

AJUSTE DE MODELO MATEMÁTICO DETED® POR MEDIO DEL ESTUDIO TÉRMICO DE UN EDIFICIO SIMPLE CON ENERGY PLUS

María Victoria Mercado¹, Julieta Balter¹, Hector Piriz²

¹INAHE CCT MZA CONICET, Mendoza, Argentina

²Friolatina, Mendoza, Argentina

Abstract

Ante el creciente desarrollo de herramientas de simulación energética edilicia, resulta importante encontrar un equilibrio entre la complejidad de los modelos y el tiempo computacional, teniendo en cuenta los objetivos y las entradas disponibles. Este trabajo presenta el desarrollo de un modelo matemático computacional -DETED®- en contraste con los resultados por simulación dinámica -EnergyPlus-. Se evaluaron dos escenarios y se obtuvo un ΔT entre los modelos de 0.95°C en las temperaturas máximas. Las diferencias entre ambos modelos -del 4.7%- ha permitido observar rápidamente las diferencias generales y puntuales e identificar sus posibles causas. Se prevé continuar profundizando el análisis y optimizar el modelo.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado una gran cantidad de herramientas de simulación energética edilicia (BES por su sigla en inglés *Building Energy Simulation*) con distintos enfoques y grados de detalle. Sin embargo, aumentar la complejidad del modelo generalmente aumenta el tiempo de modelado y la cantidad de entradas requeridas, lo que no siempre conduce a una mayor precisión. Por lo tanto, es importante encontrar el compromiso entre la complejidad del modelo y el tiempo computacional teniendo en cuenta el propósito y la meta del estudio de simulación y las entradas disponibles (Magni et al., 2022).

Asimismo, existen muchas investigaciones de análisis de sensibilidad sobre la influencia de las variables de entrada en los resultados de simulaciones edilicias y HVAC. Al respecto, los trabajos de Tiang (2013) y Pang et al. (2020) han realizado revisiones exhaustivas sobre el tema donde se discute la aplicación de los diferentes métodos, así como la determinación de las variables de entrada, la elección de los programas y los métodos para reducir el tiempo de cálculo de los modelos, entre otros aspectos.

Entre los antecedentes de trabajos que contrastan diferentes métodos de simulación, podemos citar el de Magni et al. (2022) en donde se implementan diferentes enfoques de modelado (de zona térmica, de ventana, masa térmica, etc.) utilizando un modelo de Simulink con validación cruzada de una celda de oficina y la influencia de cada variable analizada en los resultados horarios. Los resultados arrojaron una buena relación en términos de balance de energía y temperatura operativa en el centro de una zona térmica, sin embargo, se observaron desviaciones en las temperaturas en una ubicación específica de la zona. Además, se advirtió que un modelo de zona térmica simplificado permite ahorros importantes en términos de tiempo computacional, pero conduce a desviaciones en el comportamiento dinámico.

La decisión de utilizar o no un modelo simplificado depende en gran medida de los objetivos de la simulación. Es importante también la experiencia del calculista, en relación a la interpretación física conceptual de cada problema. Esto es, hallar las hipótesis simplificativas correctas que logren el mejor compromiso entre dos extremos: "Usar un cañón para matar un mosquito" versus un modelo básico que conduzca a resultados muy desviados de la realidad. El mejor elemento de comparación será siempre el resultado de ensayos físicos reales y es la referencia óptima a seguir para hallar el compromiso en la complejidad del modelo matemático. Los ensayos físicos no siempre pueden realizarse en los tiempos requeridos, motivo por el cual se recurre a tomar como patrón de referencia un programa confiable suficientemente validado y contrastado con ensayos físicos reales. Este último, es el método que se utiliza para contrastar la primera versión del programa DETED®.

Este trabajo, presenta el análisis y la estructura del modelo matemático computacional DETED® (DEsempeño Térmico EDificios) desarrollado por la oficina de investigación de desarrollo de la empresa Friolatina del

grupo LTN¹ con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos con los datos que entrega una simulación dinámica con el software EnergyPlus. De esta comparación surgirán elementos de juicio para poder validar, calibrar y/o modificar el modelo DETED@ - tanto en sus hipótesis simplificativas como en su estructura-, en función de minimizar las diferencias de respuesta en ambos modelos cuando ambos son perturbados con el mismo estímulo calórico.

