XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

EL CARÁCTER TÉRMICO COMO MÉTRICA PARA LA CALIBRACIÓN TEMPRANA DE MODELOS INFORMÁTICOS DE DESEMPEÑO TÉRMICO

Valentina Zuluaga Puerta (1); Juan Pablo Arango Plazas (2)

(1) Estudiante de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, vzuluagap@unal.edu.co, Carrera 65 Nro. 59ª - 110, Bloque 24, Medellín, +57 301 6739720.

(2) Estudiante de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, juparangopl@unal.edu.co, Carrera 65 Nro. 59ª - 110, Bloque 24, Medellín, +57 320 7399038.

RESUMEN

Esta investigación empleó la comparación del Carácter Térmico como métrica para la calibración temprana de modelos energéticos, por medio de un sistema de análisis y representación que simplifica las comparaciones entre datos medidos y simulados. Se presenta un caso de estudio de la calibración de tres espacios interiores de una vivienda en un clima frio andino, donde se evaluó la sensibilidad en cambios en los ámbitos de geometría, archivo climático y resistencia térmica. Los resultados demostraron que la comparación de CT a través de una función de correlación como métrica de similitud de datos reales y simulados, puede ser empleada para la calibración temprana de modelos energéticos donde se empleen series de temperatura de gran escala, como meses, o años de información térmica. Entre las cualidades del método propuesto se encuentran la capacidad de: a) ofrecer información que retroalimenta el proceso de calibración y diseño, b) analizar y visualizar series climáticas de gran escala, c) describir cuantitativa y cualitativamente las cualidades térmicas del espacio en estudio.

Palabras clave: Análisis Térmico Dinámico, Carácter Térmico, Calibración Modelos Energéticos, Monitorización.

ABSTRACT

This research used the comparison of Thermal Character as a metric for the early calibration of energy models, using an analysis and representation system that simplifies the comparison between measured and simulated data. Three interior spaces of one house in Andean Cold climate were used as study case. The study evaluated the sensibility at changes in the fields of geometry, climatic file and thermal resistance. The results showed that the comparison of TC through a correlation function like metric of similitude of measured and simulated data can be used for an early calibration of energetic models in large scale series, with months or years of thermal information. Among the qualities of the proposed method are the ability to: a) provide information that feeds back the calibration and design process, b) analyze and visualize large-scale climate series, c) describe quantitatively and qualitatively the thermal qualities of space in study.

Keywords: Dynamic Thermal Analysis, Thermal Character, Energy Models Calibration, Monitoring.

1. INTRODUCCIÓN

Las herramientas de modelación térmica son de gran utilidad en los campos del diseño y rehabilitación de edificaciones, posibilitando la evaluación de multiplicidad de escenarios hipotéticos de diferentes alternativas de sin la necesidad de ser construidas y permitiendo la creación de mejores edificaciones. Muchos estudios han demostrado las diferencias entre los valores simulados y los valores medidos en campo (BORDASS et al., 2001; MENEZES et al., 2012), por lo que la calibración del modelo es fundamental para asegurar la fiabilidad de los resultados del desempeño térmico del edificio. Coakley et al. (2014), presentaron una revisión detallada de los métodos para la calibración de modelos con datos medidos, donde destacan que: a) no existe una metodología definitiva para la calibración de modelos, b) la monitorización de variables de salida es limitada, a diferencia de las muchas variables de entrada que involucran un modelo energético, c) muchos de los métodos de calibración dependen del conocimiento de usuarios y diseñadores y d) es un proceso de alta complejidad metodológica y analítica.

En el campo de la calibración de modelos energéticos de edificaciones es posible distinguir dos corrientes: 1. La calibración del uso de energía (CHAUDHARY et al., 2016; CHONG et al., 2019; LARA et al., 2017) y 2. La calibración de las condiciones térmicas (BECKETT et al., 2017; FIGUEIREDO et al., 2018; SINGH et al., 2010). El primero, busca sintonizar el modelo frente al gasto energético de equipos, iluminación, aire acondicionado, entre otros; con datos medidos o estándares normativos. Este es empleado con mayor frecuencia en casos de edificaciones que cuentan con soluciones de climatización activa, debido a la preocupación de altos gastos energéticos y costos de operación. El segundo, busca sintonizar datos térmicos medidos en sitio con los resultados del modelo energético. Este es empleado con mayor frecuencia en edificaciones que cuentan con soluciones pasivas para su climatización, como gran parte de las edificaciones en el trópico.

