

Análisis de comportamiento higro-térmico en edificio diseñado con principios de sostenibilidad y su verificación en software de simulación

Analysis of hydrothermal comfort in a building designed with sustainable strategies and verification in simulation software

Juan David Giraldo Gallego

Filiación: Universidad La Gran Colombia Bogotá

Dirección: Carrera 6 Nª 12B – 40 Bogotá Colombia. CP 111711

Correo: juan.giraldo@ugc.edu.co

Anna Gabriela Ramirez

Filiación: Universidad La Gran Colombia Bogotá

Dirección: Carrera 6 Nª 12B – 40 Bogotá Colombia. CP 111711

Correo: anna.ramirez@ugc.edu.co

Código del manuscrito: 10_001

Fecha de aceptación: 30/08/19

Resumen

La construcción sustentable en Colombia no es ampliamente difundida, la aplicación de estrategias de diseño bioclimático en el medio constructivo es baja a pesar de contar con una normativa de eficiencia energética en edificación obra nueva desde el año 2015. En respuesta a la normativa, han surgido profesionales dedicados a la consultoría bioclimática, y muchos de ellos basan sus recomendaciones únicamente en el software de simulación, aunque en ocasiones los resultados pueden ser errados.

La presente investigación busca aprovechar el prototipo experimental “Domo Sostenible” donado a la Universidad La Gran Colombia (UGC) por la Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL) para, a través de su monitoreo con sensores de temperatura y humedad relativa, verificar la precisión de los softwares de simulación OpenStudio y Design Builder bajo condiciones climáticas de un clima ecuatorial frío.

Para el análisis se instalaron 5 sensores HOBO-U12-012 en el proyecto construido y una estación meteorológica WH1080 en el techo del prototipo, y de esta manera tener datos en tiempo real de las condiciones interiores y exteriores del proyecto. Posteriormente se realizó el modelado del edificio en los dos softwares propuestos y se compararon los resultados obtenidos de las simulaciones respecto a los datos medidos en la realidad y de esta manera establecer los porcentajes de precisión de cada simulación en un clima ecuatorial frío.

Los resultados arrojan una precisión cercana de ± 2 °C en un 60% de los datos medidos, y obteniendo en un 15% de las mediciones una diferencia de menos de 0.3°C, demostrando que la herramienta utilizada presenta gran fidelidad si se manipulan correctamente todas las variables. Este resultado brinda un apoyo al mercado colombiano en la posibilidad de masificar el diseño y construcción sustentable y tener confianza en los resultados térmicos interiores desde la etapa de diseño.

Palabras claves: EnergyPlus, simulación térmica, sensor de temperatura, confort higrotérmico, eficiencia energética.

Abstract

Sustainable construction in Colombia has not spread, the application of bioclimatic design strategies in the construction medium is low despite having an energy efficiency standard in new construction since 2015. In response to the regulations, professionals dedicated to bioclimatic consulting have emerged, and many of them base their recommendations solely on simulation software, although sometimes the results may be wrong.

The present research use the experimental prototype "Sustainable Dome" donated to the University La Gran Colombia by CAMACOL, to monitoring it with temperature and relative humidity sensors, verify the accuracy of OpenStudio and Design Builder.

For the analysis, 5 HOBO-U12-012 sensors were installed in the built project and a WH1080 weather station on the prototype roof, real-time data on the interior and exterior conditions of the project are obtained. Subsequently, the building modelling was performed on the two proposed softwares and the results obtained from the simulations were compared to the real data measured, and the accuracy percentages of each simulation are analyzed in a cold equatorial climate.

The results show an accuracy of 2 °C in 60% of the measured data, and obtaining in 15% of the measurements a difference of less than 0.3°C, demonstrating that the tool used has great fidelity if all variables are correctly manipulated. This result supports the Colombian market in the possibility of massifying sustainable design in construction and having reliability in the interior thermal results since the design stage.

Keywords: EnergyPlus, thermal simulation, temperature sensor, hydrothermal comfort, energy efficiency

Introducción

Los diferentes softwares de simulación energética del mercado permiten a los diseñadores predecir el comportamiento térmico de los edificios que diseñan. Si bien es cierto que los sistemas de simulación energética de edificios permiten analizar la demanda energética de las construcciones, estos deben contar con procedimientos fiables y pertinentes. (García-Alvarado et al, 2014). Los softwares utilizados por los profesionales que realizan consultorías ambientales fueron desarrollados en lugares con climas estacionales, y en su mayoría han sido puestos a prueba en estos mismos climas. No se cuenta con registro de la precisión en la simulación que realizan estos softwares en climas ecuatoriales.

La creciente demanda del mercado colombiano por hacer edificios acordes al clima donde se ubican, ha generado un aumento en los profesionales que hacen consultorías ambientales, muchos de ellos basando sus recomendaciones en un 100% a los resultados arrojados por el software de simulación energética, aunque en ocasiones estos resultados parecen ir en contra de los conceptos básicos de diseño pasivos.

La presente investigación pretende definir los niveles de precisión de los softwares de simulación energética OpenStudio y Design Builder bajo condiciones climáticas de un clima ecuatorial frío, utilizando como caso de estudio el "Domo Sostenible" donado a la Universidad La Gran Colombia (UGC) por la Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL), el cual se encuentra localizado en la sabana de Bogotá, a una altitud de 2650 msnm y una temperatura media anual de 13.5°C.

