número de días previos de simulación es doble: se analiza la convergencia de la temperatura interior del aire (para la cual el usuario debe ingresar un valor límite de tolerancia en la temperatura, fijado en 0.4°C por default) y de la carga de calefacción/refrigeración (para la cual el usuario debe ingresar un valor de tolerancia en la carga, fijado en 0.04W por default). Entonces, después del segundo día de calentamiento, el programa compara la temperatura máxima alcanzada por la zona con la temperatura máxima alcanzada el día previo. Si estas dos temperaturas están dentro de la tolerancia, entonces la simulación pasa el primer chequeo. Se realiza una comparación similar con la temperatura mínima, con lo que la simulación pasa el segundo chequeo. A continuación se realiza un procedimiento semejante con las cargas máximas de calefacción y refrigeración, con lo que si se encuentran dentro de la tolerancia fijada para la carga, se superan el tercer y cuarto chequeo. La simulación comienza con un periodo previo en el que pasaron exitosamente los cuatro chequeos. EnergyPlus solicita además al usuario un número máximo de días de calentamiento previo (Maximum Number of Warmup Days, por default en 25): este valor no fuerza al programa a realizar 25 días previos de simulación, sino que fija un límite de 25 días previos y si la convergencia se alcanza en menos días (por ejemplo 3, como en este caso), utiliza el número de días en que converge. A criterio de los autores, los chequeos realizados por EnergyPlus pueden generar simulaciones que no responden a la realidad cuando los edificios son másicos (como es el caso de incluir una pared con una capa de tierra de gran espesor), puesto que se puede alcanzar la convergencia de temperatura interior del aire (y las cargas térmicas) sin que se haya alcanzado la convergencia de temperatura en los nodos interiores de los elementos másicos.

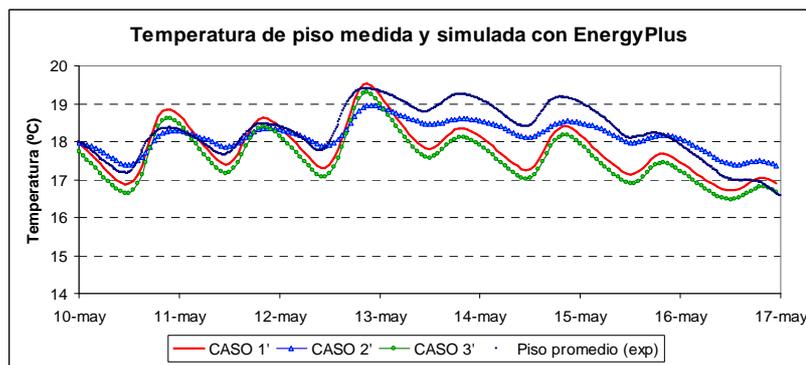


Figura 9. Temperatura de la superficie del piso simulada con EnergyPlus y medida experimentalmente, para las tres posibilidades de simulación del piso, con un mes previo de simulación.

Para evaluar esta suposición, se decidió realizar nuevas simulaciones de los CASOS 1, 2 y 3, pero iniciando dichas simulaciones un mes antes (en este caso, el 10 de abril de 2011). Los resultados se observan en la Figura 9 como CASOS 1', 2' y 3'. Como se espera, los CASOS 1 y 3 en los que no interviene la masa de 1m de tierra, no sufrieron modificaciones significativas. Sin embargo, se observa que el CASO 2 mejoró notablemente, transformándose en el modelo que más se acerca a la temperatura experimental. Se concluye entonces que es posible modelizar la transferencia de calor al suelo mediante los tres modelos, aunque el primero y el tercero no ajustan tan bien la amplitud térmica como el segundo modelo. El CASO 1 requiere conocer con bastante exactitud la temperatura superficial de la tierra en contacto con el edificio (valor que generalmente no está disponible, y que puede ser imposible de obtener en el ámbito urbano), el CASO 3 requiere de conocimiento avanzado de modelos en 3D de transferencia de calor al suelo, de los valores más adecuados para varios coeficientes (convectivos, evapotranspiración, etc.) y de experiencia para analizar la exactitud de los resultados calculados,

mientras que el CASO 2 es de simple implementación, no requiere conocimiento de temperaturas de suelo ni experiencia avanzada y genera resultados confiables si se utilizan varios días previos de simulación.

CONCLUSIONES

El monitoreo de la temperatura superficial del piso del prototipo permite concluir que el área perimetral de un piso interior no está necesariamente a una misma temperatura: en cercanías de paredes asoleadas, la temperatura del piso será mayor que en paredes sombreadas. Por ello, se espera que para climas con bajos niveles de radiación la diferencia de temperatura entre puntos cercanos a paredes exteriores con distinta orientación sea mucho menor que para niveles mayores de asoleamiento. Por otra parte, esta situación se repite para el área de corazón y perímetro: a menores niveles de radiación solar, ambas temperaturas tienden a alcanzar valores similares.

