



Universidad de Cuenca

Facultad de Arquitectura y Urbanismo

Maestría en Construcciones

Análisis comparativo entre simulador ambiental en BIM Ecodesigner y DesignBuilder, comparando resultados obtenidos entre ellos, en parámetros de temperatura interior detectados y estos frente a la realidad

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Magister en
Construcciones

Autor:

Giselle Betzabe Sánchez Salazar

Director:

Esteban Felipe Zalamea León

ORCID:  0000-0001-5551-5026

Cuenca, Ecuador

2024-11-11

Resumen

La importancia de reducir el consumo de energía en edificios ha llevado al uso de softwares que pueden predecir el comportamiento térmico de un edificio al ingresar los datos de ubicación y construcción, sin embargo, estos softwares han mostrado una discrepancia en los resultados en comparación con los datos térmicos medidos in situ, dato que no ha sido vastamente estudiado en climas cercanos a la línea ecuatorial; Por lo tanto, para investigar esta diferencia y la configuración que pueda emitir los resultados más cercanos a la realidad, se toma el modelado BIM de tres edificios de aulas de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Cuenca, en los softwares DesignBuilder y ArchiCAD, se ingresan configuraciones equivalentes y la simulación de temperatura y humedad se compara con los datos medidos en las aulas. El análisis de estos resultados, permite detectar la fiabilidad de los softwares en igualdad de circunstancias en la zona climática de Cuenca, Ecuador, para ello, se toman medidas internas con sensores de temperatura, humedad y CO_2 , así como mediciones externas con una estación meteorológica. La comparación con la simulación nos permite generar una tabla de comparación y promediar un resultado que puede ser utilizado como factor de corrección, para el caso de DesignBuilder se obtuvo un $\pm 0.81^\circ C$ y 5% de error absoluto promedio (MAE) entre la temperatura y humedad medida y un $\pm 0.91^\circ C$ y 6.09% de diferencia en las simulaciones de temperatura y humedad con el plug-in Ecodesigner STAR de ArchiCAD, datos obtenidos tras una calibración que ubica a los edificios de ladrillo visto (E1 y E2) con una ventilación de 20ACH, 30ACH y 40ACH y al edificio de bloque con aislamiento (E3), una ventilación de 15ACH con sus respectivos horarios de ocupación y ventilación. Esta investigación ayuda a identificar los parámetros y variables que inciden en las simulaciones térmicas proporcionando de un análisis del uso de los simuladores, flujos de trabajo y de resultados con una visión comparativa, los valores obtenidos como error absoluto promedio puede ser utilizado como un factor de corrección.

Palabras clave del autor: sustentabilidad, temperatura, simuladores térmicos, confort térmico



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

The importance of reducing energy consumption in buildings has led to the use of software that can predict the thermal performance of a building by entering the location and construction data, nevertheless, this type of software has shown a discrepancy in the results compared to in situ measured thermal data, and this issue has not been sufficiently studied in climates close to the equator line, to investigate this difference and the configuration that can produce the most precise results, three classrooms buildings from the faculty of architecture of the university of Cuenca that are modeled in Design Builder and ArchiCAD are taken to simulate thermal comfort parameters, the same configuration is introduced in both software and the simulation of temperature and humidity were compared with the measured data. Analyzing the results allows us to determine the precision of the two software been placed in the same circumstances at the climate zone of Cuenca, Ecuador, for that, interior measurements are taken with temperature, humidity and CO_2 sensors, as well as exterior measurements using a weather station. The simulations' results provided a comparison table where the average result can be used as a correction factor, for Design Builder's case a $\pm 0.81^\circ C$ and 5% of mean absolute difference (MAE) was obtained for the temperature and humidity simulated and a $\pm 0.91^\circ C$ and 6.09% of difference for the temperature and humidity simulated in Ecodesigner STAR plug-in from ArchiCAD, this data is obtained after calibration which placed the ventilation for the brick buildings (E1 and E2) in 20ACH, 30ACH and 40ACH, and the insulated concrete block building (E3) a ventilation of 15 ACH within their respective occupancy and ventilation schedule. This research helps identify the parameters and variables that affect the thermal simulation results providing an analysis of the simulation software use, workflow and the results with a comparative vision, finally, the values obtained as a mean absolute error can be used as a correction.

Author Keywords: Sustainability, energy efficiency, thermal simulators, thermal comfort



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

CAPÍTULO 1	9
Introducción	9
CAPÍTULO 2	133
Metodología.....	13
2.1 Modelado.....	14
2.2 Configuración del bloque térmico	16
2.3 Selección de fechas a simular	27
2.4 Exportación de datos.....	28
CAPÍTULO 3	31
3.1 Comparación del cumplimiento de la normativa actual con respecto a las envolventes.....	31
3.2 Calibración	34
3.3 Resultados	37
CAPÍTULO 4	48
4.1 Conclusiones.....	48
4.2 Recomendaciones.....	49
Referencias Bibliográficas.....	51
Anexos.....	54

Índice de figuras

Imagen 1. Algoritmo de comparación y calibración.

Imagen 2. Configuración de ventilación natural en Ecodesigner.

Imagen 3. Configuración de infiltración en DesignBuilder.

Imagen 4. Software de conversión de archivos epw.

Imagen 5. Estación meteorológica WS-GP2 Advanced Automatic Weather Station System.

Imagen 6. Medidas de temperatura exterior durante un año y rango de medidas interiores.

Imagen 7. Pantalla de exportación de datos de simulación en Ecodesigner STAR.