Los métodos convencionales de procesamiento y comparación de los datos de temperatura empleados en la calibración térmica entre datos medidos y simulados involucran métricas tales como: temperatura media, amplitud térmica diaria, mínimas y máximas, y la correlación estadística (ZULUAGA; SALAZAR, 2018). Estas métricas permiten conocer diferencias de temperatura entre datos medidos y simulados, sin embargo, al no emplear la totalidad de los datos pueden llegar a perder resolución.

Se concluye que se hace necesaria una metodología que permita: a) ofrecer información que retroalimente el proceso de calibración, b) visualizar y analizar series climáticas de gran escala, c) describir gráficamente de forma sencilla y efectiva la información térmica y, d) describir cuantitativa y cualitativamente las cualidades térmicas de los espacios construidos.

Se define el Carácter Térmico como la relación entre la temperatura exterior e interior de un espacio construido, la cual se determina a partir de las características de emplazamiento, temporalidad, diseño y uso, que derivan en la sucesión de situaciones únicas pero semejantes que constituyen la cotidianidad térmica de una edificación. Dicho de otra manera, si se estudia día a día la temperatura de un espacio interior, rápidamente se encontrarán parámetros de semejanza que permitirán delimitar los rangos típicos entre los que opera su temperatura. Este estudio propone emplear esos parámetros, representados en una matriz de frecuencia o densidad, como métrica para comparar la similitud entre datos de temperatura medidos y simulados. De la repetición de este proceso, con modificaciones en los parámetros del modelo, puede llegarse a la calibración inicial de un modelo energético.

Esta metodología se aplica en un caso de estudio de una vivienda localizada en el municipio de San Pedro (Figura 1), Colombia, ubicada en 6°29′10″N 75°34′33″W, a 2475 msnm con un clima frío andino y una temperatura promedio de 17°C con mínimos de 13°C y máximos de 24°C. La vivienda corresponde a una tipología común de la zona: un nivel, muros de ladrillo con cámara de aire, cubierta de tejas de barro y piso en losa de concreto apoyado directamente en el terreno. En la Figura 2 se ilustra la distribución espacial de la vivienda y se identifican las zonas monitoreadas. Se recopilaron datos de la temperatura del aire durante cuatro meses, entre mayo y agosto de 2017, con sensores remotos programables Hobo, con un intervalo de 15 minutos que posteriormente fueron promediados a un intervalo de 1 hora. Se instalaron 4 puntos de monitorización, uno para exterior y 3 para espacios interiores. Los espacios interiores corresponden a dos zonas privadas y a una zona común.



Figura 1. Fotografía de la vivienda analizada, San Pedro, Colombia.

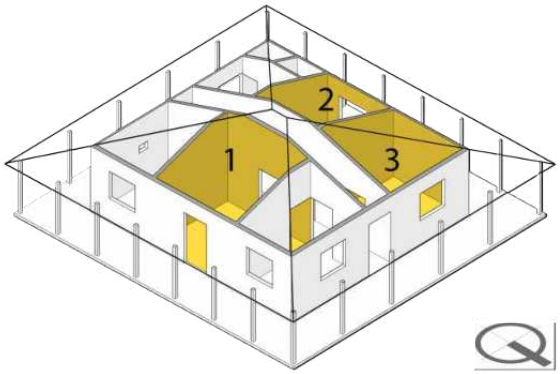


Figura 2. Distribución espacial de la vivienda. En amarillo las zonas analizadas. (1) Sala–comedor (2) Habitación 1 (3) Habitación 2. Se presenta el techo transparente para mejor visualización.

2. OBJETIVO

Emplear el Carácter Térmico como métrica para comparar la similitud entre datos de temperatura medidos y simulados, produciendo información que contribuya en el proceso de calibración de un modelo energético.

3. METODOLOGÍA

3.1. Representación y comparación del Carácter Térmico a partir de matrices de densidad

Las matrices de densidad se construyen a partir de un eje "x" que contiene la temperatura exterior, un eje "y" que contiene la temperatura interior y un eje "z" que hace referencia al número de veces (porcentualmente) que se repite una combinación de temperatura exterior e interior (ver Figura 3). Este valor del eje "z", con fines de visualización se traduce en un color de menor o mayor intensidad de acuerdo a su valor. Para simplificar el desarrollo de la matriz se redondearon los números decimales de los datos de temperatura a números enteros, teniendo un intervalo entre filas y columnas de 1°C.

