

## CALIBRACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE EDIFICIOS USANDO ENVOLVENTES MODIFICADAS CON MATERIALES QUE CAMBIAN DE FASE

### CALIBRATION OF BUILDING THERMAL PERFORMANCE SIMULATION MODEL USING MODIFIED ENVELOPES WITH PHASE-CHANGE MATERIALS

**Maria Cecilia Demarchi<sup>a</sup>, Juan Carlos Álvarez-Hostos<sup>b</sup>, Victor Daniel Fachinotti<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Centro de Investigación en Métodos Computacionales, CONICET, Universidad Nacional del Litoral, Predio CONICET Dr. Alberto Cassano Colectora Ruta Nac. N° 168 Km. 0, S3000, Argentina. ingmcdemarchi@gmail.com, vfachinotti@cimec.unl.edu.ar*

<sup>b</sup>*Centro de Investigación y Transferencia Rafaela (CIT-Rafaela), Universidad Nacional de Rafaela, CONICET, Bv. Roca 989, S2300, Argentina. jhostos@cimec.unl.edu.ar*

**Palabras clave:** Hormigón celular, PCM, simulación energética de edificios, calibración, EnergyPlus.

**Resumen.** En este trabajo se presenta la calibración del modelo de simulación computacional del rendimiento térmico de edificios cuya envolvente está compuesta con paneles de hormigón celular con PCM (del inglés *Phase Change Material*) incorporado. Este compuesto posee una alta capacidad de almacenamiento de energía y aislamiento. Se estudian tres edificios geoméricamente semejantes que difirieron en el material de la capa aislante en las paredes externas (NRG-foam o EPS) construidos en Sofía, Bulgaria, en el marco del proyecto NRG STORAGE (*Integrated porous cementitious Nanocomposites in non-Residential building envelopes for Green active/passive energy STORAGE*). Cada edificio cuenta con sensores de temperatura y flujo de calor, y una estación meteorológica, que registran datos continuamente. La calibración se realizará optimizando las propiedades de los materiales en un rango de valor razonable, en modo de reducir el error medio cuadrático entre las temperaturas calculadas en EnergyPlus y las registradas por los sensores.

**Keywords:** Foamed concrete, PCM, building energy simulation, calibration, EnergyPlus.

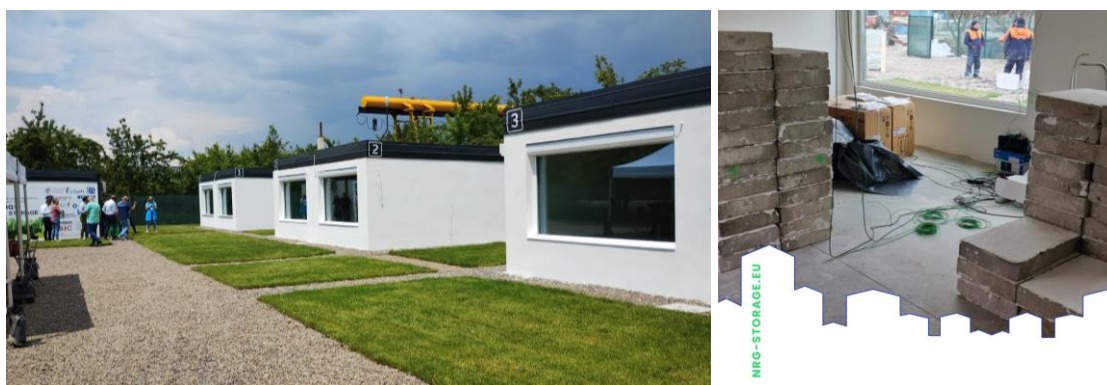
**Abstract.** This paper presents the calibration of the computational simulation model of the thermal performance of buildings with envelopes composed of foamed concrete panels with embedded PCM (Phase Change Material). This composite has a high energy storage and insulation capacity. Three geometrically similar buildings differing in the material of the insulation layer on the external walls (NRG-foam or EPS) constructed in Sofia, Bulgaria, are studied in the framework of the NRG STORAGE project (*Integrated porous cementitious Nanocomposites in non-Residential building envelopes for Green active/passive energy STORAGE*). Each building is equipped with temperature and heat flux sensors and a weather station, which continuously record data. Calibration will be performed by optimising the material properties in a reasonable value range, in order to reduce the root mean square error between the temperatures calculated in EnergyPlus and those recorded by the sensors.