Imagen 8. Pantalla de opciones exportación de datos de simulación en .xls en Ecodesigner STAR.

Imagen 9. Gráficas obtenidas del aula E1 -105 previo a la calibración.

Imagen 10. Gráficas de temperatura y humedad obtenida del aula E1 -105.

Imagen 11. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E1 011.

Imagen 12. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E1 108.

Imagen 13. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E2 003.

Imagen 14. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E2 102.

Imagen 15. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E2 203.

Imagen 16. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E3 -102.

Imagen 17. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E3 101.

Imagen 18. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E3 302.

Índice de tablas

Tabla 1. Geometrías de aulas de bloque E1 en software.

Tabla 2. Geometrías de aulas de bloque E3 en software.

Tabla 3. Geometrías de aulas de bloque E3 en software.

Tabla 4. Elementos constructivos de envolvente.

Tabla 5. Elementos divisorios (particiones).

Tabla 6. Elementos bajo el nivel del suelo.

Tabla 7. Transmitancia térmica de aberturas.

Tabla 8. Requisitos de envolvente para la zona climática 3 de la norma NEC.

Tabla 9. Revisión de cumplimiento de la transmitancia térmica de elementos de envolvente.

Tabla 10. Revisión de cumplimiento de la transmitancia térmica de elementos de envolvente en subterráneo.

Tabla 11. Temperatura promedio diaria de las nueve aulas.

Tabla 12. Resumen de tablas comparativas con resultados previos a la calibración.

Tabla 13. Horarios de ocupación de las aulas.

Tabla 14. Horarios de ventilación de las aulas.

Tabla 15. Resumen de tablas comparativas con resultados después de la calibración.

Agradecimiento

Durante el desarrollo de esta investigación he recibido el valioso apoyo del Arq. Esteban Zalamea, Ing. Mateo Astudillo y de los compañeros que realizaron las investigaciones que precedieron a la presente Fredy Ortega y Jessica Paltán, a todos quienes agradezco por abrir el camino y guiar esta investigación, así también agradezco a la Facultad de Arquitectura y Urbanismo y a la Universidad de Cuenca por ser la sede del conocimiento adquirido y a los profesores que la conforman quienes imparten sus conocimientos y experiencias con generosidad y empatía.

Dedicatoria

Dedico esta investigación a mi familia cuya inspiración desde la infancia ha sido crucial para mantener la pasión por el estudio y el trabajo además del apoyo que me han ofrecido durante mis estudios y a Edison mi compañero de vida quien ha estado a mi lado a lo largo de mis estudios apoyándome incondicionalmente.

CAPÍTULO 1

Introducción

En busca de reducir el impacto medioambiental de las edificaciones, durante el proceso de diseño arquitectónico se simulan ambientes interiores por medio del uso de softwares, ya que el potencial de ahorro de energía en edificaciones es de un 10% y en climas cálidos de hasta 40%(Ramos Ruiz & Fernández Bandera, 2017) sin embargo, se ha evidenciado la discrepancia existente entre el modelo construido y las simulaciones (Marshall et al., 2017) las cuales pueden presentar una divergencia en las predicciones de hasta 26% en simulación energética (Chong et al., 2021).

Los softwares de simulación utilizan un motor de cálculo, DesignBuilder utiliza “Energy-plus”(DesignBuilder Software, 2009) el cual es utilizado por el 60% de los artículos estudiados en la revisión bibliográfica de Chong et al., (2021) ya que está integrado en diferentes softwares como: OpenStudio, Ecotec y Ladybug&Honeybee, es considerado dentro de los simuladores más completos(Sousa, 2012); Ecodesigner utiliza “VIPcore” de Strusoft(Csikos, 2020), este motor usa modelos dinámicos dentro del programa de modelado ArchiCAD.

En general estas simulaciones han sido estudiadas con varios objetivos, en su mayoría midiendo los resultados de consumo de energía del edificio (Huerto-Cardenas et al., 2020) y centran los esfuerzos en proyectar modificaciones para reducirlo ya que se realizan en ambientes distantes a la línea ecuatorial según (Chong et al., 2021), ya que en su revisión bibliográfica indica que solo un 4% de los artículos sobre calibración en simulaciones energéticas se realizaron en clima ecuatorial, por lo que, teniendo en cuenta que las variaciones dependen de su latitud y altitud entre otros factores (Tronchin & Fabbri, 2008) se debe estudiar el piso climático en específico, en este caso de la ciudad de Cuenca.

En climas andinos, el objetivo al utilizar estos softwares varía ya que, al tener una temperatura relativamente estable ligeramente por debajo del rango de confort, la mayoría de las edificaciones no cuentan con sistemas acondicionamiento ambiental mecánico (HVAC) por lo tanto no se busca tanto reducir el consumo energético que ya es mínimo sino asegurar que los espacios interiores se encuentren dentro del rango de confort térmico, para este clima existen diferentes rangos de confort emitidos por normativas nacionales e internacionales, sin embargo, con datos locales, (Quesada Molina & Bustillos Yaguana, 2018) presenta que el

90% de la población en Cuenca se siente en confort entre 17.62°C y 22.62°C y dentro de un rango de humedad relativa de entre 40% y 65%.

El clima en el Ecuador es estable a lo largo del año y según el piso térmico las normativas nacionales regulan el aislamiento térmico mínimo y presentan tablas con los valores de transmisión térmica para las envolventes de las edificaciones, se puede considerar un primer paso en el diagnóstico del comportamiento térmico de una edificación corroborar su cumplimiento de normativa.