METODOLOGÍA

La metodología del presente consiste en 3 etapas consecutivas, la etapa 2 y 3, son de iteración dado que los resultados de una proveen los datos para la validación de la otra, y viceversa.

La primera etapa, es el desarrollo del modelo DETED, realizado por la empresa Friolatina. La etapa 2 consiste en la simulación dinámica con el programa Energy Plus para un período de 15 días de verano y 15 días de invierno. Utilizando los datos de las simulaciones como Data-set se realiza la prueba de modelo DETED confrontando los resultados de la etapa 2 con estas salidas. A partir de este estudio se observan algunas hipótesis que se deben corregir y/o modificar, retroalimentando la etapa 1 con los resultados de la 3 y así sucesivamente hasta alcanzar el ajuste deseado.

1- Desarrollo del modelo DETED

El modelo DETED (Figura 1) está desarrollado en función de comparar el comportamiento de distintos tipos de envolventes para cubierta y muro, cambiando los materiales sobre la misma geometría y dimensiones de un edificio, analizando el impacto sobre los siguientes parámetros: temperatura del aire interior, temperaturas superficiales (interior y exterior) y tasa de flujo calórico en la unidad de tiempo que atraviesa la envolvente, y también la que se almacena transitoriamente en la masa de los materiales durante las 24 horas de un día de verano y de invierno.

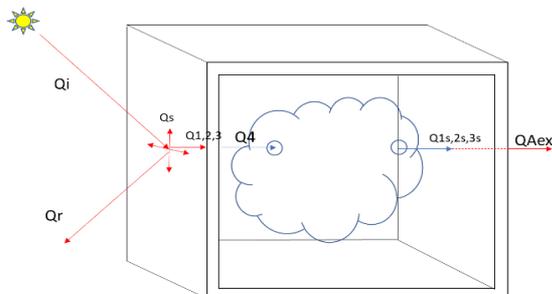


Figura 1: Modelo matemático DETED

$$(Q_i - Q_r - Q_s) - Q_t = m \cdot c_e \cdot dT / dt \quad (1)$$

$$Q_i - Q_r - Q_s = Q_t \quad (2)$$

Donde:

Ecuación 1: Primera Ley de la Termodinámica o Principio de Conservación de la energía aplicada al muro iluminado por el sol.

Ecuación 2: Es igual a la ecuación 1 en situación de estado estacionario.

($Q_i - Q_r - Q_s$): Tasa de Calor neto (energía en la unidad de tiempo) que ingresa al muro soleado [w]

$Q_t = Q_{1,2,3}$: Tasa de calor transmitido que sale por la cara interior del muro soleado después de atravesarlo en forma normal [w]

m: Masa del muro [kg]

Ce: Calor específico del muro. [W.s/(kg.°C)]

Q_i : Tasa de Calor incidente de la radiación solar. [w]

Q_r : Tasa de Calor reflejado por el muro hacia su entorno exterior. [w]

Q_s : Tasa de Calor que genera el calentamiento superficial del muro, generando la Temperatura superficial o Temperatura Sol-Aire.

dT/dt: Variación de la temperatura T del muro en la unidad de tiempo. [°C/s]

Q_4 : Calor que ingresa a la masa de aire interior .

Estructura del modelo DETED@

Existe una semejanza directa entre las leyes físicas y ecuaciones matemáticas que caracterizan el comportamiento del flujo del calor transmitido por conducción en los materiales y el flujo de una corriente eléctrica a través de un circuito (Pipes, 1957). Aprovechando esta semejanza es posible utilizar las analogías y la metodología comúnmente empleada en el análisis de fenómenos transitorios en circuitos eléctricos, a través de la transformada de la Laplace. Mediante esta, es posible analizar con una metodología simple, el desempeño térmico transitorio y de estado estacionario en circuitos donde lo que circula es el calor como energía en la unidad de tiempo, toda vez que aparece una diferencia de temperaturas entre dos puntos del circuito. Existe una amplia experiencia en la caracterización térmica dinámica de los materiales basada en esta semejanza (ISO 13786, 2007).