## 1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población induce al aumento del consumo de energía y el nivel de contaminación. Los edificios consumen gran parte de la energía total y son responsables un alto porcentaje de emisión de gases de efecto invernadero, principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (IEA, 2022). Una solución prometedora es el uso de espumas cementicias con materiales con cambio de fase microencapsulados (MPCM) incorporado. Estos materiales tienen la capacidad de almacenar y liberar energía en el cambio de fase, logrando amortiguar los cambios de temperatura en el interior del edificio y en efecto disminuir el consumo de energía, y son materiales amigables con el medio ambiente, ya que gran parte de ellos son orgánicos (figura 1). En este contexto, este trabajo se centra en calibrar el modelo de simulación del desempeño térmico de edificios de prueba basados en el modelo ANSI/ASHRAE BESTEST 900 (ANSI/ASHRAE Standard 140-2017) cuyas envolventes están aisladas con dichos materiales. Los edificios están construidos en Sofía, Bulgaria, en el marco del proyecto NRG STORAGE (*Integrated porous cementitious Nanocomposites in non-Residential building envelopes for Green active/passive energy STORAGE*) (<https://nrg-storage.eu/>). EL NRG FOAM instalado es la mezcla óptima entre pasta de cemento, MPCM y aire incorporado, resultado de investigaciones experimentales y de simulación computacional (Ma. Cecilia Demarchi et al. 2022, F. Bre et al. 2016).

## 2 EDIFICIOS DE DEMOSTRACIÓN

Los edificios de demostración están construidos en Sofía, Bulgaria, a 15 km de la ciudad. Esta zona se caracteriza por un clima tipo continental, con inviernos fríos y veranos relativamente calurosos. En la figura 1 se muestran las tres edificaciones de prueba, de izquierda a derecha Demo House 1, 2 y 3, y la edificación de monitoreo Demo House 0.



**Figura 1:** A la izquierda, construcciones de prueba en Sofía, Bulgaria. A la derecha, placas de espuma cementicia con MPCM incorporado.

Las construcciones están basadas en el modelo ANSI/ASHRAE BESTEST 900 (ANSI/ASHRAE Standard 140-2017), con pequeñas modificaciones en dimensiones y materiales por razones constructivas. Cada edificio mide 8 mts de ancho, 6 mts de profundidad y 2.50 mts de alto. Cuentan dos ventanas de 1.80 mts de alto y 3.02 mts de ancho instaladas en la fachada sur. Se accede a ellas por la fachada norte.

En cuanto a los materiales, los techos son de madera aislados con un material bituminoso y lana mineral ligera entre vigas. El piso es una losa de hormigón armado sobre suelo estructural, aislado del mismo con poliestireno extruido. Las paredes son de ladrillo hueco portante cerámico, terminados con revoque común y pintura blanca del lado interior y aislados

térmicamente del lado exterior. Demo House 1 posee una placa de poliestireno expandido, mientras que Demo House 2 y 3 cuenta con los paneles NRG FOAM, todas terminadas con material plástico y pintura blanca. Las ventanas son paños fijos de triple vidrio con sistema de sombreado de cortinas tipo roller blancas. Demo House 3 posee un sistema de protección solar en la pared oeste. Cada construcción cuenta con 2 equipos para acondicionar el aire a una temperatura de 22°C. El material aislante es un NRG FOAM compuesto por de pasta de cemento con 85% de porosidad y 10% de MPCM respecto al volumen de cemento.

Para el monitoreo de las edificaciones se instalaron sensores de temperatura en cada superficie, tanto en el interior como en el exterior, sensores de temperatura, humedad del aire y flujo de calor. Cada edificio cuenta con un medidor de consumo de energía de los equipos de acondicionamiento de aire. Los datos meteorológicos se obtienen de una estación meteorológica instalada en Demo House 2 que mide temperatura de bulbo seco, humedad, presión atmosférica, velocidad y dirección de viento, precipitación y radiación global.

Durante el periodo analizado (junio 2023), los edificios de demostración se mantienen desocupados, con los sistemas HVAC apagados y las cortinas de enrollar abiertas completamente.