La calibración del modelo de construcción es una medida de la precisión del modelo, que a pesar del aumento de la sofisticación aún sufre un vasto espacio de parámetros no determinado (Raftery et al, 2011) por lo cual se pretende definir los aspectos fundamentales para la calibración de un modelo en el clima mencionado.

Estado del arte del problema

La comunidad de la simulación ha tratado de combinar, a lo largo de los últimos 30 años, los distintos ámbitos de cálculo para conseguir una mejor representación del comportamiento de los edificios y, por tanto, producir mejores modelos. Las herramientas de simulación han evolucionado hacia un mayor detalle y aplicabilidad. (Godoy-Muñoz, 2015), adicionalmente, para garantizar mayor aplicabilidad de los mismo, se ha generado diferentes interfaces de modelado para un mismo motor de cálculo. Este aumento en la facilidad del modelado puede traer consigo un problema en la precisión de los datos suministrados para la simulación energética de los proyectos, por tanto la fiabilidad de los mismos se ve

Las investigaciones realizadas para verificar la veracidad de los softwares de simulación energética se han concentrado en climas con estaciones claramente marcadas, contando con pocos o inexistentes estudios de la precisión de dichos softwares en climas ecuatoriales, lo que genera que en estos climas se cuente aún con un alto grado de incertidumbre de la precisión de las herramientas utilizadas.

En las investigaciones realizadas en este campo se concluye que las principales causas de los errores de modelos virtuales son las limitaciones de software, los parámetros de entrada y la inexactitud de los datos meteorológicos, combinados con las dificultades para captar cómo se opera exactamente un edificio. (Wang et al, 2012) De igual manera las operaciones varían de acuerdo a los sistemas de simulación y el nivel de detalle puede incidir en la capacidad de análisis de los datos obtenidos.

El proceso de modelado en los diferentes softwares y el ingreso correcto de cada variable es la garantía para un buen resultado en la simulación térmica. Las dos variables más complicadas de simular o calibrar en un software de simulación son las infiltraciones y las propiedades físicas del material de construcción. Ya que las infiltraciones finales en una obra construida pueden llegar a ser en extremo diferentes a las planeadas o cuantificadas en la simulación, y las propiedades del material de construcción se asumen constantes en la mayoría de los modelos analíticos y numéricos propuestos para resolver problemas de balance de humedad y calor (Royapoor et al, 2015) pero en la realidad los materiales pueden tener variaciones en su comportamiento debido a su estructura física final, la cual nunca es uniforme en su totalidad.

Numerosos estudios han encontrado discrepancias entre resultados previstos por el modelo y datos medidos mayores de un 100%. Estas variaciones minan la confianza en las predicciones de los modelos y por tanto su implementación. (Godoy-Muñoz, 2015), de igual manera estos estudios se han realizado en climas con estaciones claramente marcadas, en el clima ecuatorial las afectaciones de las diferentes variables consideradas en una simulación dinámica no han sido estudiadas a detalle, para poder validar los niveles de precisión de los softwares utilizados en los diseños de edificios, por lo cual se cuenta con un alto porcentaje de incertidumbre de si lo proyectado, con apoyo cálculos computacionales, realmente ocurrirá en los resultados finales de las obras arquitectónicas.

Metodología

Domo Sostenible – Proyecto estudiado

Para el desarrollo de la investigación se utilizó el proyecto “Domo Sostenible” extensión del Laboratorio de Bioclimática de la Facultad de Arquitectura de la Universidad La Gran Colombia – Bogotá, el cual funciona como un espacio práctico investigativo “laboratorio experimental y multifuncional” que permite a través de la experiencia vivencial, la construcción de conocimiento que genera avances tecnológicos sobre el medio ambiente y construcción sostenible.

El proyecto Domo Sostenible surge con iniciativa en CAMACOL B&C y sus empresas afiliadas, para la Feria Expoconstrucción y Expodiseño 2017, con intención de dar a conocer avances de construcción sostenible a través de la integración y medición de las estrategias de diseño arquitectónico, el uso de los materiales de acuerdo a su comportamiento físico mecánico, el uso racional y eficiente de la energía y el agua; todo esto en procura de mejorar las condiciones de habitabilidad, el bienestar de la comunidad y reducir el impacto ambiental de las nuevas construcciones.



Figura 1. Fachada principal proyecto “Domo Sostenible” Fuente: Universidad La Gran Colombia 2019.



Figura 2. Fachada occidental (invernadero) proyecto “Domo Sostenible” Fuente: Universidad La Gran Colombia 2019.

Mediciones y monitoreo

Para el monitoreo del prototipo utilizado como caso de estudio se instaló una estación meteorológica WH1080 en el techo del mismo, con la intención de tener datos precisos del comportamiento exterior del edificio.

Tabla 1. Variables medidas por la estación meteorológica WH1080

Variable	Resolución	Rango
Temperatura interior.	0.1 °C	0 °C – 50 °C
Temperatura exterior	0.1 °C	-40 ° C a -65 ° C
Humedad relativa	1%	10 % – 90 %
Precipitaciones	0.1 mm (Si Volumen < 1000 mm) 1 mm (Si Volumen > 1000 mm)	0 – 9999m m
Velocidad del viento		0 – 240 Km/h
Dirección del viento	22.5°	0-360°
Presión atmosférica	0.1 hpa	700 – 1100 hpa

Todas las variables medidas envían datos en tiempo real a la estación de trabajo, y generan un archivo climático con datos cada 10 minutos, los cuales son procesados para generar un archivo climático EPW (EnergyPlus weather), el cual es utilizado en las simulaciones térmicas con los diferentes softwares.