Como se observa en la Figura 3a, la temperatura interior y exterior de un instante, se traduce en la Figura 3b en 1 repetición en la matriz. En la figura 3c se representan las mediciones de temperatura interior y exterior de un día y en la Figura 3d se traducen en 24 repeticiones distribuidas en las celdas correspondientes. Finalmente, en la Figura 3e se muestran los datos de temperatura exterior e interior de 112 días que se traducen en la Figura 3f en 5376 repeticiones que se distribuyen en las celdas correspondientes y que se representan según los rangos de porcentajes definidos. En la Figura 3f se incorpora información como la media, mediana, mínimas y máximas, con el fin de simplificar las comparaciones.

El método estadístico seleccionado para realizar la comparación entre matrices fue la "Correlación de Pearson", en el que se obtiene un número entre 0 y 1, donde 0 indica una diferencia total entre las matrices y 1 indica total similitud entre ambas. La aplicación de este método requiere que las matrices a comparar cuenten con un igual número de filas y columnas, y que éstas se encuentren alineadas en los mismos rangos. Se descartan los valores donde ambas matrices cuentan con valores de 0% del tiempo, evitando aumentos imprevistos en la correlación.

El proceso de creación y comparación de las matrices fue automatizado con el uso el lenguaje de programación Python, empleando la librería Scipy (JONES et al., 2001). Este código fue integrado al proceso de la simulación, permitiendo emplear la comparación de Matrices de CT como métrica de salida, facilitando su uso al emplear un algoritmo de optimización.

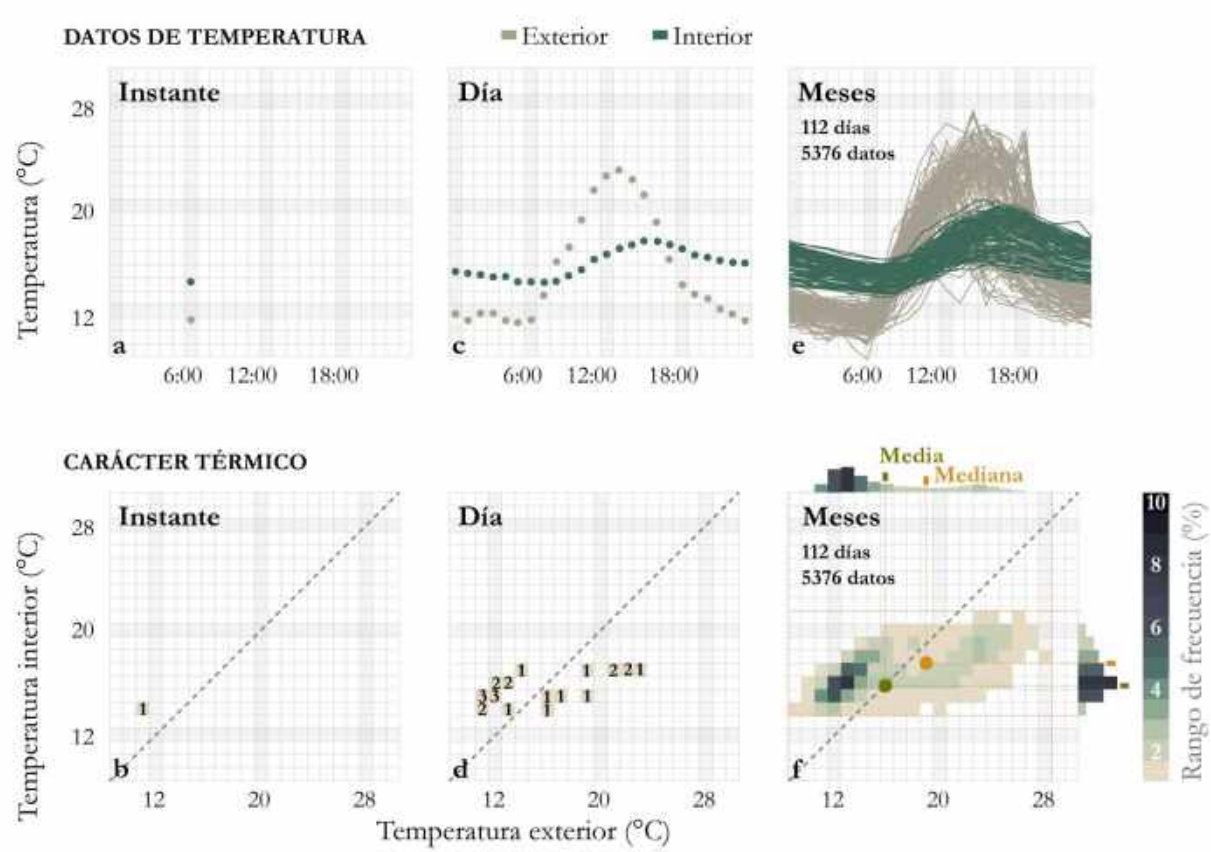


Figura 3. Procedimiento para la representación del CT a partir de matrices de densidad.