### 3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo consta de varios pasos. Inicia con el procesamiento de datos, creación del archivo meteorológico y configuración del archivo en donde se define la geometría del edificio, materiales, algoritmos de balance de calor y variables de salida. Se continúa con la simulación energética en EnergyPlus, en donde se obtienen las temperaturas del ambiente interior y superficies del edificio para luego comparar con las obtenidas *in situ*. La exactitud del modelo considerado se mide mediante el cálculo del error cuadrático medio RMSE (ASHRAE Guideline 14-2014, R. Perez et al. 1990, R. Perez et al. 2002, S. Martínez-Mariño et al. 2021, T. Hong et al. 2017). Se realiza un análisis paramétrico ajustando la emisividad y absorptividad de los materiales opacos, la trasmisividad y reflectividad de los materiales transparentes, el flujo de aire por infiltración y coeficiente convectivo interior con el objetivo de minimizar el error. Esto se explica a detalle a continuación.

#### 3.1 Tratamiento de datos y elección del periodo de simulación.

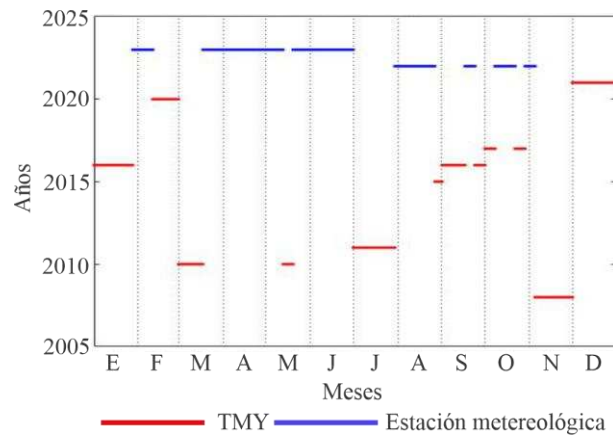
Los datos obtenidos de la estación meteorológica y los sensores se obtienen en formato “.amrw” y se los exporta a formato “.xls” para su lectura. La lectura de datos se realiza cada 15 minutos.

Para la comparación de temperatura medida por sensores se eligen periodos con mediciones continuas en el tiempo.

Para la creación del archivo meteorológico, se conservan los datos que mantengan continuidad en el tiempo (más de una semana), descartando los días con discontinuidad de lectura que superen las 48 hs. En el caso de datos faltantes, utilizamos los métodos adoptados por NREL para completarlos: los periodos de tiempo cortos (5 hs) se completan mediante interpolación lineal, mientras que los periodos largos (de 5 a 47 hs) se completan con datos idénticos de días adyacentes (F. Bre et al. 2016, National Renewable Energy Laboratory, 1992). Como EnergyPlus necesita como entrada un archivo meteorológico de un año completo, los datos faltantes se completan con los datos del Año Meteorológico Típico (TMY) de Sofía. En la figura 3 se muestra la distribución de datos obtenidos de la estación meteorológica y los tomados del TMY.

La calibración del modelo se realizará con los datos del mes de junio de 2023, debido a que

se tiene un periodo de tiempo completo y con datos confiables.



**Figura 2:** Datos meteorológicos obtenidos in situ vs los tomados del año meteorológico típico

### 3.2 Creación del archivo meteorológico.

La creación del archivo meteorológico se realiza utilizando el programa WeatherConverter. Para esto se ordenan los datos meteorológicos en un archivo ‘.csv’ y se escribe el archivo ‘.def’ en donde se especifica que variable representa cada dato. El programa completa los datos de radiación normal directa y difusa utilizando el modelo de Pérez (Auxiliary Programs – EnergyPlus V.22.0, F. Bre et al. 2016, R. Perez et al. 1990, R. Perez et al. 2002).

### 3.3 Simulación energética.

La simulación energética se realizó con EnergyPlus V.22.0, programa de simulación térmica libre y de código abierto desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE). Actualmente, es el programa más difundido para el análisis de eficiencia energética.

Se configuraron las características del edificio, los algoritmos de balance de calor, las cargas térmicas, sistemas de acondicionamiento y variables de salida en un archivo extensión “.idf”, mientras que los datos meteorológicos se ordenaron en un archivo extensión “.epw”. El archivo meteorológico fue construido con los datos medidos *in situ* utilizando el programa WeatherConverter, programa auxiliar de EnergyPlus.

### 3.4 Calibración del modelo computacional.

La precisión de la simulación se mide mediante el error cuadrático medio RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{EP} - T_S)^2}{n}} \quad (1)$$

en donde  $T_{EP}$  es la temperatura calculada mediante la simulación,  $T_S$  la medida obtenida del sensor y  $n$  la cantidad de mediciones.