Adicionalmente se instalaron 5 sensores HOBO-U12-012 en los diferentes espacios para tener un monitoreo global del prototipo. En la figura 3 se muestra la ubicación en planta de cada uno de los sensores del proyecto.

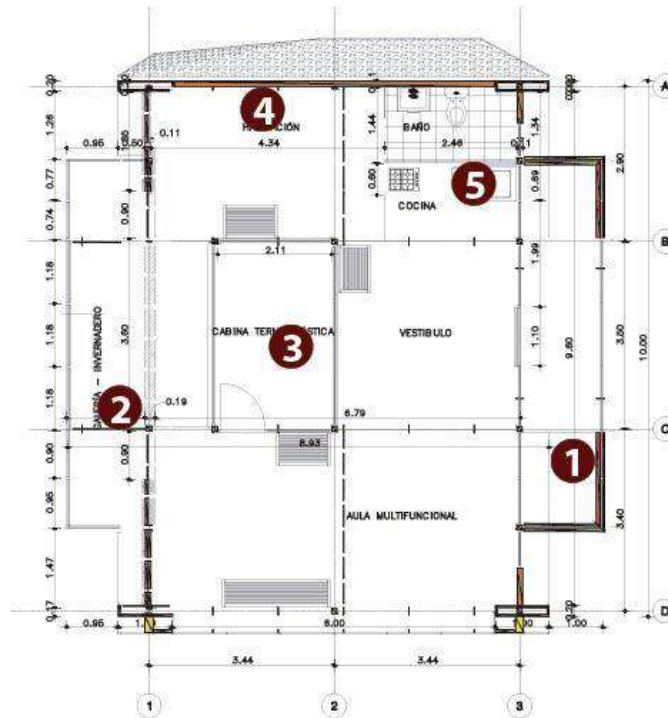


Figura 3. Planta arquitectónica con ubicación de sensores HOBO. Elaboración propia

Simulaciones dinámicas

Parámetros de Simulación

Archivo Climático: de acuerdo a los datos suministrados por la estación meteorológica instalada en la cubierta del prototipo se genera un archivo climático que para el periodo de tiempo comprendido entre el 3 de marzo y el 4 de mayo

Ocupación: ya que actualmente el “Domo sostenible” no cuenta con un horario de ocupación establecido y se ha destinado para las visitas y recorridos de estudiantes e invitados, las cuales se realizan de 1 a 2 veces por semana y en una duración no mayor a 40 minutos, para efectos de la simulación no se tiene en cuenta la ocupación tomando valores de 0 según el caso.

Solución Constructiva: Las características constructivas, de materiales y arquitectónicas utilizadas para las simulaciones se determinan con la información suministrada del edificio, planos arquitectónicos, visitas de campo y fotografías.

Tabla 1. Caracterización arquitectónica Domo Sostenible

Altura promedio	4.5 mts
Superficie útil	80 m ²
Materialidad muro	Estructura metálica, panel de fibrocemento, aislamiento térmico
Materialidad piso	estructura metálica, panel de fibrocemento, aislamiento térmico, piso en vinilo

Materialidad techo	Estructura metálica, vidrio, panel de fibrocemento
Materialidad ventana	Acero, vidrio

Tabla 2. Propiedades físicas materiales Domo Sostenible

	Calor específico J/kg°K	Densidad Kg/m3	Espesor m	Conductividad W/m°K
Muro liviano	830	784.9	0.0127	0.16
Muro Acumulador Mampostería Maciza	837	2243	0.25	1.17296
Puertas Invernadero	1630	608	0.0854	0.15
Rejillas de Ventilación	500	7824	0.008	45.28
Techo sin Aislamiento	830	784.9	0.0127	0.16

Se realizó el modelado del edificio en los diferentes softwares propuestos, y en cada uno de ellos se ingresaron los mismos datos de orientación, materialidad y ventilaciones naturales, las cuales fueron calculadas mediante las fórmulas presentadas por CIBSE AM10 Natural ventilation in non-domestic buildings, para ventilación cruzada se emplea la siguiente ecuación 1:

$$Q\left(\frac{m^3}{h}\right) = \text{Area of the opening} * \text{wind speed} * (\text{seno}(\text{radiananes}(\text{Wind angle of incidence}))) * 3600$$

; donde (Q) es el caudal en m³/h de ventilación

Para ventilación por diferencia térmica o efecto stack se emplea la siguiente ecuación 2:

$$Q\left(\frac{m^3}{s}\right) = \frac{\text{Discharge Coefficient} * (\text{Upper Area} + \text{Lower Area}) * (\text{Upper Area}/\text{Lower Area}) * (2^{0.5})}{(1 + (\text{Upper Area}/\text{Lower Area})) * ((1 + ((\text{Upper Area}/\text{Lower Area})^2))^{0.5})} * (T^\circ \text{ difference in } ^\circ\text{C} * \text{Height difference} / T^\circ \text{ difference in Kelvin})$$

; donde (Q) es el caudal en m³/s de ventilación

La etapa de modelación dinámica, se realiza sin conocimiento de los datos medición en el proyecto real. Cada simulación se complementa de manera independiente y posteriormente se comparan todas las simulaciones con las mediciones realizadas en el prototipo. En esta etapa se analizan las posibles causas de las diferencias encontradas tanto entre las simulaciones como con el edificio construido, para de esta manera definir parámetros a calibrar para lograr mejores resultados.