La Ley de Ohm en los circuitos eléctricos establece que la corriente eléctrica (flujo de cargas eléctricas en la unidad de tiempo) es directamente proporcional a la diferencia de tensión existente entre dos puntos del circuito y la resistencia eléctrica entre ambos puntos.

¹ El modelo ha sido desarrollado por una empresa nacional de fabricación de paneles aislantes y soluciones constructivas (<https://grupoltn.com/friolatina/>).

En forma análoga, la ley de Fourier (conducción del calor a través de una pared plana en estado estacionario), establece: La tasa de calor (flujo de energía calórica en la unidad de tiempo, en watts) que circula en un circuito térmico es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre dos puntos del circuito y la resistencia térmica entre ambos puntos.

La estructura de las ecuaciones de Ohm y de Fourier es idéntica con la corriente eléctrica I equiparable a la tasa transferencia de calor Q , la diferencia de tensión es equiparable a la diferencia de temperaturas y la resistencia eléctrica en Ohm es equiparable a la Resistencia térmica del circuito.

De un modo similar, la ecuación de la tensión en bornes del capacitor en un circuito eléctrico es comparable con la temperatura de un sólido según la ecuación 1.

La igualdad de estructuras de las ecuaciones plantea una equivalencia directa entre el capacitor eléctrico C como un dispositivo capaz de almacenar carga eléctrica con el producto $m.Ce$ como la capacidad del sólido para almacenar calor durante el periodo transitorio durante el cual su temperatura va cambiando en la unidad de tiempo.

A partir de estas analogías, cada capa de cada muro o cubierta del edificio puede representarse con su equivalente térmico circuital como el que se muestra en la Figura 2. Como ejemplo se toma un muro de panel aislante conformado por 3 capas como mostrado abajo

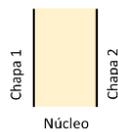


Figura 2: Esquema de muro de 3 capas.

Quedará representado por el circuito térmico de la Figura 3.

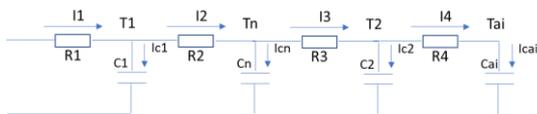


Figura 3: Circuito térmico del modelo matemático DETED.

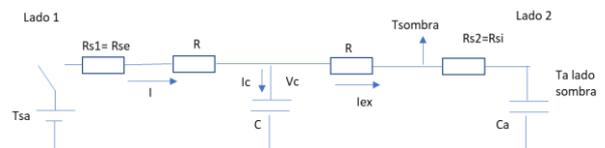
Donde: El lado izquierdo representa la parte externa del muro que está en contacto con el aire exterior, mientras que lado derecho terminado con R_4 representa la parte del muro en contacto con el aire interior del ambiente. Siendo R_1 la suma de la resistencia superficial externa (R_{se}) más la resistencia de la mitad de la capa de chapa del lado izquierdo. Mientras que R_4 es la suma de la resistencia superficial interna (R_{si}) más la resistencia de la mitad de la capa de chapa del lado derecho.

Esta red circuital que representa térmicamente a un muro tendrá asociada una impedancia térmica dado que estará

sometido a una perturbación térmica alternada y cíclica en el tiempo con un periodo de 24 horas. La misma, a diferencia de la resistencia térmica, es la que caracterizará su comportamiento dinámico frente a este estímulo térmico cuasisinoidal. Este se manifiesta tanto por la temperatura ambiental exterior del aire como la variación de radiación solar diaria y estacional. La presencia de estos capacitores térmicos son los que determinan la inercia térmica del circuito en términos de desfase entre las temperaturas y los flujos calóricos. Lo mismo ocurre con el adelanto de fase de la corriente capacitiva en un circuito eléctrico RC de corriente alterna con respecto a la tensión en bornes del capacitor. Es lo que da origen a la potencia reactiva eléctrica. Aquella que es necesaria para generar el campo eléctrico en los elementos capacitivos (o el campo magnético en los componentes inductivos)