### 3.5 Ajuste de los parámetros del modelo de simulación.

El ajuste de los parámetros del modelo se realiza mediante análisis de sensibilidad y

minimización del RMSE. A continuación, se describe cada uno de ellos y la variación de los valores correspondientes.

**Parámetro 1:** Propiedades de los materiales opacos:

- Absortividad térmica (*Thermal Absorptance*): determina la cantidad de radiación que el material es capaz absorber en el espectro de longitud de onda larga ( $>2.5 \mu\text{m}$ ).
- Absortividad solar (*Solar Absorptance*): Determina la cantidad de radiación que el material es capaz de absorber en el espectro visible ( $0.3$  a  $2.537 \mu\text{m}$ ).
- Absortividad visible (*Visible Absorptance*): Determina la cantidad de radiación que el material es capaz de absorber en el espectro visible ( $0.37$  a  $0.78 \mu\text{m}$ ).

Estos parámetros son utilizados en el balance de calor de las superficies según la radiación solares que absorben y reflejan. Por defecto los valores son 0.9, 0.6 y 0.6 respectivamente. La tabla 1 muestra los valores adoptados (Input Output Reference – EnergyPlus V.22.0, T. Hong et al. 2017):

Tipo de superficie	Thermal Absorptance	Solar Absorptance	Visible Absorptance
Lisas y blancas	0.9	0.26	0.26
Rugosas y oscuras	0.98	0.98	0.98
Lisas y grises	0.88	0.6	0.6

**Tabla 1:** Propiedades ópticas de los materiales opacos.

**Parámetro 2:** Propiedades de los materiales transparentes.

- *Solar Transmittance at Normal Incidence, Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence, Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence*. Estos parámetros representan la capacidad del vidrio de transmitir y reflejar radiación en el espectro solar.
- *Visible Transmittance at Normal Incidence, Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence, Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence*. Estos parámetros representan la capacidad del vidrio de transmitir y reflejar radiación en el espectro solar afectado por la respuesta del ojo humano.
- *Infrared Transmittance at Normal Incidence, Front Side Infrared Hemispherical Emissivity, Back Side Infrared Hemispherical Emissivity*. Estos parámetros representan la capacidad del vidrio de transmitir y reflejar radiación en el espectro infrarrojo.

Debido a la incertidumbre de las propiedades ópticas del acristalamiento, se considera como hipótesis inicial que el vidrio es un material transparente, por lo que su absortividad es tan baja que puede considerarse nula, entonces, la suma de la reflectividad y la transmisividad será igual a 1. Se hace variar la transmisividad de 0.1 a 0.9 con pasos de 0.1 y la reflectividad varía en función de esta (Input Output Reference – EnergyPlus V.22.0, T. Hong et al. 2016).

**Parámetro 3:** Variación de la tasa de infiltración de aire (*Infiltration, Desing low rate  $m^3/s$* ). Corresponde al aire que ingresa al ambiente por apertura de puertas, terminaciones en las aberturas, etc. Este valor se hace variar entre 0.01 a 0.1 con pasos de 0.01 (Input Output Reference – EnergyPlus V.22.0.).

**Parámetro 4:** Variación del coeficiente de convección de las superficies internas (*Convection Coefficients*). Se fijan 10 valores para los coeficientes convectivos de paredes (h), techos y pisos, variándolos entre 0.1 y 8.29 para paredes, 0.1 y 6.23 para techos, y 0.1 y 9.25 para pisos. Los límites superiores corresponden a los límites que establece la norma ASHRAE HANDBOOK – FUNDAMENTALS en los cuales considera que un ambiente es confortable.

También se prueban los distintos algoritmos del programa para el cálculo del mismo.