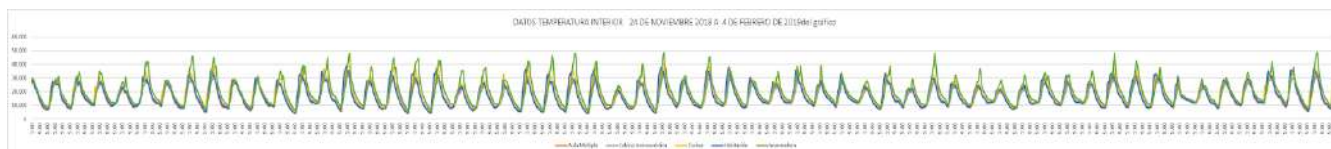
Finalmente se vuelven a comparar los resultados obtenidos para de esta manera determinar los niveles de precisión logrados con cada software en condiciones de clima ecuatorial.

Resultados

Resultados de mediciones y monitoreo Domo Sostenible

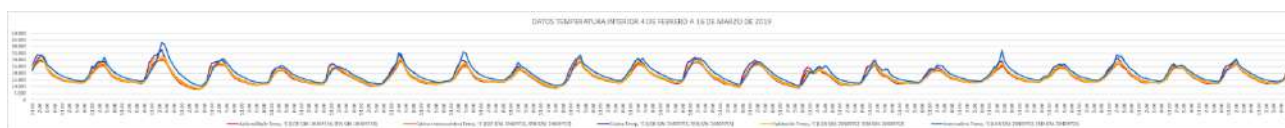
La estación meteorológica instalada monitorea constantemente las condiciones climáticas exteriores del domo, se presentan datos de temperatura, desde el primero de diciembre de 2018 a 30 de junio de 2019.

De acuerdo a los sensores Hobo ubicados en el interior del domo se encuentran datos de temperatura para los 5 espacios



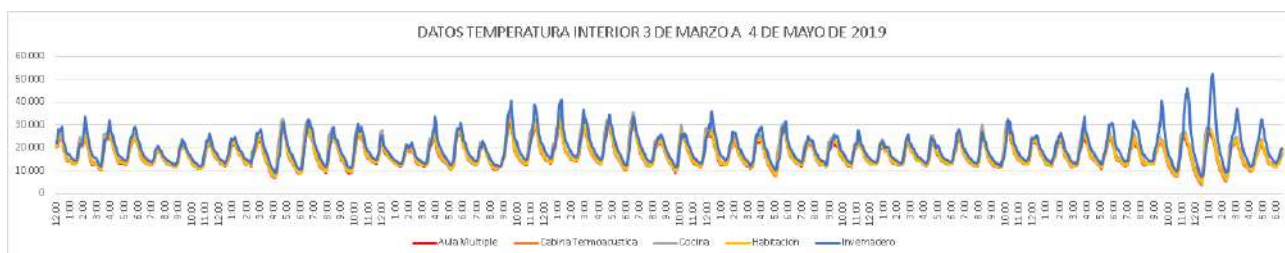
Gráfica 1. Datos de temperatura interior del 24 noviembre al 4 de febrero

Para este rango de tiempo se encontró que la temperatura máxima registrada corresponde al sensor ubicado en el invernadero alcanzando los 48.871°C de temperatura a las 4:00 pm el día 3 de febrero de 2019, respectivamente para los distintos espacios se registraron a la misma hora los siguientes datos: Aula múltiple 29.9°C, Cabina Termoacústica 29.86 °C, Cocina 33.105°C, C, Habitación 32.33 °C



Gráfica 2. Datos de temperatura interior del 4 de febrero a 16 de marzo de 2019.

Para este rango de tiempo se encontró que la temperatura máxima registrada corresponde al sensor ubicado en el invernadero alcanzando los 43.103°C de temperatura a las 3:00 pm el día 25 de febrero de 2019, respectivamente para los distintos espacios se registraron a la misma hora los siguientes datos: Aula múltiple 29.94°C, Cabina Termoacústica 30.87 °C, Cocina 37.56°C, C, Habitación 32.48 °C. Igualmente se registraron las menores temperaturas el 26 de febrero a las 6:00 am, así: Invernadero: 10.51°C, Aula múltiple 7.79°C, Cabina Termoacústica 8.59 °C, Cocina 7.99°C, C, Habitación 8.1°C



Gráfica 3. Datos de temperatura interior del 3 de marzo al 4 de mayo de 2019.

Para este rango de tiempo se encontró que la temperatura máxima registrada corresponde al sensor ubicado en el invernadero alcanzando los 52.45°C de temperatura a las 5:00 pm el día 1 de mayo, respectivamente para los distintos espacios se registraron a la misma hora los siguientes datos: Aula múltiple 24.12°C, Cabina Termoacústica 25.21 °C, Cocina 25.08 °C, Habitación 25.89 °C. Igualmente se registraron las menores temperaturas el 1 de mayo a las 6:00 am, así: Invernadero: 7.59°C, Aula múltiple 3.84°C, Cabina Termoacústica 5.30 °C, Cocina 4.2°C, C, Habitación 4.53°C, siendo estas las menores temperaturas registradas hasta la fecha.