Esta red circuital sometida a una temperatura variable en el tiempo puede resolverse mediante las leyes de kirchoff para las corrientes (flujos calóricos) y la ley de faraday para las variaciones de tensión (de temperatura) en distintas partes del circuito. El modelo se resuelve en un sistema de varias ecuaciones diferenciales de primer orden (tantas como capas RC haya en cada mampuesto). Las mismas se resuelven en forma simultánea mediante técnicas de integración numérica (integradores digitales) y también con la ayuda del algebra de bloques que proporciona la transformada de Laplace. De esta forma el modelo matemático del edificio se configura con una arquitectura circuital simple capaz de determinar la temperatura y el flujo calórico en cualquier parte del circuito. Esta estructura del modelo matemático, tipo función de transferencia, permite además la posibilidad de una comprensión conceptual inmediata (además de la cuantificación numérica) de cada paso del fenómeno de transmisión de calor.

Esta estructura circuital es llevada a un modelo computacional mediante el algebra de bloques que ofrece la transformada de Laplace. La misma, en formato de funciones de transferencia conduce a un bloque básico computacional del programa DETED®. Con esta metodología se muestra en la Figura 4, como ejemplo, la representación circuital y computacional de un muro monocapa expuesto a la luz solar en una de sus caras.



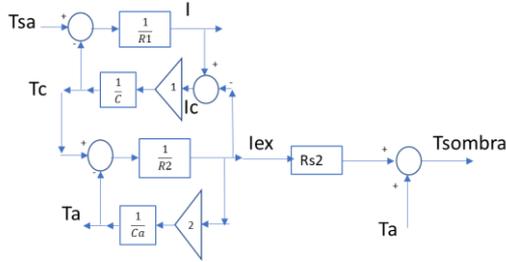


Figura 4: Circuito térmico del modelo matemático DETED.

Finalmente, el circuito térmico que representa a un edificio simple, sin aberturas es como el mostrado en la Figura 5.

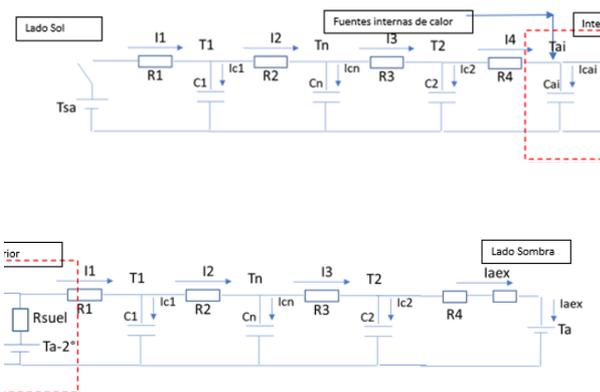


Figura 5: Circuito térmico del modelo matemático DETED.

Donde:

T_{sa} es la temperatura sol aire.

T_{ai} es la temperatura interior del aire del recinto.

T_a es la temperatura ambiente exterior.

Se asumen diferentes hipótesis para el cálculo que realiza el DETED:

- A) El calentamiento considerado en cada elemento del edificio y en el propio sistema edificio, es un proceso no adiabático. Es decir que recibe energía calórica en la unidad de tiempo, se calienta y la transmite a su entorno.
- B) Cada elemento del edificio se considera como un parámetro concentrado en el espacio y su temperatura en el modelo está localizada en el punto medio de su espesor.
- C) Se considera solo la transmisión del calor en forma normal a las superficies constructivas.

2- Simulación en software Energy Plus

Como caso de estudio se utiliza un edificio base de 3 m x 3m x 2,4 m (largo, ancho y alto). El trabajo de simulación se enfoca en el desempeño térmico y energético de la envolvente de diferente materialidad de muros y techos que lo cierran completamente. La superficie del piso es la

misma para todos los escenarios de estudio, conformado por un contrapiso de 15cm de hormigón. El edificio se encuentra aislado de otros edificios por lo que no posee obstrucciones a la radiación solar. Se encuentra emplazado en la provincia de Mendoza, en el departamento de Guaymallén, para lo que se utiliza un archivo climático EPW con datos observados de los años 2003 a 2017, obtenido de la página Climate.OneBuilding.Org.