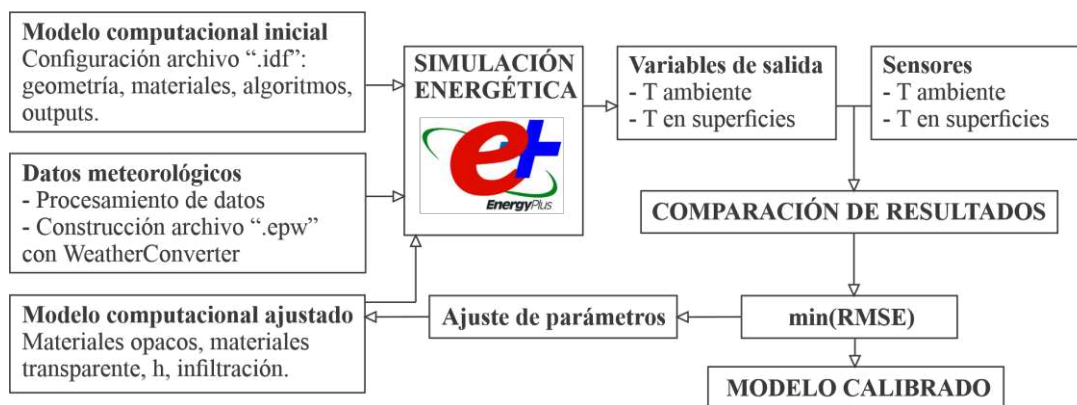
**Parámetro 5:** Temperatura superficial del suelo. Estos valores se obtienen del archivo meteorológico generado con los datos medidos in situ. En la tabla 2 se muestran los valores de temperatura de suelo para cada mes:

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Temp (°C)	2.89	5.47	7.40	15.39	16.27	21.08	25.25	26.46	24.07	18.34	13.92	7.22

**Tabla 2:** Temperaturas del suelo (°C)

### 3.6 Esquema de la metodología de trabajo.

Como se mencionó anteriormente, el trabajo inicia con procesamiento de datos, creación del archivo meteorológico y configuración del archivo con los datos de entrada a EnergyPlus. Se continúa con la simulación energética, se obtienen las temperaturas del ambiente interior y superficies del edificio y se las compara con las obtenidas *in situ*. Este proceso se repite hasta obtener el mínimo error. En la figura se detalla dicho esquema de trabajo.



**Figura 3:** Flujo de trabajo

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Parámetros ajustados.

Luego de varias simulaciones, se llega al siguiente modelo ajustado:

- Propiedades de los materiales opacos: definidas en el punto 3.5.
- Propiedades de los materiales transparentes: en la imagen 4 se muestran las propiedades del vidrio.

```

WindowMaterial:Glazing,
  Glass Type 1,           !- Name
  SpectralAverage,       !- Optical Data Type
  ,                       !- Window Glass Spectral Data Set Name
  0.003175,              !- Thickness {m}
  0.1,                   !- Solar Transmittance at Normal Incidence\n
  0.9,                   !- Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence\n
  0.9,                   !- Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence\n
  0.9,                   !- Visible Transmittance at Normal Incidence\n
  0.1,                   !- Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence\n
  0.1,                   !- Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence\n
  0.82,                  !- Infrared Transmittance at Normal Incidence\n
  0.18,                  !- Front Side Infrared Hemispherical Emissivity\n
  0.18,                  !- Back Side Infrared Hemispherical Emissivity\n
  1.06;                  !- Conductivity {W/m-K}
    
```

- Infiltración: Se establece un valor de 0.018 m<sup>3</sup>/s de flujo de aire.
- Coeficiente convectivo: se calcula mediante el algoritmo *TARP* para las superficies interiores y *MoWITT* para las superficies exteriores.

## 4.2 Error cuadrático medio.

En la tabla 3 se observa la precisión de la calibración del modelo mediante el cálculo del error cuadrático medio para los 3 edificios de demostración.

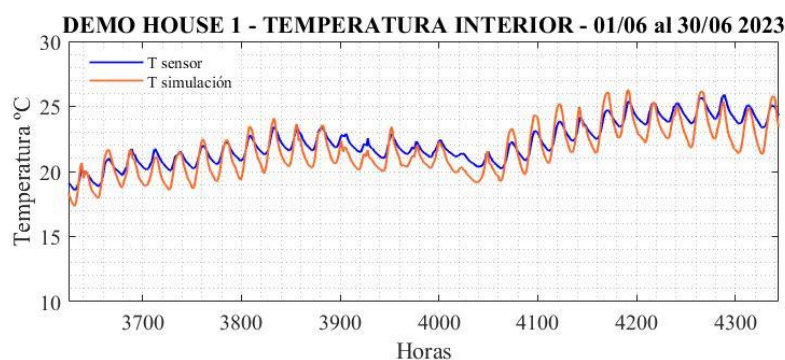
	SOFIA DEMO 1		SOFIA DEMO 2		SOFIA DEMO 3	
T interior	0.9416		0.9769		0.9125	
Superficie	Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior
Este	0.4900	3.5728	0.4874	3.3308	0.5804	3.5246
Sur	0.4858	3.2504	0.4858	3.3367	0.4864	3.3944
Oeste Inf.	0.9621	4.6110	1.0626	4.2369	1.2331	4.3386
Oeste Med.	0.5131	4.8023	0.5057	4.2640	0.6167	4.2225
Oeste Sup.	0.4451	4.9021	0.5464	4.3212	0.7019	5.6592
Norte	0.5158	2.4577	0.5339	2.4362	0.5888	3.6296