Cuando se utilizan modelos computacionales de simulación en arquitectura es común que se consideren ciertas incertidumbres que pueden ocasionar diferentes porcentajes de discrepancia que varían de drásticamente según el parámetro comparado y la métrica utilizada, por ello la calibración y validación de los modelos se ha realizado en su gran mayoría en búsqueda de validar un modelo (Coakley et al., 2014), y parten de tener datos reales con los que contrastarlos, en su revisión bibliográfica Chong et al., (2021) enlista diez métricas con sus ecuaciones correspondientes, entre las más usadas se encuentran:

- Coeficiente de variación de la raíz cuadrada promedio (CVRMSE),
- Error con sesgo promedio normalizado (NMBE),
- Error promedio (%error),
- Error absoluto promedio (MAE).

La (ASHRAE, 2002) en su guía especifica las ecuaciones de los umbrales de validación de dos métricas para el parámetro de consumo energético (NMBE y CVRMSE), sin embargo (Huerto-Cardenas et al., 2020) y (Chong et al., 2021) describen y enlistan los umbrales de validación de varias guías y según la frecuencia de toma y comparación de datos, como resultado establecen un umbral permitido de $\leq 1^{\circ}\text{C}$ y $\leq 5\%$ para un modelo de alta precisión y de $\leq 2^{\circ}\text{C}$ y $\leq 10\%$ para modelos de menor precisión, recordando que esta elección se deberá considerar según el objetivo de la simulación.

Al comparar consumo energético (Serag et al., 2024) demuestra un porcentaje de error de +3.51% y -9.84% del promedio anual en los softwares DesingBuilder y Ladybug&Honeybee respectivamente; utilizando DesignBuilder Jain et al., (2021), en consumo de energía eléctrica presenta una discrepancia de -3.7% NMBE y -3.3% NMBE en consumo de gas, este estudio de forma paralela también obtiene el porcentaje de error con el cálculo CVRMSE, y compara

que en ambos casos sus modelos tienen un error dentro del umbral definido por la (ASHRAE, 2002).

En el trabajo de comparación de resultados entre Design Builder y LegacyOpenstudio, plug in para SketchUp con motor de simulación de Energy plus, Villalba Lozano & Ortiz Morales, (2016), demuestran una comparación entre temperatura del aire y humedad entre otros parámetros, de ellos obtiene una tabla los porcentajes de error promedio del día medido, el estudio compara varios parámetros, entre ellos temperatura donde se obtiene en DesignBuilder porcentajes de error de entre 0.62% y 11.23% y en LegacyOpenstudio entre 0.91% y 9.34% y en humedad relativa obtiene porcentajes de error entre 1.95% y 14.82% y en LegacyOpenstudio entre 1.01% y 13.22%, identificando y analizando cada dato junto con sus implicaciones al confort térmico y consumo energético de forma independiente sin documentar promedios generales; en otro estudio Abba et al., (2022) utilizando DesignBuilder expone que con la simulación de temperatura de una misma aula en dos días distintos obtiene el 2.39% y 1.25% de porcentaje de error, en este estudio se toman y grafican los datos correspondientes a 6 horas en el día, sin embargo, el porcentaje se obtiene a partir de la diferencia de la temperatura promedio del día y no de cada hora.

En el caso de estudio de Yu et al., (2019), en Hong Kong, se describe un incremento de la precisión del modelo de 14% después de la calibración para el área de todo el edificio y en un 16% para el área total residencial, utilizando DesignBuilder; dentro de los parámetros estudiados el consumo de energía anual baja su porcentaje de error de 13.89% a 0.01%, sin embargo, es importante destacar que este valor no se considera absoluto ya que se obtiene de la suma del consumo energético eléctrico y de gas en los cuales individualmente tiene un mayor porcentaje de error y se reduce al sumarlos, estos diferentes resultados en cada caso nos demuestra que la forma en la que se analicen los datos influye en gran medida en lo que se obtenga como resultado por eso se ve la necesidad de expresar los datos acompañados de su parámetro, métrica y frecuencia de comparación de datos.

Este trabajo se enmarca dentro de la investigación “Modelado y mediciones de condiciones ambientales interiores e integración de energía solar, para alcanzar el Estándar Net-Zero en Edificaciones FAUC” y es precedido por dos proyectos de simulación térmica desarrollados en DesingBuilder(Paltán-Cuenca et al., 2023) y Ecodesigner Star(Ortega & Vintimilla, 2023) por lo que el presente estudio busca partir de estos modelados y comparar los resultados de

los dos softwares en un rango más amplio de espacios e identificar la calibración que lleva a los mejores resultados en ambos software.

Con esta investigación se espera obtener una tabla comparativa donde se identifique la diferencia existente entre las simulaciones y las mediciones reales de temperatura del aire interior y humedad relativa, en dos simuladores de ambiente interno, tras un proceso de calibración que permita reducir esta diferencia y a su vez contar con un modelo validado donde se puedan realizar propuestas que acerquen al clima interior a los rangos de confort, así mismo se busca ser punto de partida para edificaciones nuevas que utilicen el mismo sistema constructivo en la zona climática 3, comprendiendo el rango de discrepancia y pudiendo ser utilizado como factor de corrección en el sentido más desfavorable, en este caso para esta zona climática el factor debe restar temperatura e incrementar humedad a los resultados simulados, para promover las estrategias que incrementen estos parámetros.