Los datos obtenidos para las 5 zonas, muestran una oscilación térmica, que para el caso del invernadero alcanza los 44.86°C de diferencial de temperatura, en términos generales se puede inferir que la materialidad de la envolvente y los mecanismos de ventilación, sumado a las infiltraciones de las fachadas vidriadas, contribuyen al cambio drástico de temperatura la cual, se eleva en las horas del día y baja en la noche

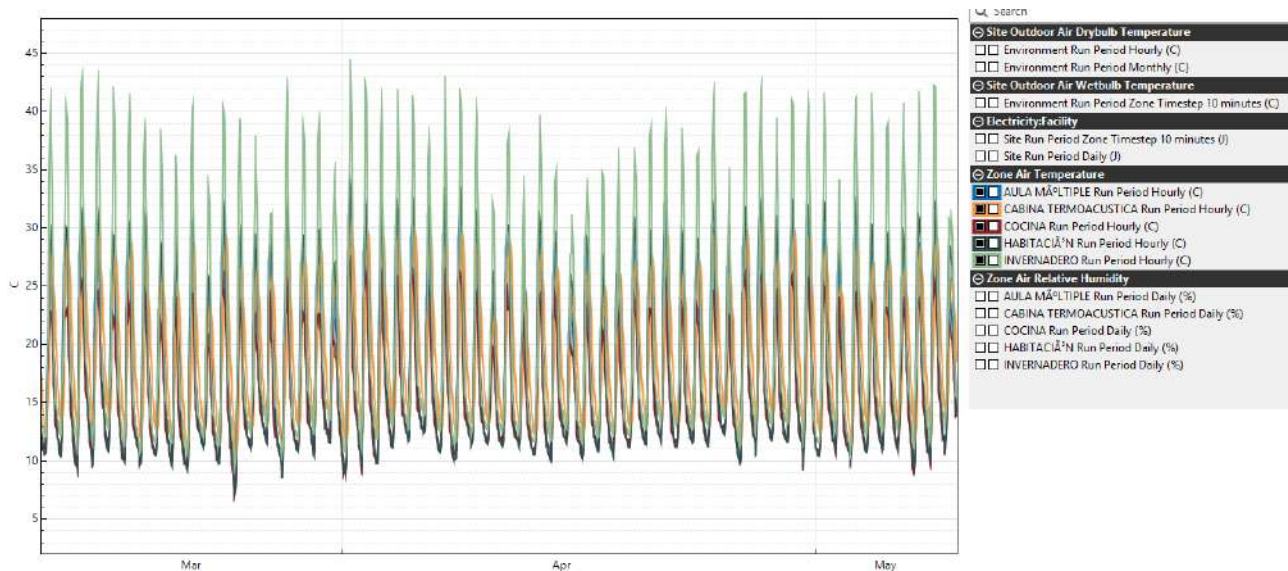
Contar con un proyecto con tanta variación de temperatura interior debido a tan amplia gama de variables, se considera un gran caso de estudio para poder determinar la fidelidad de los diferentes softwares de simulación térmica.

Resultados de simulaciones dinámicas

Para realizar las simulaciones dinámicas se utilizó la plataforma OpenStudio, que trabaja con el motor de cálculo EnergyPlus, el cual realiza la evaluación hora a hora de los 365 días del año.

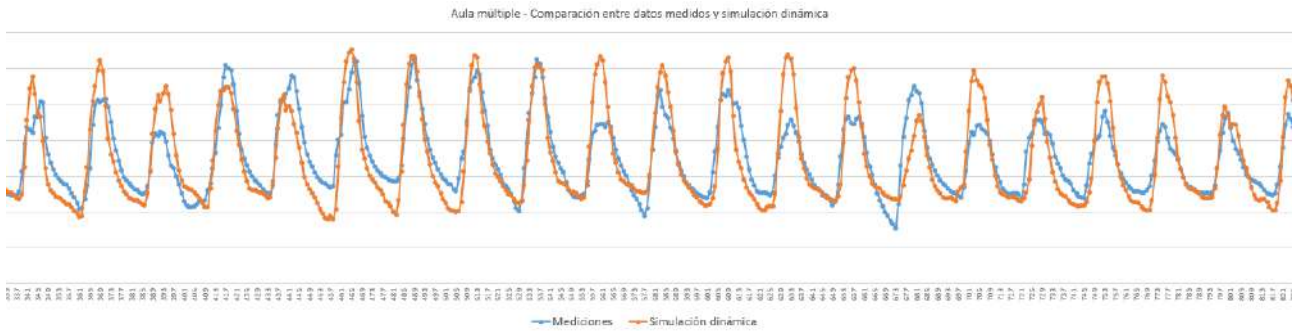
Para el análisis de los resultados se evalúa uno de los periodos medidos y presentados anteriormente.

En la gráfica 4 se pueden apreciar los resultados de todas las zonas simuladas, sin procesar ni tabular los datos obtenidos.