**Tabla 3:** Error cuadrático medio (°C)

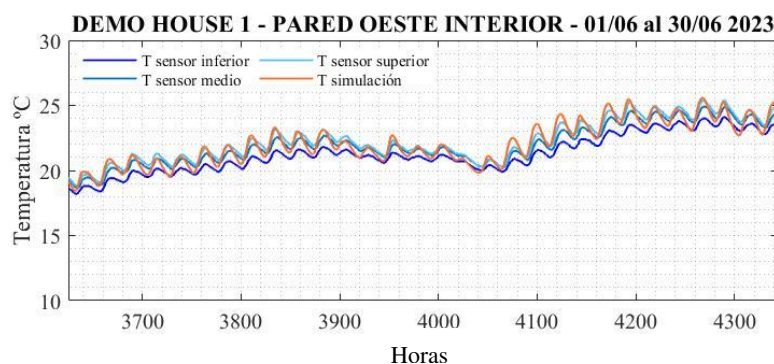
## 4.3 Temperatura.

En las figuras siguientes, se muestran las comparaciones entre temperatura interior y la temperatura superficial de la pared oeste, pared tomada como referencia, medidas in situ y calculadas por simulación. En las gráficas se puede cómo los resultados de la simulación exhiben una buena correspondencia con los resultados medidos en por los sensores, lo cual también se refleja en los errores reportados en la tabla 3.

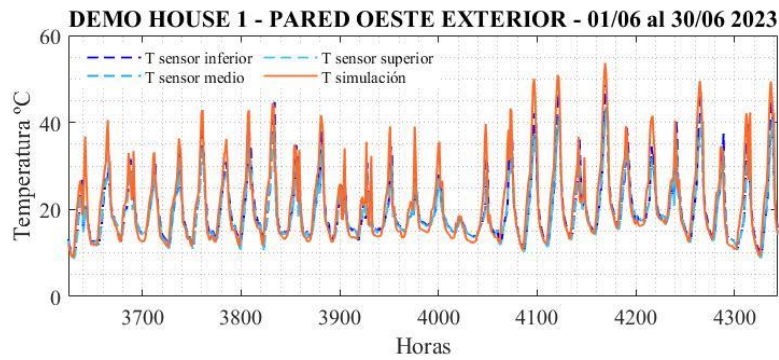
### 4.3.1 Demo House 1.