La métrica empleada para la validación de los resultados de la similitud entre los datos medidos y simulados es la comparación de la media de las series de temperatura interior. El valor que se toma en cuenta como Media Interior equivale al promedio de la diferencia en grados centígrados entre las series de temperatura interior medidas y simuladas, para los tres espacios medidos.

3.2.Construcción de los modelos computacionales

La vivienda analizada tiene una construcción típica para las viviendas de la zona, contando con una cubierta en teja de barro apoyada sobre alfardas de madera, muros en ladrillos aligerados con revoque en ambos lados y un piso en losa de concreto macizo apoyada contra el terreno. Las ventanas cuentan con un vidrio monolítico claro y marco en lámina de acero galvanizado. Se elabora un modelo paramétrico de simulación con características semejantes a la vivienda monitorizada en términos de contexto, geometría y materialidad, como se ilustra en la Figura. Son analizadas tres zonas térmicas que corresponden con los tres puntos monitoreados en el trabajo de campo previo.

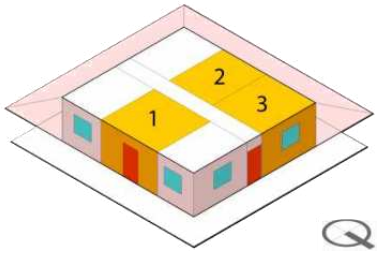


Figura 4. Modelo del caso base. En amarillo zonas analizadas. (1) Sala (2) Habitación 1 (3) Habitación 2.

Se emplean programas de simulación paramétricos implementando EnergyPlus (NREL, [s.d.]) como motor térmico a través del plugin de análisis ambiental Honeybee (ROUDSARI SADEGHIPOUR, 2009) para Grasshopper 3D (RUTTEN, DAVID, 2007) que es una interfaz para la programación gráfica dentro de Rhino 3D (MCNEEL, [s.d.]). Se realizaron simulaciones anuales de temperatura del aire interior que posteriormente fueron filtradas para un intervalo entre los meses de mayo y agosto con un total de 110 días analizados, coincidiendo con los datos monitoreados previamente.

Las ganancias internas del modelo se determinan con los valores por defecto del motor Energy Plus para un uso de vivienda. Los parámetros de accionamiento de las puertas y ventanas hacen parte de las variables del proceso de calibración y se explicarán en el apartado de variaciones de parámetros de entrada.

3.2.1. Modificación archivo climático

El municipio de San Pedro actualmente no cuenta con un archivo climático que permita la realización de simulaciones térmicas. Para la investigación los autores proponen la modificación del archivo climático de la

ciudad más cercana, reemplazando los datos de temperatura exterior, temperatura de punto de rocío y humedad; con datos monitorizados anteriormente por los mismos en el año 2018, dejando las variables restantes sin modificar. Se empleó como línea base el archivo climático de la ciudad de Rionegro con información climática entre los años 2013 y 2017. Esta información corresponde a una estación ubicada a 65km del caso de estudiado, con una diferencia de altitud de 395 m (Sanpedro 2475 msnm, Rionegro 2080 msnm). Para la modificación del archivo climático se emplea la herramienta de extensión de EnergyPlus "EPW Weather Converter" que permite la creación de un archivo separado por comas (csv), el cual es modificado y posteriormente, convertido de nuevo a un archivo climático para uso en este motor.

3.3. Proceso de calibración

3.3.1. Variaciones parámetros de entrada

Se plantea la modificación de 9 variables para la calibración de tres zonas térmicas. Las modificaciones comprendieron los ámbitos de: geometría, resistencia térmica de los materiales opacos y ventilación. En la Tabla se ilustran todas las variables y los rangos analizados.

Tabla 1. Variables de calibración y rangos analizados.