Para cumplir con los objetivos de esta investigación, en el segundo capítulo se desarrolla una metodología donde se indican los parámetros del modelado, bloque térmico y el proceso de selección de las fechas a simular de manera que al obtener los resultados puedan ser comparados en el tercer capítulo con los rangos de confort locales y el cumplimiento de normativa nacional, finalmente luego de un proceso de calibración se analizan los resultados en una tabla comparativa de los valores de diferencia absoluta diarios de cada aula y se promedian los resultados como validación del modelo completo.

CAPÍTULO 2

Metodología

Para esta investigación se toman los modelos 3D de los edificios de la facultad de arquitectura, modelado en DesignBuilder y ArchiCAD para simular en Ecodesigner Star y se comparan los resultados con mediciones reales tomados en nueve aulas, en diferentes edificios y niveles, dentro de las últimas actualizaciones de ArchiCad, cabe recalcar que ArchiCad incluye automáticamente el plug-in “Evaluación energética” y no provee la misma cantidad de información que el plug-in completo Ecodesigner Star (Csikos, 2023) por lo que se resalta la utilización de este último para la presente investigación.

Para edificios sin HVAC (Huerto-Cardenas et al., 2020) propone dentro de varios parámetros de validación, la temperatura del aire y humedad relativa, dentro de los índices recomendados para validar estos parámetros entre otros está el “promedio de error absoluto” (MAE) por sus siglas en inglés, por lo tanto, se usará esta métrica para este estudio.

La cercanía de los resultados simulados con la realidad depende ampliamente del modelado, la guía Guideline14 ASHRAE, (2002) establece para la medición de la reducción en el consumo energético determinar las tres principales incertidumbres: incertidumbre en la toma de datos, incertidumbre de calibración de equipos de medición e incertidumbre de calibración de modelo, de manera que con este estudio se busca determinar la discrepancia con la cual se trabajaría con los modelos calibrados en cada software, se establecen pasos siguiendo un algoritmo coordinando entre las dos interfases de manera que sean equivalentes, partiendo de las recomendaciones de los manuales de ambos softwares.

Los parámetros medidos con los sensores disponibles en la facultad son de humedad relativa, temperatura y CO_2 y se han medido cada hora, de manera que partiendo de que contamos con estos datos y en los softwares se puede obtener en los resultados de la simulación temperatura del aire interno y humedad relativa se compararán estos dos datos en frecuencia horaria.

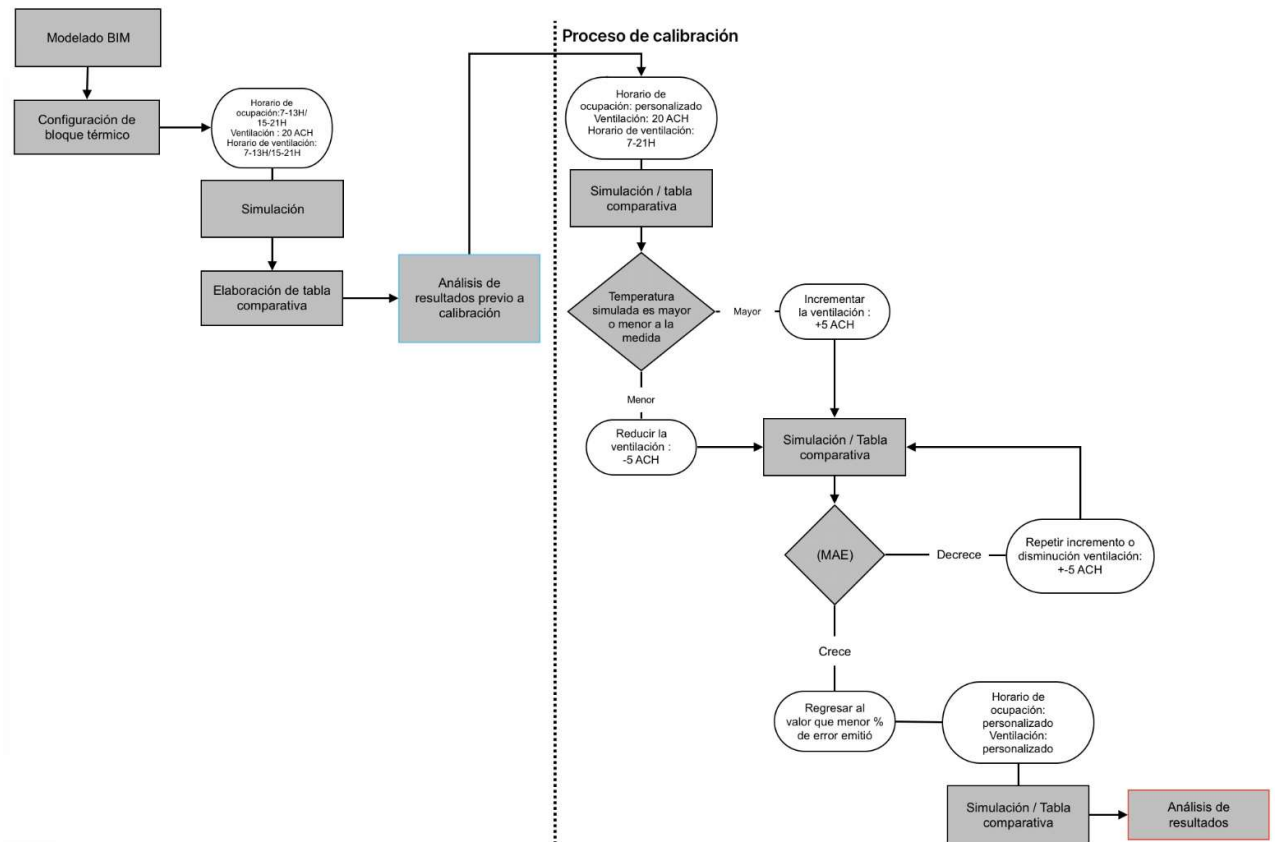


Imagen 1. Algoritmo de comparación y calibración.