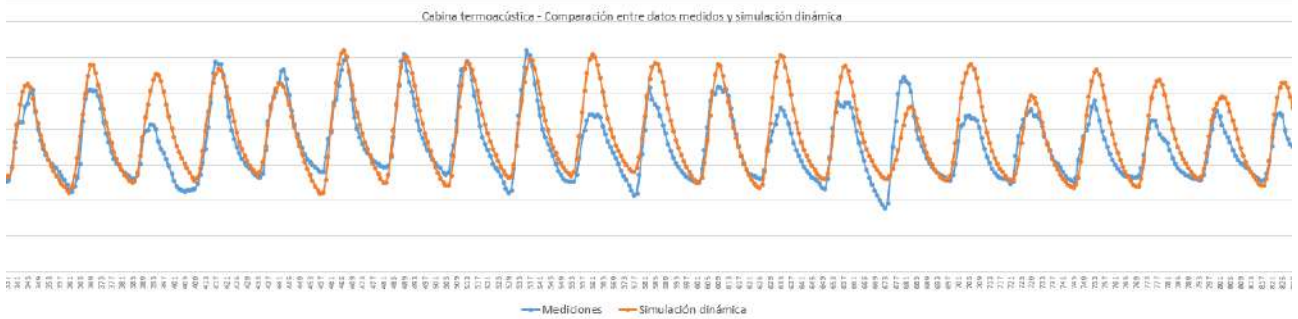


Gráfica 4. Resultados simulación dinámica con OpenStudio-EnergyPlus

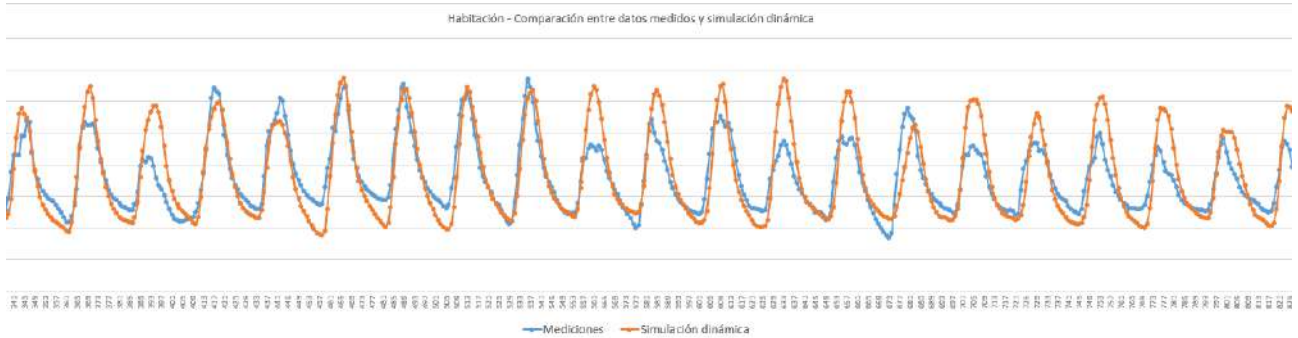
Posteriormente se realiza un comparativo entre los datos medidos y los simulados, estos datos son el resultado de un trabajo de modelado realizado a partir de la información de planimetría, fotos y datos técnicos enviados.



Gráfica 5. Aula múltiple – Comparativo entre datos medidos y simulación dinámica OpenStudio

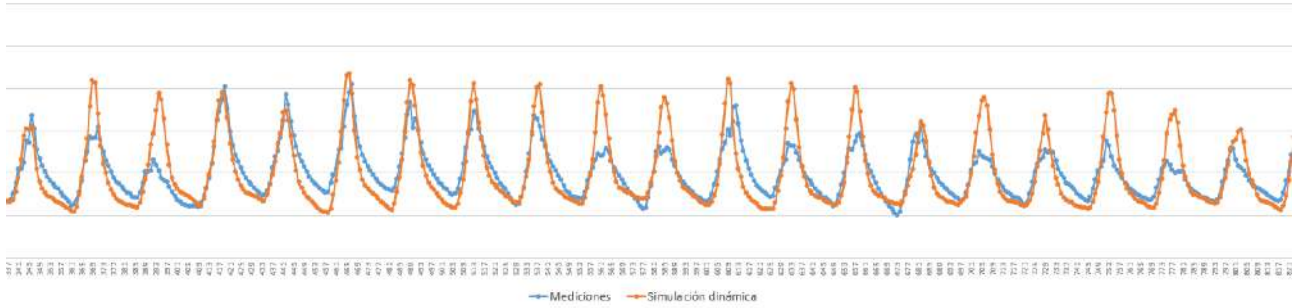


Gráfica 6. Cabina termoacústica – Comparativo entre datos medidos y simulación dinámica OpenStudio



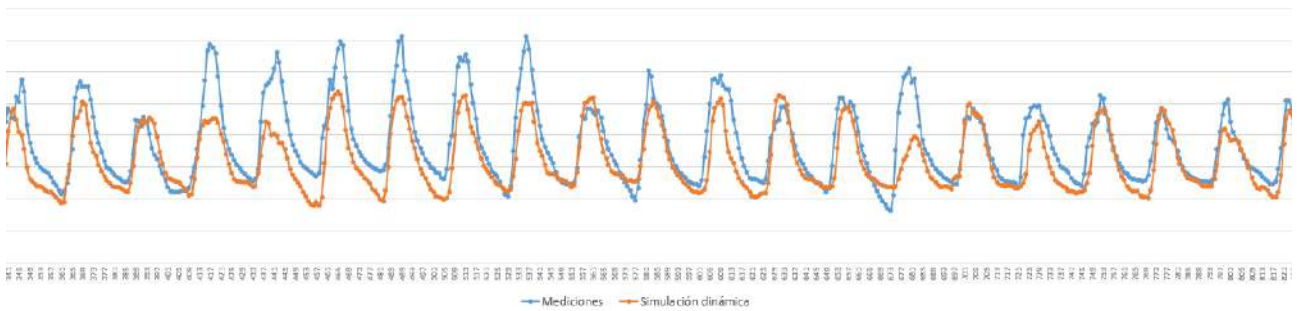
Gráfica 7. Habitación – Comparativo entre datos medidos y simulación dinámica OpenStudio

Invernadero - Comparación entre datos medidos y simulación dinámica



Gráfica 8. Invernadero – Comparativo entre datos medidos y simulación dinámica OpenStudio