Se realizaron simulaciones dinámicas para los dos periodos mencionados anteriormente en diferentes escenarios. Estos escenarios se enfocan en probar la respuesta de diversas materialidades. Se trabaja entonces con dos grupos de cerramientos, uno donde gobierna un núcleo de material aislante y, otro donde gobierna el material con masa térmica. La materialidad de la envolvente resulta entonces un factor clave para determinar el desempeño de cada escenario.

A continuación, se describen los elementos de la envolvente y su materialidad. En la Tabla 1 se presentan los valores de resistencia y de conductividad térmica calculados para cada elemento:

- Envolvente 1: chapa + núcleo + chapa
- Envolvente 2: chapa + lana de vidrio + chapa
- Envolvente 3: teja + lana de vidrio + machimbre
- Envolvente 4: revoque + ladrillo + revoque
- Envolvente 1-b: chapa + núcleo + chapa

Tabla 1: Valores de conductancias de los elementos arquitectónicos

Envolvente	Resistencia térmica [m ² .K/W]	Conductancia térmica [W/m ² .K]
1	2.54	0.39
2	1.77	0.56
3	1.87	0.54
4	0.49	2.06
1-b	3.35	0.30

Las cinco envolventes expuestas se combinan entre sí, de esto se desprenden seis escenarios de estudio que se presentan en la Tabla 2. En las simulaciones de los escenarios se solicitó como datos de salida las temperaturas superficiales interiores, las temperaturas superficiales exteriores, la temperatura del aire y el flujo energético que atravesaba cada elemento de la envolvente.

Tabla 2: Descripción de escenarios analizados

Escenario	Cubierta	Muros
E1	Envolvente 1	Envolvente 1
E2	Envolvente 4	Envolvente 4
E3	Envolvente 3	Envolvente 4
E4	Envolvente 2	Envolvente 4
E5	Envolvente 1	Envolvente 4
E6	Envolvente 1	Envolvente 1-b

De los escenarios 1 y 2 (E1 y E2 respectivamente), se ampliaron las simulaciones para realizar un análisis de sensibilidad y evaluar la incidencia de diversas variables

siendo: la absorptividad de las superficies exteriores, el espesor del núcleo aislante, la existencia de infiltraciones por rejillas, la existencia o no de ventanas y diferentes materialidades y, por último, la combinación de infiltraciones y la ventana. Las variables analizadas y los rangos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Variables y valores de rangos utilizados

Variable	Rango
Espesor núcleo (esc. 1)	0.1 m - 0.15 m - 0.2 m
Espesor muro (esc. 2)	0.1 m - 0.4 m
Absortividad (α)	0.4 - 0.6 - 0.8 - 1
Rejillas	a: 20cm x 20cm - b: 40cm x 40cm
Ventana de 1 m2	Simple vidrio (SV) - Doble vidriado hermético (DVH)

Confrontación del Data-set de Energy con los resultados de DETED

En una primera instancia se realizó la confrontación de los resultados el día 3 de enero para la estación de verano. Esto se realizó imponiendo los valores de temperatura ambiente exterior, temperaturas superficiales exteriores y temperaturas del piso obtenidas del modelo Energyplus, como entradas de perturbación en el modelo DETED. De esta forma se asegura que ambos modelos están siendo perturbados de manera idéntica.

En una segunda instancia se procedió a comparar las respuestas de ambos modelos en los E1 y E2.

RESULTADOS

En el modelo Energyplus, es posible analizar el comportamiento de cada modelo. Analizando los E1 y E2, las diferencias observadas evidencian la incidencia de la materialidad en el comportamiento térmico, tanto del espacio interior como de las superficies. El escenario 1 muestra mayor disonancia cuando cambian los valores de las variables en las temperaturas superficial interiores y exteriores. Esto se advierte como consecuencia de la situación conservativa del E1 frente al E2.