2.1 Modelado

Con el objetivo de obtener resultados fehacientes se parte de modelados 3D de los edificios en ArchiCAD y DesingBuilder, donde se encuentran las nueve aulas a simular y se procede a igualar las dimensiones en planta y en vanos de puertas y ventanas.

Para ampliar el espectro de resultados, se escoge un aula en diferente nivel en tres niveles, y en los tres edificios que conforman la facultad, de las cuales se hayan tomado los datos dentro de un mismo rango de tiempo, los edificios han sido codificados como E1, E2 Y E3, y las aulas a estudiar son E1 -105, E1 011, E1 108; E2 003, E2 102, E2 203; E3 -002, E3 101, E3 302.

Tabla 1. Geometrías de aulas de bloque E1 en software.

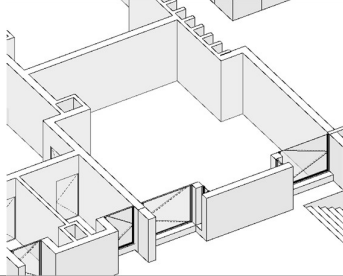
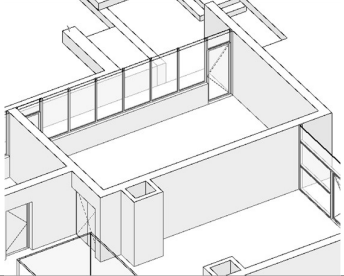
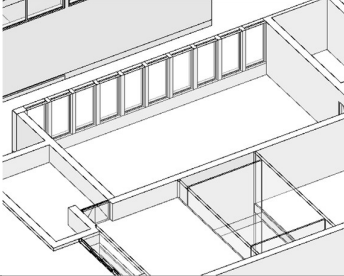
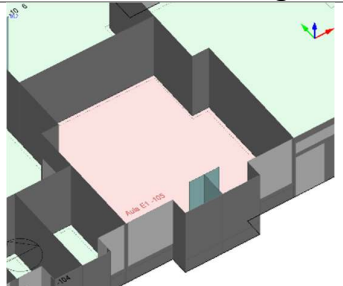
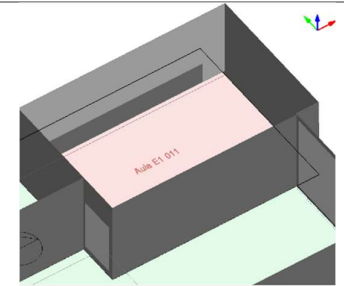
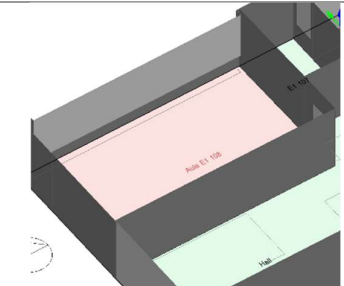
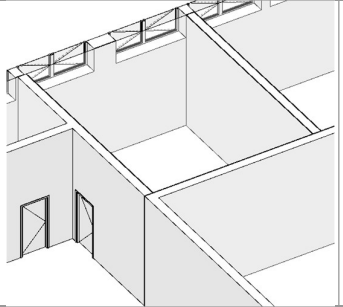
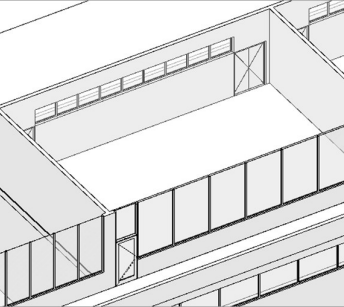
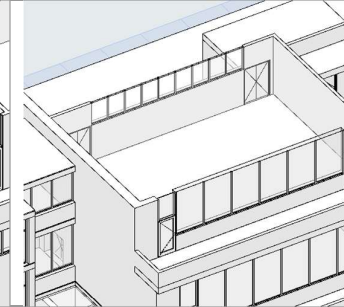
BLOQUE E1		
E1 -105 Subterráneo	E1 011 Planta alta 1	E1 108 Planta alta 2
		
ArchiCAD – Ecodesigner STAR		
		
DesignBuilder		

Tabla 2. Geometrías de aulas de bloque E3 en software.

BLOQUE E2		
E2 003 Planta baja	E2 102 Planta alta 1	E2 203 Planta alta 2
		
ArchiCAD – Ecodesigner STAR		

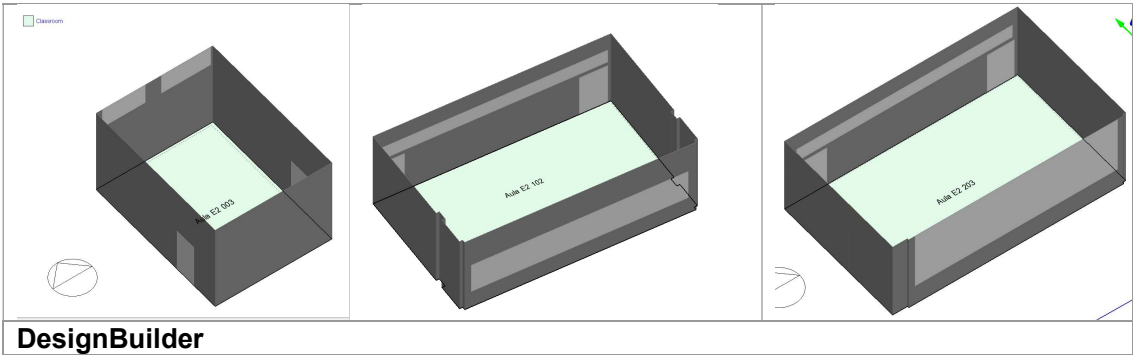


Tabla 3. Geometrías de aulas de bloque E3 en software.