Cocina - Comparación entre datos medidos y simulación dinámica

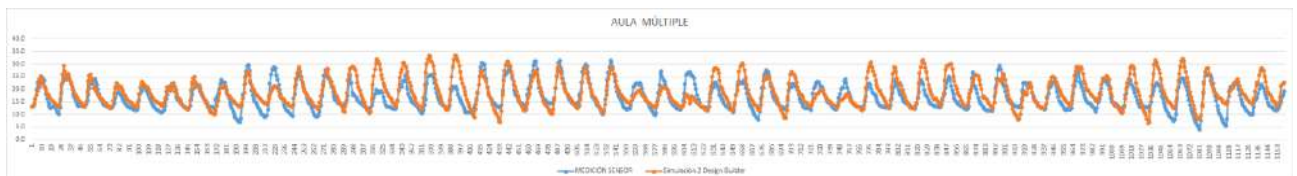


Gráfica 9. Cocina – Comparativo entre datos medidos y simulación dinámica OpenStudio

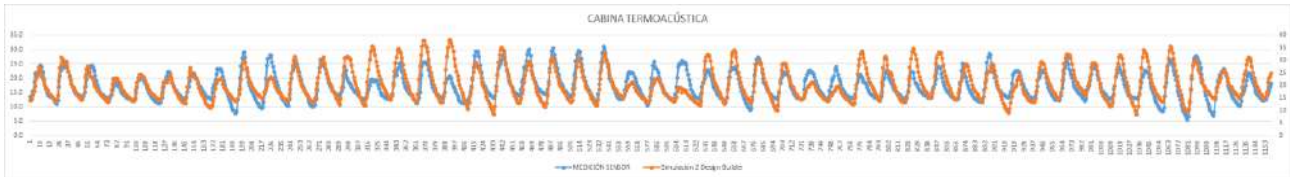
Los resultados observados mediante la simulación en el software Open Studio y su comparación con los datos de medición registrados por los sensores de temperatura muestran un comportamiento de la simulación muy cercano a los datos medidos, demostrando en una primera instancia el alto nivel de precisión que ofrece el software Open Studio.

En los momentos donde es evidente el desfase entre mediciones y simulación empieza a jugar un papel determinante la calidad del archivo climático con el que se cuenta, ya que para la simulación se tomó de base el archivo climático EPW suministrado en la página web del software EnergyPlus, con una modificación de los datos con los que se contaba de acuerdo a la estación meteorológica del proyecto Domo Sostenible.

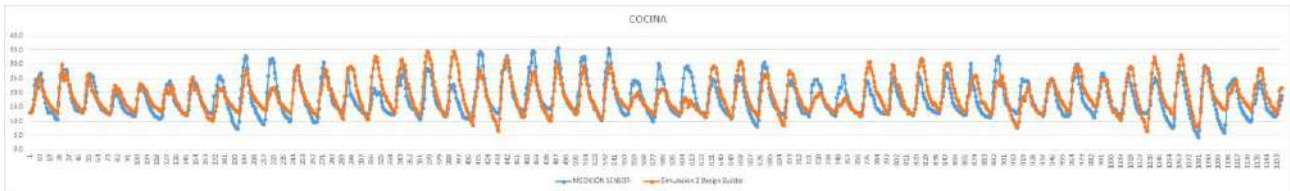
Al no contar con piranómetro en el proyecto es evidente que los días nublados y soleados no corresponden, en lo ocurrido en el periodo monitoreado, con los datos del archivo climático, lo que genera un claro desfase en las horas de mayor incidencia solar, ya sea porque el archivo climático presenta altos niveles de radiación y en los días medidos no fue así, o viceversa.



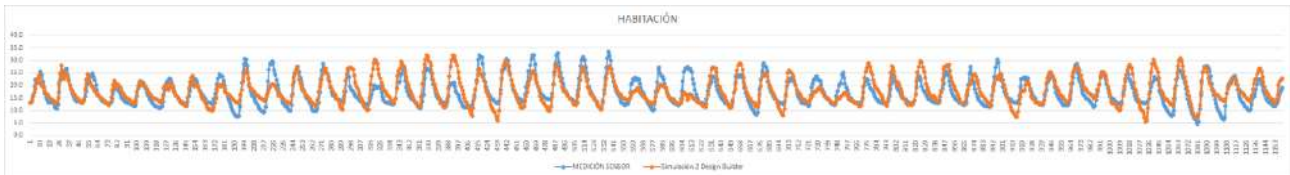
Gráfica 10. Aula Múltiple – Comparativo entre datos medidos y simulación dinámica Design Builder



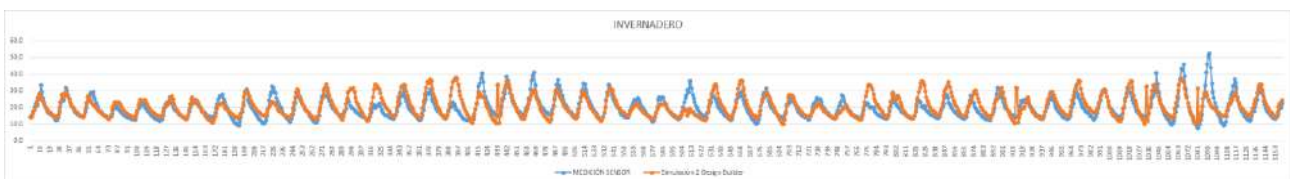
Gráfica 11. Cabina Termoacústica – Comparativo entre datos medidos y simulación dinámica Design Builder



Gráfica 12. Cocina – Comparativo entre datos medidos y simulación dinámica Design Builder



Gráfica 13. Habitación – Comparativo entre datos medidos y simulación dinámica Design Builder



Gráfica 14. Invernadero – Comparativo entre datos medidos y simulación dinámica Design Builder

Discusión y Conclusiones

Los resultados de la presente investigación revelan la fidelidad de los diferentes softwares de simulación térmica en condiciones de clima ecuatorial. Demostrando las bondades que ofrecen en la etapa de proyección arquitectónica, en pro de garantizar las mejores condiciones de habitabilidad interior.