Variables de calibración				
Categoría	**Parámetro**	**Unidad**	**Valor Inicial**	**Rango**
Geometría	Cubierta	-	Plano	[Plano, Inclinado]
Resistencia Térmica Materiales Opacos Valor R	Techo	K·m2/W	2	(1.0 , 3.0)
	Piso	K·m2/W	0.5	(0.2 , 1.0)
	Muros Interiores	K·m2/W	0.5	(0.2 , 1.0)
	Muros Exteriores	K·m2/W	0.5	(0.2 , 1.0)
Ventilación Natural	Temperatura mínima interior para ventilación natural	℃	18	(16 , 22)
	Ventilación Cruzada	boolean	Falso	[Verdadero, Falso]
	Coeficiente de ventilación por diferencia altura	-	0.25	(0.0 , 0.6)
	Fracción operable de las ventanas	-	0.5	(0.2 , 0.5)

Geometría Cubierta

Se plantean dos variantes de la geometría de la cubierta y las zonas térmicas (Figura). La primera involucra la simplificación del modelo, dejando el techo plano; la segunda, consiste en modelar la inclinación real de cada zona, generando geometrías irregulares. En ambas alternativas se modelan las superficies de sombreamiento como superficies de contexto sin atributos térmicos.

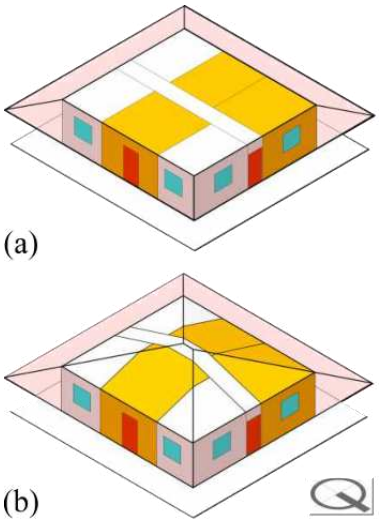


Figura 5. Variaciones de geometría.
(a) Techo plano. (b) Techo inclinado.

Resistencia Térmica Materiales Opacos

Existe incertidumbre acerca de las propiedades térmicas de los materiales del caso de estudio por factores como falta de información constructiva, degradación de los materiales, puentes térmicos, entre otros. Por ello se propone la modificación de la resistencia térmica de los materiales del caso de estudio, permitiendo encontrar los valores que logran generar comportamientos semejantes a los de la realidad, teniendo en cuenta rangos aceptables para cada tipo de superficie.

Ventilación Natural

Los parámetros del accionamiento de puertas y ventanas para el ingreso de ventilación natural pueden tener un gran impacto en el desempeño térmico de una edificación. Simular estos fenómenos implica grandes simplificaciones, como determinación de horarios fijos o temperaturas mínimas y máximas para la ventilación; algo que difiere de la realidad del usuario que está en constante cambio frente a sus preferencias de confort. En esta investigación propone la modificación de algunas de las variables que afectan la ventilación natural en el motor de Energy para la calibración del modelo, buscando explorar este campo de

gran variabilidad y permitiendo encontrar aquellas alternativas que se acerquen al comportamiento real del caso de estudio.

3.3.2. Aplicación de algoritmos de optimización

Los modelos de simulación térmica son complejos y se componen de una gran cantidad de datos de entrada. Al modelar un edificio dentro de un programa de simulación, la precisión se basa especialmente en la capacidad del usuario para ingresar los parámetros (datos de entrada) que resultan en un modelo cercano al edificio real (CLARIDGE, 2011). Dado el gran número de parámetros involucrados, el proceso de calibración de un modelo energético detallado es un problema altamente indeterminado que no brinda una única solución. (BERTAGNOLIO, 2012). Es bastante común utilizar un método de "prueba y error" para calibrar un modelo (PAN; HUANG; WU, 2007). Este tipo de enfoque puede llevar a los usuarios inexpertos, a problemas sin resolver y a procesos que conllevan mucho tiempo. Otras metodologías involucran la simulación paramétrica, donde son simulados todos los casos posibles, que posteriormente son filtrados. Lara et al. (2017) presentan un caso donde este proceso puede ser de alto costo computacional, limitando su aplicabilidad en la calibración de modelos. En el mismo estudio, se compara la calibración haciendo uso de algoritmos de optimización permitiendo obtener un costo computacional hasta 70 veces menor sin comprometer el proceso de calibración.

En esta investigación se emplea el algoritmo de optimización RBFOpt (“RBFOpt Archives”, 2017), implementado en el plugin de Opossum (WORTMANN; NANNICINI, 2017) para ser usado dentro de la plataforma de Grasshopper 3D. Este cuenta con un rendimiento superior a los algoritmos de evolución genética, que son de uso común en el campo de la simulación del rendimiento de edificaciones (WORTMANN, 2018). Se utilizan los parámetros por defecto de configuración del algoritmo de optimización, coincidiendo con las recomendaciones del desarrollador. Se determino como límite de la exploración de nuevas alternativas, la simulación consecutiva de 50 casos sin mejora en la métrica de optimización.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presentan los resultados de similitud obtenidos para los mejores casos de acuerdo a la métrica de CT, a la métrica de la media de la serie de temperatura interior y a la combinación de las dos métricas. La diferencia mínima que se obtiene comparando la media de la serie interior equivale a 0,36°C. Teniendo en cuenta que el margen de error de los sensores empleados el proceso de monitorización es de +/- 0.35 °C esta diferencia es mínima. La máxima similitud obtenida del Carácter Térmico es del 93%. De las combinaciones entre las diferentes alternativas en las variables de geometría, resistencia térmica y ventilación natural, se evaluaron 213 opciones.