BLOQUE E3		
E3 -102 Subterráneo	E3 101 Planta alta 1	E3 302 Planta alta 3
ArchiCAD – Ecodesigner STAR		
DesignBuilder		

2.2. Configuración de bloques térmicos

2.2.1. Materialidad y espesor de las estructuras de envolvente, particiones y subterráneas.

En los softwares de simulación térmica una correcta configuración de la permeabilidad del aire y transmitancia térmica permite reducir la discrepancia en

un 15% (Marshall et al., 2017), por lo tanto es una de las variables más importantes para la comparación de los dos softwares, la norma NEC define a la transmitancia térmica como la transmisión de calor por unidad de tiempo a través de un material o elemento constructivo, también se conoce como factor-U o valor-U y se expresa en las unidades (W/m^2K) (Ministerio de desarrollo urbano y vivienda (MIDUVI), 2018).

Debido a que cada software calcula el factor U, de acuerdo a las condiciones de los materiales y el entorno, si bien permiten el ingreso manual de un valor, en sus manuales ofrecen mayor fiabilidad en el resultado al utilizar su algoritmo dinámico. Sin embargo, para efectos de clasificación y comprobación, en las siguientes tablas se establecen los valores U calculados de acuerdo a la norma (DA DB-HE / 1. Cálculo de Parámetros Característicos de La Envolvente, 2015) para los diferentes tipos de muros, suelos y techos, es importante destacar también que, si bien lo ideal sería una medición física, ésta es inviable por ser ambientes no acondicionados.

Los dos softwares a emplear tienen la posibilidad de cargar los datos de las envolventes, particiones, puertas y ventanas aplicando propiedades de resistencia térmica, los edificios fueron construidos en diferentes épocas y con detalles constructivos distintos, por lo tanto, se siguen los detalles constructivos de las paredes y losas de cada edificio tomadas del trabajo de titulación “Modelado y mediciones de las condiciones ambientales interiores en edificaciones FAUC” (Ortega & Vintimilla, 2023) y con sus respectivas ventanas y puertas, se categorizan por tipologías, los datos de resistencia térmica se obtienen de la Norma NEC (Ministerio de desarrollo urbano y vivienda (MIDUVI), 2018), el detalle del cálculo se encuentra en el ANEXO 1(a, b, c y d), con las tablas resumen se puede identificar el cumplimiento con la normativa y así identificar cómo se comportan los resultados térmicos obtenidos con respecto a los estándares ecuatorianos de la envolvente.

Tabla 4. Elementos constructivos de envolvente

Elementos de Envolvente sobre el nivel del suelo				
Elemento	Tipo	Descripción	Espesor (m)	Transmitancia térmica (W/m²K)
Muros	1.1	ladrillo panelón visto	0.15	2.87
	1.2	ladrillo panelón visto	0.3	1.90
	1.3	ladrillo panelón visto	0.45	1.42
	2	Bloque enlucido a una cara, con aislamiento y paneles de hormigón	0.21	1.4
	3	Bloque enlucido a una cara, con aislamiento y paneles de acero	0.18	1.45
Suelos	1	Contrapiso de Hormigón armado sobre piedra con recubrimiento de baldosa.	0.3	2.51
Techos	1	Losa de hormigón alivianada con bloque y cámara de aire con recubrimiento de gypsum	0.74	0.51
	2	Losa de hormigón	0.3	2.84
	3	Losa de hormigón con gravilla	0.45	1.14

Tabla 5. Elementos divisorios (particiones).

Elementos de particiones				
Elemento	Tipo	Descripción	Espesor (m)	Transmitancia térmica (W/m²K)
Muros	1.1	ladrillo panelón visto	0.15	2.31
	1.2	ladrillo panelón visto	0.3	1.65
	2	Bloque enlucido dos caras	0.18	2.06
Losas de entrepiso	1	Losa de hormigón alivianada con bloque y recubrimiento superior de baldosa.	0.35	1.16
	2	Losa de hormigón alivianada con bloque y recubrimiento superior de baldosa	0.45	0.94
	3	Losa de hormigón alivianada con bloque y recubrimiento superior de madera parquet.	0.35	1.06
	4	Losa de hormigón alivianada con bloque y recubrimiento superior de madera parquet.	0.45	0.89

	5	Losa de hormigón alivianada con bloque, cámara de aire con gypsum y recubrimiento superior de microcemento	0.74	0.46
--	---	--	------	------

Tabla 6. Elementos bajo el nivel del suelo.

		Elementos de envolvente subterránea.			
Elemento	Tipo	Descripción	Espesor (m)	Profundidad	Transmitancia térmica (W/m²K)
Muros	1	ladrillo panelón visto	0.15	0.9	1.17
	2	Bloque enlucido dos caras	0.11	1.21	2.06
Suelos	1	Contrapiso de Hormigón armado sobre piedra con recubrimiento de madera parquet.	0.30	0.9	0.3
	2	Contrapiso de Hormigón armado sobre piedra con recubrimiento de microcemento	0.29	1.62	0.25

2.2.2. Materialidad y configuración de aberturas.

Tabla 7. Transmitancia térmica de aberturas.