En cuanto a los modelos de simulación, el programa SIMEDIF es el que mejor reproduce la temperatura superficial del piso monitoreada, siempre que se utilice un periodo previo que permita alcanzar el régimen periódico. En EnergyPlus, utilizar una temperatura de tierra para la interface tierra-piso es arriesgado debido a que se requiere conocer esta temperatura con mucha exactitud, lo cual no es un dato en general accesible, por lo que no se aconseja usar esta metodología de cálculo. Por otra parte, utilizar el preprocesador *Slab* conlleva una dificultad adicional en la carga de datos y requiere conocimientos avanzados para interpretar los resultados. Además no se consiguió con este modelo disminuir las amplitudes térmicas superficiales a los valores observados experimentalmente. Sin embargo, es posible que definiendo manualmente la grilla de discretización se obtengan resultados más exactos, aunque se debe evaluar en este caso el costo-beneficio de utilizar esta metodología. Por otra parte, se aconseja a los usuarios de EnergyPlus que, al simular el piso con el soft *Slab*, para condiciones meteorológicas que incluyan altos niveles de radiación es conveniente dividir el piso en corazón y perímetro. El modelo de piso en EnergyPlus que más se acercó a los datos monitoreados fue el incorporar la masa térmica de la tierra al piso mediante la inclusión de 1m de tierra como una capa adicional, al estilo de SIMEDIF, con condición de borde adiabática, y simulando para un periodo previo de días mucho mayor que el calculado automáticamente por EnergyPlus para alcanzar la convergencia (se sugiere al menos 1 mes previo).

Sin embargo, cada caso debe analizarse a la luz de sus condiciones particulares, geometría, clima, acondicionamiento, etc. Los modelos que mejor funcionan para los países del hemisferio Norte no necesariamente son los mejores para nuestras zonas, debido a que existen diferencias en la tecnología utilizada (materiales más livianos, uso intensivo de aislación térmica, acondicionamiento del aire interior en forma permanente, etc.) y la utilización de estas metodologías sin un análisis previo de su adecuación a nuestra situación puede conducir a cometer grandes errores en las simulaciones realizadas. Por ello, es necesario ampliar los monitoreos para abarcar construcciones con diferentes escalas y técnicas constructivas bajo las condiciones meteorológicas de nuestras localidades.

REFERENCIAS

- Alberto D., Cardón L. (2007). Efecto de la aislacion inferior en la transferencia de calor en pisos radiantes calefaccionados por energía solar. *Mecánica Computacional* Vol. XXVI, pp. 3477-3492. Córdoba, Argentina.
- Andolsun S., Culp C., Habert J., Witte M. (2011). EnergyPlus vs DOE-2.1e: The effect of ground coupling on energy use of a code house with Basement in a hot-humid climate. *Energy and Buildings* 43, pp. 1663-1675.
- Bahnfleth W., Pedersen C. (1990). A three-dimensional numerical study of slab-on-grade heat transfer. *ASHRAE Transactions* Pt.2, 96: pp. 61-72. Disponible en: www.engr.psu.edu/ae/faculty/bahnfleth/3D_numerical_study.pdf
- Clements E. (2004). Three Dimensional Foundation Heat Transfer Modules for Whole-Building Energy Analysis, MStHesis, Pennsylvania State University, USA.
- Cogil C.A. (1998). Modeling of Basement Heat Transfer and Parametric Study of Basement Insulation for Low Energy Housing, MS Thesis of Architectural Engineering, Pennsylvania State University.
- Deru M. (2003). A Model for Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer from Buildings. Technical Report NREL/TP-550-33954. Disponible en: <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/33954.pdf>
- Hernández, A. (2001). Simulación numérica de la distribución de temperatura en el suelo por debajo de un edificio. 8° Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, 2001, Veracruz, México, pp. 242 – 248.
- Labs, K. (1989). En: Cook, J., editor. *Passive Cooling*. Cambridge Massachusetts, London, England: MIT Press.
- Neymark, J., Judkoff R. (2008). IEA Building Energy Simulation TEST and Diagnostic Method (IEA BESTEST) In-Depth Diagnostic Cases for Ground Coupled Heat Transfer Related to Slab-on-Grade Construction. NREL/TP-550-43388.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por CIUNSa 1339, PICTO 2009-0192, 2005-32140. La autora desea agradecer al Dr. Germán Salazar, Dr. Alejandro Hernández y Sr. Ricardo Echazú por los datos meteorológicos brindados.

ABSTRACT: The inclusion of 2D and 3D ground heat transfer models into simulation software that calculates the energy consumption and transient thermal behaviour of buildings is a complex subject currently under study. Recent reserches show differences of around 30% between energy consumptions calculated by several softwares available internationally. The ground coupling affects the indoor air temperature and the energy consumption destined to condition the interior environment, particularly when the slab floors are not thermally insulated, as usual in Argentinean buildings. This paper compares the results obtained by SIMEDIF and EnergyPlus models of ground heat transfer with experimental data obtained from measurements of a prototype placed in Salta. A description of the main results and conclusions about each model are described in order to be accounted for in future simulations.

Keywords: EnergyPlus, SIMEDIF, ground heat transfer, thermal simulation