Tabla 2. Resultados de similitud según las métricas empleadas.

RESULTADOS DE CALIBRACIÓN						
ID	**Métrica**	**Media interior**	**Similitud Carácter Térmico**			
			Hab 1	**Hab 2**	**Sala**	**Promedio**
1	Mejores casos CT	**0,62**	**0,93**	**0,91**	**0,95**	**0,93**
		0,60	0,93	0,90	0,95	0,93
		0,58	0,92	0,90	0,95	0,92
2	Mejores casos Media	**0,35**	**0,85**	**0,89**	**0,91**	**0,88**
		0,36	0,84	0,59	0,91	0,88
		0,36	0,71	0,88	0,89	0,82
3	Mejores casos ambas métricas	**0,36**	**0,85**	**0,89**	**0,92**	**0,89**
		0,42	0,85	0,88	0,90	0,88
		0,45	0,89	0,89	0,94	0,90

Para todos los casos, las temperaturas máximas de los datos simulados superaron por 3 o 4°C los datos medidos. Es posible que este error sea consecuencia de la modificación parcial del archivo climático, ya que solo se modificaron datos de humedad y temperatura con relación al archivo climático original que no corresponde a la zona monitorizada, sino a un Municipio cercano. En la Figura 6 se muestra el detalle de la comparación entre una semana de datos medidos y simulados.

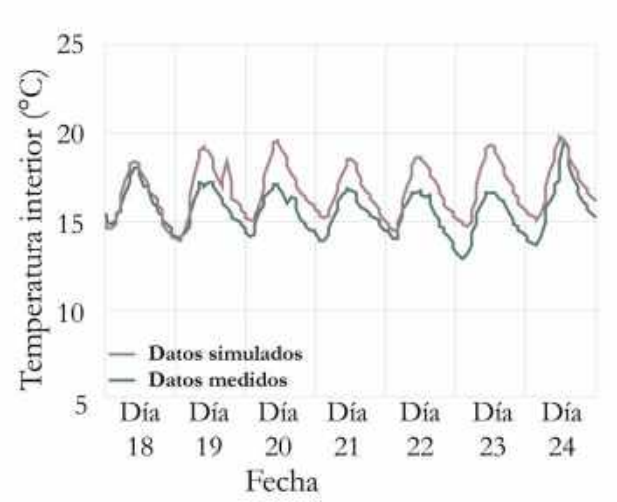


Figura 6. Comparación entre una semana de datos medidos y simulados para la mejor opción evaluada con ambas métricas.

En la Figura se presentan las matrices de comparación del Carácter Térmico de datos monitoreados en la vivienda frente a datos simulados. Se compara el mejor caso según la Tabla 2, que logra una similitud del 89% en promedio para los tres espacios interiores analizados y una diferencia media de 0,36°C. Se pueden observar valores de mínimas y máximas similares a excepción de la habitación 2, cuyos datos medidos tienen una tendencia más horizontal. Las zonas de los gráficos con mayor índice de ocurrencias (>8%), cuentan con área y ubicación similar. Se enfatiza que la simplicidad del gráfico permite la comparación y comprensión de los resultados de forma sencilla, aun conteniendo más de 5300 datos de temperatura.