Elemento	Tipo	Descripción	Transmitancia térmica (W/m²K)
Ventanas	1	Ventana de aluminio y vidrio claro	5.78
Suelos	1	Puerta de madera maciza	2.56
	2	Puerta de madera tamboreada	2.5

2.2.3. Infiltración y ventilación natural.

El intercambio de aire entre el interior y exterior de un edificio depende de dos variables: infiltración y ventilación natural, la infiltración o exfiltración es el intercambio no controlado (ASHRAE, 2001) y depende tanto de la permeabilidad de la envolvente como de las condiciones ambientales del sitio; en Design Builder se ingresa como un parámetro en la definición del bloque térmico, en la pestaña de construcción, se configura en renovaciones de aire

por hora (ACH), y tiene horario configurable (DesignBuilder Software, 2009), sin embargo por concepto la infiltración no se controla, y al realizar la calibración se comprueba que este parámetro es el de mayor impacto en los datos obtenidos y comportándose como el parámetro ventilación natural de Ecodesigner, en ambos casos las simulaciones empezaran con el valor de 20 ACH y encendido durante el horario de funcionamiento de la facultad.

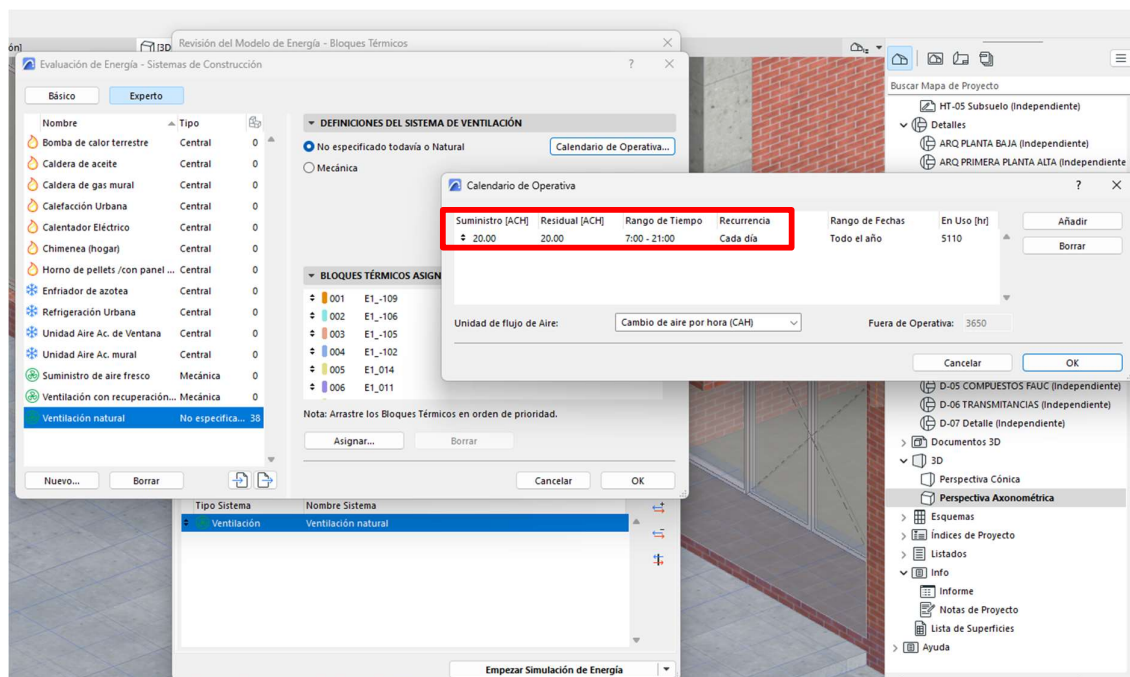


Imagen 2. Configuración de ventilación natural en Ecodesigner.

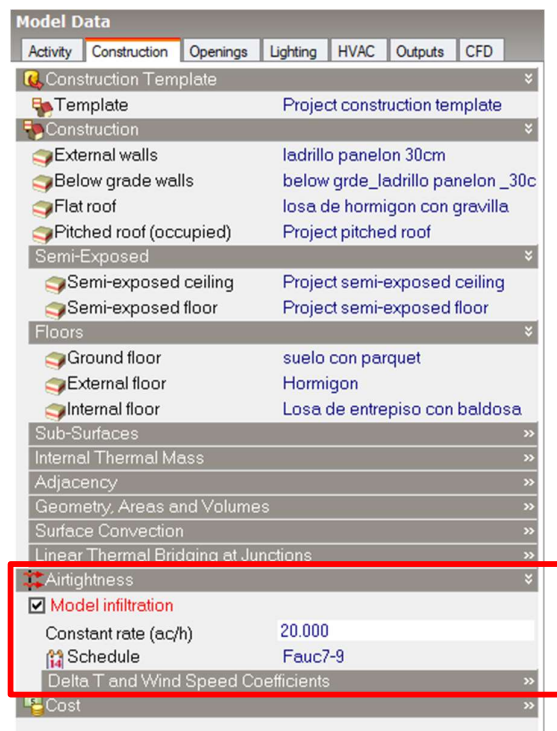


Imagen 3. Configuración de infiltración en DesignBuilder.

En Ecodesigner además se configura la permeabilidad de las estructuras y se modifica en puertas y ventanas con la unidad de medida (l/s, m^2), el manual propone un rango de entre 0.6 l/s, m^2 como bajo y 1.6 l/s, m^2 como alto; con estos datos, calcula automáticamente el intercambio de aire por hora y lo muestra en el reporte de la simulación (Graphisoft, 2014).