En el proceso de trabajo se confirmó lo sensibles que pueden llegar a ser estos programas sobre todo con las variables de ventilación e infiltración, las cuales determinan en gran medida el rango de oscilación térmica interior.

En el desarrollo del proyecto se apreció un alto grado de precisión de los softwares de simulación térmica en las condiciones de clima ecuatorial frío. Los desfases evaluados entre los datos medidos y los simulados se deben a no contar con un archivo climático preciso, modificado de acuerdo a los datos reales registrados, el mismo que se seguirá alimentando con datos de radiación, ya que no se contaba con un piranómetro en la estación meteorológica, para esto y un mejor desarrollo de la investigación, se instaló un piranómetro en el techo del proyecto el día 26 de Junio de 2019, por lo cual se considera que se tendrán datos más precisos en la siguiente etapa de la investigación, donde se evaluarán específicamente los meses de julio y agosto, y se presentará un informe en el mes de septiembre.

Dado que el “domo sostenible” considera características de diseño bioclimático, y presenta distintas alternativas de ventilación manual de acuerdo a los requerimientos de ocupación, constituyendo además en una edificación usada

por la Facultad de Arquitectura de la Universidad La Gran Colombia, en la que los estudiantes experimentan y evalúan distintas alternativas de mejoramiento y se encuentra en constante evolución, se espera que posteriormente las variables de evaluación cambien, cambiando además los resultados de la simulación térmica.

El primer resultado de la investigación brinda un panorama optimista para el uso de los softwares de simulación en los proyectos desarrollados en el clima ecuatorial, ya que aún con las limitantes encontradas con el archivo climático, se obtuvo una precisión cercana de ± 2 °C en un 60% de los datos medidos, y obteniendo un 15% de las mediciones una diferencia de menos de 0.3°C, para la simulación realizada en Open Studio.

Por su parte las simulaciones realizadas en el software Design Builder, bajo los mismos parámetros de materialidad, dimensiones, archivo climático y orientación, obtuvieron una precisión de ± 2 °C en el 41% de los datos medidos, se obtiene un 6.93% de mediciones con una diferencia de menos de 0.3°C.

Las simulaciones realizadas en los dos softwares muestran que pese a tener el mismo motor de cálculo energético y las variables de materialidad constructiva, dimensionamiento y orientación, así como el archivo climático son iguales, la diferencia en los parámetros de configuración de la simulación y la sensibilidad en el modelado en las dos herramientas presenta una importante variación en los datos obtenidos, sin embargo si se comparan con los datos reales registrados en los sensores ubicados en el “Domo Sostenible” la fluctuación de temperatura y el desfase máximo para las mediciones presenta resultados confiables que corroboran el comportamiento térmico actual del edificio.

Se considera que con la posterior actualización de los datos climáticos suministrados por la estación meteorológica donde se incluyan datos de radiación solar, las simulaciones presenten menor variación con respecto a los datos reales. El “Domo sostenible” se encuentra en constante modificación en cuanto a sus parámetros de ventilación natural por lo tanto estas mismas variaciones serán objeto de estudio, así como las modificaciones que en el periodo académico 2019-2 tengan lugar dando continuidad a las funciones del Laboratorio de Bioclimática de la Universidad La Gran Colombia

Agradecimientos

Universidad La Gran Colombia – Bogotá. Facultad de Arquitectura - Laboratorio de Bioclimática.

Referencias

- CIBSE. (2007). CIBSE AM10 Natural ventilation in non-domestic buildings. (K. Butcher, Ed.) London: CIBSE Publications. Retrieved 11 29, 2014, from CIBSE: <http://www.cibse.org/knowledge/cibse-am/am10-natural-ventilation-in-non-domesticbuildings>
- Firląg, S., & Zawada, B. (2013). Impacts of airflows, internal heat and moisture gains on accuracy of modeling energy consumption and indoor parameters in passive building. *Energy and Buildings*, 64, 372-383.
- García-Alvarado, R., González, A., Bustamante, W., Bobadilla, A., & Muñoz, C. (2014). Características relevantes de la simulación energética de viviendas unifamiliares. *Informes de la Construcción*, 66(533), 005.
- Godoy-Muñoz, Alfonso. (2015). Validación y calibración de la simulación energética de edificios La importancia del análisis de sensibilidad e incertidumbre. Tesis de Doctorado en Sostenibilidad, UPC.
- Raftery, P., Keane, M., & O'Donnell, J. (2011). Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. *Energy and Buildings*, 43(9), 2356-2364.
- Royapoor, M., & Roskilly, T. (2015). Building model calibration using energy and environmental data. *Energy and Buildings*, 94, 109-120.
- Wang, L., Mathew, P., & Pang, X. (2012). Uncertainties in energy consumption introduced by building operations and weather for a medium-size office building. *Energy and Buildings*, 53, 152-158.