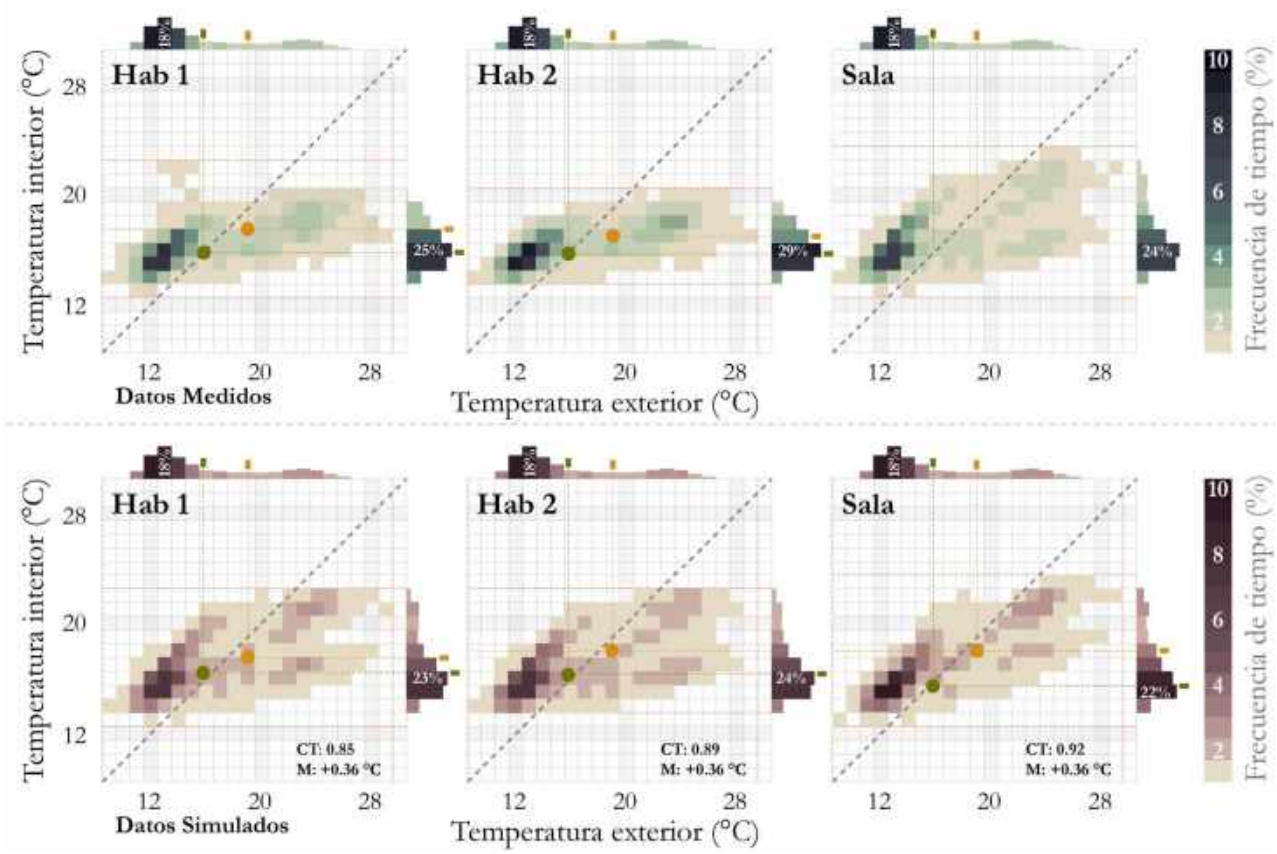


Figura 7. Caso con mayor similitud para los tres espacios interiores con ambas métricas de comparación (Carácter Térmico y Temperatura Media).

5. CONCLUSIONES

El Carácter Térmico como herramienta de visualización, permite retroalimentar el proceso de calibración por medio de comparaciones gráficas y numéricas que proporcionan valiosa información acerca de las características que determinan el ambiente interior de los espacios. Esta puede ser una herramienta complementaria a los métodos convencionales que permita visualizar de forma sencilla y eficaz las condiciones térmicas generales del espacio. La comparación de matrices de CT a través de una función de correlación como métrica de similitud de datos reales y simulados, demostró ser de uso factible para la calibración temprana de modelos energéticos donde se empleen series de temperatura de gran escala, como meses, o años de información térmica. Entre las limitaciones actuales del método se destaca que: a) existe una condición de incertidumbre frente a la sensibilidad de la métrica a un cambio del nivel de detalle de las matrices propuestas, b) la metodología tiene baja sensibilidad a cambios de poco impacto, por lo que su uso es de carácter más general, c) necesita de métodos complementarios para entender la variable temporal de los datos térmicos, d) la metodología tiene una aplicabilidad limitada en etapas avanzadas de diseño por su condición inherente de simplificar el problema, por ello en etapas posteriores es aconsejable la implementación de métodos más complejos y robustos de calibración.

En futuras investigaciones se deberán hacer avances frente a las limitaciones del método tales como: a) creación de matrices con un nivel de detalle mayor, b) la exploración de comparación de las matrices mediante otros métodos estadísticos, c) estudiar diversos casos de estudios que cuenten con mayor complejidad térmica, lo que permita validar el método para otro tipo de edificaciones, y d) adaptar la metodología para la creación de matrices que comparen simultáneamente datos medidos frente a datos simulados.