**Figura 4:** Temperatura interior Demo House 1

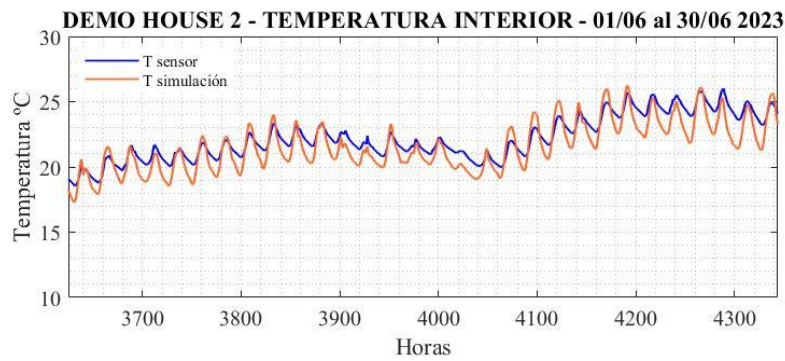


**Figura 5:** Temperatura interior pared oeste Demo House 1

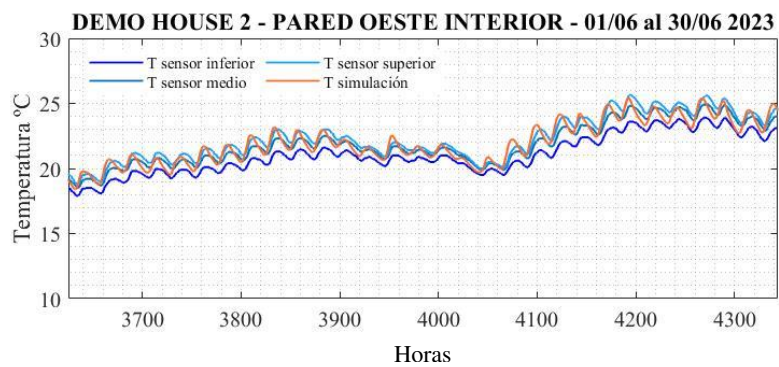


**Figura 6:** Temperatura exterior pared oeste Demo House 1

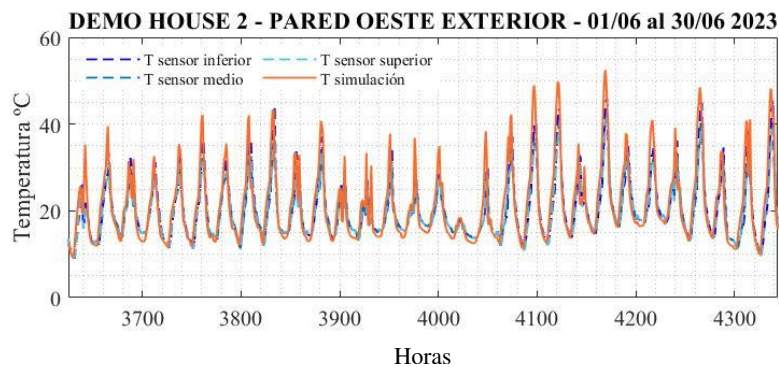
**4.3.2 Demo House 2.**



**Figura 7:** Temperatura interior Demo House 2



**Figura 8:** Temperatura interior pared oeste Demo House 2



**Figura 9:** Temperatura exterior pared oeste Demo House 2



### 4.3.3 Demo House 3.

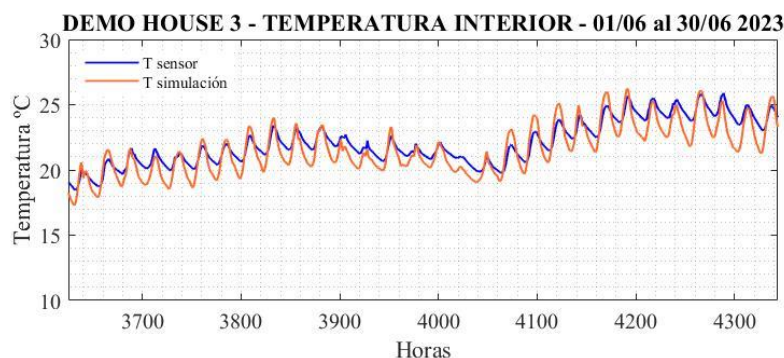


Figura 10: Temperatura interior Demo House 3

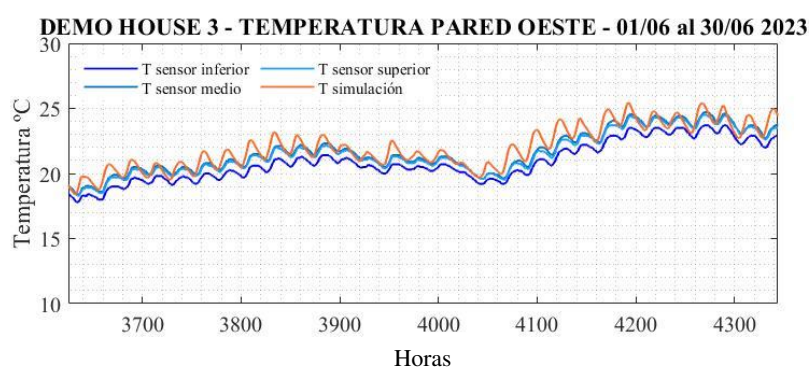


Figura 11: Temperatura interior pared oeste Demo House 3

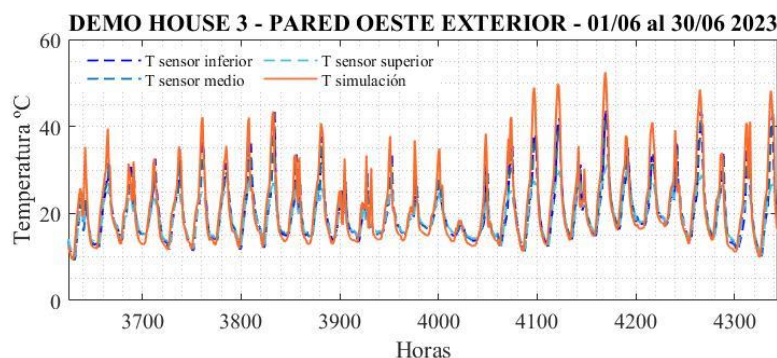


Figura 12: Temperatura exterior pared oeste Demo House 3

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrolló la calibración del modelo de simulación energética de edificios de demostración construidos en Sofía, Bulgaria, en el marco del proyecto NRG STORAGE (*Integrated porous cementitious Nanocomposites in non-Residential building envelopes for Green active/passive energy STORAGE*), y la construcción de un archivo meteorológico, con datos medidos *in situ*, para la simulación energética de edificios. La exactitud del modelo se midió a través del error cuadrático medio RMSE, el cual se minimizó mediante ajustes de distintos parámetros del modelo a través de un análisis paramétrico. Los resultados obtenidos en este trabajo proporcionan los primeros lineamientos en cuanto al análisis de sensibilidad de propiedades térmicas, radiativas y fuentes convectivas de energía al reproducir el comportamiento de edificaciones reales, utilizando como herramienta de análisis numérico EnergyPlus. Con base en estos lineamientos se pretende el desarrollo ulterior de una

herramienta de optimización numérica para minimizar el error entre variables simuladas numéricamente y aquellas medidas *in situ*.

## REFERENCIAS

- IEA (2022), Building Envelopes, IEA, París <https://www.iea.org/reports/building-envelopes>, Licencia: CC BY 4.0.  
<https://nrg-storage.eu/>  
 ANSI/ASHRAE Standard 140-2017  
 ASHRAE Guideline 14-2014. *Measurement of Energy, Demand, and Water Savings*.  
 ASHRAE HANDBOOK – FUNDAMENTALS – 2021  