El E2 presenta valores mayores en el flujo de calor, lo que se corrobora con situaciones similares en la sensibilidad a los cambios en las superficies interiores y exteriores de todos los parámetros.

En la Tabla 4, se presenta una jerarquización de incidencia (de mayor a menor) de cada variable en el cambio de desempeño térmico.

Tabla 4: Ponderación de variables desde más incidente a menos incidente en el cambio de rangos.

Estación	E1	E2
Verano	1.Infiltración 2.Ventanas 3.Espesor de	1.Espesor de muro 2.Absortividad 3.Infiltración

	núcleo 4.Absortividad	4.Ventanas
Invierno	1.Infiltración 2.Espesor de núcleo 3.Ventanas 4.Absortividad	1.Infiltración 2.Espesor de muro 3.Absortividad 4.Ventanas

En cuanto a la oposición de los resultados de la simulación frente al modelo DETED, ambos modelos fueron perturbados con las mismas condiciones climáticas del día tipo seleccionado y se analizó la respuesta en términos de temperaturas superficiales y temperatura del aire interior. El análisis comparativo exhaustivo se encuentra en proceso. Sin embargo, las primeras comparaciones entre los resultados de ambos modelos en los escenarios 1 y 2 permiten establecer el grado de acercamiento del modelo actual DETED® con respecto al de EnergyPlus. En la Figura 6 y 7, se muestran las temperaturas de aire interior obtenidas con EnergyPlus y con DETED en el escenario 1 y 2 respectivamente, junto a la referencia de temperatura de aire exterior.

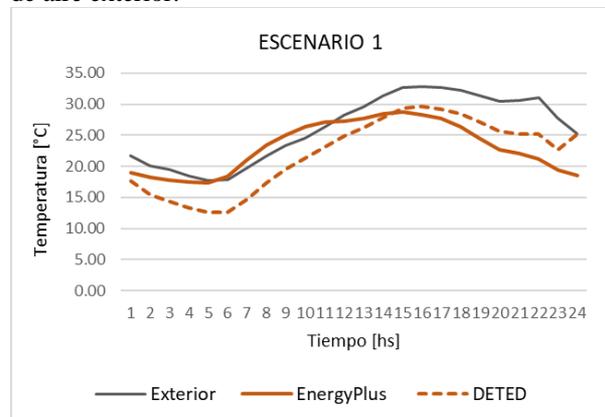


Figura 6: Comparación de temperaturas del E1

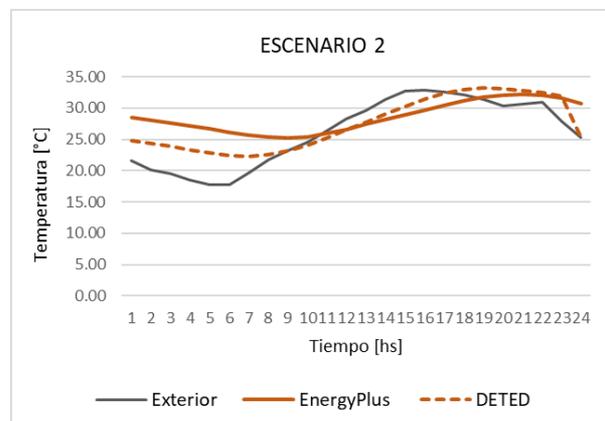


Figura 7: Comparación de temperaturas del E2

Observando la evolución de la temperatura interior del aire del recinto, se observa que ambos modelos muestran curvas de formas muy similares entre sí y valores muy cercanos en los máximos. Los mínimos presentan algunas

diferencias y estas se acentúan hacia las primeras horas del día.