Simular una vivienda con unos parámetros básicos de diseño, materialidad y clima exterior, será suficiente para obtener parámetros térmicos representativos con respecto a un espacio medido, lo cuál es el punto de partida en etapas tempranas para realizar modificaciones en el diseño y obtener resultados con una fiabilidad media, como lo indica una correlación cercana al 90%. Lograr correlaciones mayores implicaran ampliar la cantidad de variables estudiadas ó el uso de métodos más detallados y complejos de calibración.

El uso de esta metodología favorecería procesos de diseño asociados a modificaciones de edificios preexistentes, mejorando la fiabilidad del modelo energético e identificando el margen de error en las proyecciones del entorno térmico.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BECKETT, C. T. S. et al. Measured and simulated thermal behaviour in rammed earth houses in a hot-arid climate. Part B: Comfort. **Journal of Building Engineering**, v. 13, p. 146–158, 1 set. 2017.

BERTAGNOLIO, S. **Evidence-based model calibration for efficient building energy services**. 2012. PhD Thesis–Université de Liège, Liège, Belgium, 2012.

BORDASS, B. et al. Assessing building performance in use 3: energy performance of the Probe buildings. **Building Research & Information**, v. 29, n. 2, p. 114–128, 1 mar. 2001.

CHAUDHARY, G. et al. Evaluation of "Autotune" calibration against manual calibration of building energy models. **Applied Energy**, v. 182, p. 115–134, 15 nov. 2016.

CHONG, A. et al. Continuous-time Bayesian calibration of energy models using BIM and energy data. **Energy and Buildings**, v. 194, p. 177–190, 1 jul. 2019.

CLARIDGE, D. E. 13 Building simulation for practical operational optimization. **Building performance simulation for design and operation**, p. 365, 2011.

COAKLEY, D.; RAFTERY, P.; KEANE, M. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 37, p. 123–141, 1 set. 2014.

FIGUEIREDO, A. et al. Comparison between monitored and simulated data using evolutionary algorithms: Reducing the performance gap in dynamic building simulation. **Journal of Building Engineering**, v. 17, p. 96–106, 1 maio 2018.

LARA, R. A. et al. Optimization Tools for Building Energy Model Calibration. **Energy Procedia**, 8th International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, SEB-16, 11-13 September 2016, Turin, Italy. v. 111, p. 1060–1069, 1 mar. 2017.

MCNEEL, R. A. **Rhino 6 for Windows**. [S.l: s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.rhino3d.com/>. Acesso em: 3 ago. 2018.

MENEZES, A. C. et al. Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap. **Applied Energy**, Energy Solutions for a Sustainable World - Proceedings of the Third International Conference on Applied Energy, May 16-18, 2011 - Perugia, Italy. v. 97, p. 355–364, 1 set. 2012.

NREL. **EnergyPlus**. [S.l: s.n.], [s.d.]. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 25 jan. 2019.

PAN, Y.; HUANG, Z.; WU, G. Calibrated building energy simulation and its application in a high-rise commercial building in Shanghai. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 6, p. 651–657, 2007.

RBFOpt Archives. **IBM Code**. [S.l: s.n.]. Disponível em: <https://developer.ibm.com/code/category/rbfopt/>. Acesso em: 6 jul. 2019. , 21 set. 2017

ROUDSARI SADEGHIPOUR, M. M. C. **Ladybug Tools**. Disponível em: <https://www.ladybug.tools/about.html#team>. Acesso em: 3 ago. 2018.

RUTTEN, DAVID, S. **Grasshopper - algorithmic modeling for Rhino**. [S.l: s.n.], 2007. Disponível em: <https://www.grasshopper3d.com/>. Acesso em: 6 ago. 2018.

SINGH, M. K. et al. Thermal monitoring and indoor temperature modeling in vernacular buildings of North-East India. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1610–1618, 1 out. 2010.

WORTMANN, T. **Genetic Evolution vs. Function Approximation: Benchmarking Algorithms for Architectural Design Optimization**. [S.l: s.n.], 2018.

WORTMANN, T.; NANNICINI, G. **Opossum - Surrogate-Based Optimization for Architectural Design**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/project/Opossum-Surrogate-based-Optimization-for-Architectural-Design>. Acesso em: 6 jul. 2019.

ZULUAGA, V. Z.; SALAZAR, J. H. S. Caracterización térmica de edificaciones. **V MACDES**, p. 8, 2018.