 Auxiliary Programs – EnergyPlus V.22.0  
 Input Output Reference – EnergyPlus V.22.0  
 Fachinotti, V., Peralta, I., Toro, S., Storti, B., Caggiano, A. “Automatic generation of high-fidelity representative volume elements and computational homogenization for the determination of thermal conductivity in foamed concretes”. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4286262>, 2022.  
 Ma. Cecilia Demarchi, Victor D. Fachinotti, “Simulación del desempeño térmico de edificios con materiales con cambio de fase en su envolvente”, Congreso Argentino de Mecánica Computacional 2022.  
 Facundo Bre, Victor D. Fachinotti, “Generation of typical meteorological years for the Argentine Littoral Region”, Energy and Buildings, Vol. 129, 2016.  
 National Renewable Energy Laboratory (NREL), NSRDB Volume 1 – User’s Manual – National Solar Radiation Data Base (1961–1990), Version 1.0, NREL, Golden, CO, USA, 1992.  
 R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, R. Stewart, “Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance”, Solar Energy 44 (5) (1990) 271–289.  
 R. Perez, P. Ineichen, K. Moore, E.L. Maxwell, R.D. Seals, A. Zelenka, “Dynamic global-to-direct irradiance conversion models”, ASHRAE Trans. 98 (Part 1) (2002) 354–369  
 Sandra Martínez-Mariño, Pablo Eguía Oller, Enrique Granada Álvarez, Aitor Erkoreka-González, “Simulation and validation of indoor temperatures and relative humidity in multi-zone buildings under occupancy conditions using multi-objective calibration”, Building and Environment, Vol. 200, 2021.  
 Taehoon Hong, Jimin Kim, Jaemin Jeong, Myeonghwi Lee, Changyoon Ji, “Automatic calibration model of a building energy simulation using optimization algorithm”, Energy Procedia, Vol. 105, 2017.  
 Taehoon Hong, Chan-Joong Kim, Jaemin Jeong, Jimin Kim, Choongwan Koo, Kwangbok Jeong, Minhyun Lee, “Framework for Approaching the Minimum CV(RMSE) using Energy Simulation and Optimization Tool”, Energy Procedia, Vol. 88, 2016.  
 Mohammad Royapoor, Tony Roskilly, “Building model calibration using energy and environmental data”, Energy and Buildings, Vol. 94, 2015.  
 Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera and Dabid P. Dewitt. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* – 7th Edition.