El caso del E1, un modelo principalmente liviano desde su densidad y conservativo térmicamente, se muestra en el modelo DETED con mayor variación térmica entre T_{min} y T_{max} , evidenciando la falta de material másico para la acumulación. Si bien se trata de un modelo altamente conservativo, la atenuación de la amplitud térmica no es alcanzada. En el modelo mencionado, el piso no posee un elemento *capacitor* que pueda representar la situación de lo que implica el único elemento másico en el recinto. Por otro lado, el modelo Energy plus, posee una estructura sólida en la representación de las transferencias y acumulación de calor que se producen a través del piso. En el caso del E2, la masa está presente en la envolvente vertical donde el circuito térmico del DETED si presenta capacitores que actúan como acumuladores de energía, lo que hace visible el acercamiento en el comportamiento de la temperatura del aire interior de los dos modelos.

En la Tabla 5 se presentan los valores de Temperatura máxima y mínima y las diferencias observadas entre ambos modelos. La mayor disparidad es observada en el E1, esto se considera también, consecuencia de la falta de representación del único elemento másico que posee el modelo. Cuando no existe un elemento donde se pueda acumular la energía, esa misma va al aire, lo que ocasiona que eleve su temperatura. En el caso del E2, si bien existe un delta entre los resultados, se observa que es menor en un 36% que su anterior.

Tabla 5: Confrontación de resultados de Energy Plus y DETED para el día 3 de enero.

Día 3 de enero		Temp. Máx. [°C]	Hora	Temp. Mín. [°C]	Hora	ΔT (E+ vs. DETED)	
						Máx	Mín
E1	E+	28.8	15	17.3	5	0.9	4.7
	DETED	29.6	16	12.6	5		
E2	E+	32.2	21	25.3	9	1.0	3
	DETED	33.2	19	22.3	7		

Este análisis, permite advertir la importancia de los capacitores en el circuito térmico que permiten representar la masa térmica, estrategia de diseño bioclimático fundamental para las características climáticas de la ciudad de Mendoza.

Las diferencias halladas hasta ahora han permitido identificar puntos de mejora en las hipótesis simplificativas del programa DETED:

- a) En la hipótesis inicial A, donde se consideró una tasa de flujo muy modesta a través del suelo. Esta

debe ser corregida y aumentada para nivelar resultados entre ambos modelos.

- b) En la hipótesis inicial B se considera (durante las horas solares) un porcentaje fijo, promedio, de superficie soleada y un porcentaje fijo, promedio, de superficie sombreada. Sin discriminar caras, según sus puntos cardinales. Esta hipótesis debe ser rectificadas considerando cada cara, según su punto cardinal individual.
- c) Las mejoras a realizar según a) y b) implican cambios de estructura importante en la arquitectura del modelo. Sin embargo, por su característica modular, son simples de realizar, para luego continuar con la comparativa, en todos los escenarios planteados y en los análisis de sensibilidad.

CONCLUSIONES

La comparación de los modelos ha permitido observar rápidamente las diferencias generales y puntuales e identificar sus posibles causas. El contraste entre escenarios de un mismo modelo ha mostrado resultados muy convergentes con diferencias numéricas en el orden del 4,7% entre ambos modelos. Además, la importancia de la incorporación de la inercia térmica en los circuitos térmico y su traslación a lo modelados matemáticos.

De estos primeros resultados se infieren trabajos a futuro muy alentadores en función de la gran cantidad de datos obtenidos. Se asume también, que el modelo desarrollado presenta importantes potencialidades. Esto, hace posible la optimización del modelo DETED de un modo sistemático en un plazo muy corto, por lo cual se prevé continuar profundizando el análisis para seguir perfeccionando la estructura del modelo desarrollado.

REFERENCIAS

- Magni, M., Ochs, F., Streicher, W. (2022). Comprehensive analysis of the influence of different building modelling approaches on the results and computational time using a cross-compared model as a reference, *Energy and Buildings* 259, 1-34.
- Pang, Z., O'Neill, Z., Li, Y., Niu, F. (2020). The role of sensitivity analysis in the building performance analysis: a critical review. *Energy & Building*, 209, 109659.
- Pipes, L. A. (1957). Matrix Analysis of Heat Transfer Problems, Journal, Franklin Institute, Vol. 263, No. 3
- Standard EN ISO 13786 – 2007 Thermal performance of building components – Dynamic thermal characteristics – Calculation Methods
- W. Tian (2013). A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20 . 411-419.