En este parámetro se parte del dato ingresado en el trabajo de titulación “Modelado y mediciones de las condiciones ambientales interiores en edificaciones FAUC” de 20 l/s, m^2 para las puertas y ventanas, en cámaras de aire el valor es de 100 l/s, m^2 (Ortega & Vintimilla, 2023), con la excepción de las puertas y ventanas del aula E2 203 que se configura en 40 l/s, m^2 ya que aun con la ventilación natural de 40ACH se mantenía una diferencia considerable con la temperatura medida.

En DesignBuilder la simplificación de este dato en un solo factor, a diferencia de establecer una infiltración por cada estructura del modelo, como lo hace Ecodesigner, implica una limitación en la comparación de simulación ya que no se puede considerar en el proceso de calibración, aun cuando en Ecodesigner tiene un impacto considerable.

2.2.4. Configuraciones de la zona térmica.

Dentro de los softwares de simulación existen configuraciones que indican datos de ocupación, variables que incrementan o disminuyen la ganancia térmica.

Tipo de zona

Se establecen a las aulas como áreas habitables sin acondicionamiento mecánico.

Para el caso de Ecodesigner STAR, en el manual de usuario establece a la ventilación natural como ampliamente limitada a edificios residenciales, sin embargo, en esta investigación se pondrá a prueba en el aula.

Para Design Builder, es un módulo sin restricciones de dimensiones o tipología, en la pestaña de acondicionamiento (HVAC) se apagan los acondicionamientos mecánicos y se enciende únicamente la ventilación natural.

Por la naturaleza investigativa de este trabajo, se debe tomar en cuenta que pese a esta limitación de Ecodesigner, tomarlo en consideración para este tipo de comparaciones implica establecer datos y precedentes de resultados con los que en conclusiones identificamos la capacidad competitiva del software para casos diferentes a los especificados en el manual.

Ocupación

Define cuantas personas se encuentran en una habitación, se establece en personas por m^2 en Design Builder y en Ecodesigner en m^2 per cápita. Se inserta los datos de $0.4 \text{ p}/m^2$ para Design Builder y $2.5 \text{ m}^2/\text{p}$ para Ecodesigner.

Metabolismo

Se establece la ganancia térmica por cada persona de acuerdo a la actividad que se realiza, como es de tipo leve/ moderado, en DesignBuilder se toma esa opción que toma sus datos del Handbook of fundamentals de la ASHRAE y para la actividad “escribiendo” coloca 108 W/persona y por un coeficiente 0.9 interpolación obtenida del manual de DesignBuilder que coloca 1 para hombres

y 0.85 para mujeres; Este parámetro en Ecodesigner se llama ganancia calorífica per cápita y se ingresa en el perfil de operación.

Vestimenta

En vestimenta se utiliza la unidad de medida (clo) que indica el índice de indumento en términos el aislamiento térmico y tiene la equivalencia de $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \times \text{K/W}$, dentro de los valores referenciales según (Diego-Mas. J, 2015) se toma a ropa ligera como 0.5clo, un traje completo en 1clo y ropa abrigada en 1.5clo, En cuenca se evidencia que aún con temperaturas de 15°C de promedio el 98% de las viviendas no cuentan con sistemas de calefacción (Quesada Molina & Bustillos Yaguana, 2018) por lo que las personas tienden a utilizar aun en ambientes internos abrigos y chalecos, de manera que se establece como índice para las aulas 1.5clo.

Este parámetro no se encuentra en Ecodesigner, esto implica una limitación en la versatilidad de datos que se pueden modificar, sin embargo dentro de los casos de estudio revisados, en su mayoría, no ha sido un parámetro tomado en cuenta para calibración lo que responde a una baja afectación.

Horarios

El horario de clases nos ayuda a determinar la cantidad de usuarios presentes en las áreas ya que la ganancia térmica se incrementa con el número de personas, se obtiene el horario de clases de cada aula en la secretaria de la facultad para el periodo lectivo febrero-agosto 2022, sin embargo, los horarios no se cumplen perfectamente, por lo que se realizará una primera comparación con un horario general de 7am a 1pm y de 3pm a 9pm, de manera que se obtiene tablas comparativas de las que se puede determinar una simulación típica donde no se tenga conocimiento del horario específico de uso, se determina el rango de error y de forma consecuente se realiza una simulación con el horario específico de uso corregido con los datos obtenidos, estos datos, en resultados nos permitirá identificar en cuanto afecta que la ocupación no se cumpla.

Ganancias calóricas por equipo de oficina

En Design Builder se establece primero por computadoras y al activar se abre el dialogo donde se coloca 0.1 en fracción radiante como lo recomienda su manual como uso típico, este factor permite precisar la cantidad de calor que emite un equipo de oficina en comparación con su consumo energético tiene un rango entre 0.0 y 1.0, siendo 0.0 cuando todo el consumo se transmite en forma de calor y en 1.0 cuando nada de la energía utilizada se emite en forma de calor al aire interior, además se especifica el horario de uso del aula, este ítem se encenderá únicamente en el aula E3 -102 que es laboratorio de computadoras, para las demás aulas únicamente se activara las ganancias calóricas por equipo de oficina dejando el valor por default de 1.83 w/m^2 y en fracción radiante 0.2 como lo recomienda su manual como valor típico y en la pestaña de control ambiental se configura la carga por iluminación en 0.5 w/m^2 .

Design Builder deja libre una pestaña como misceláneos donde se puede colocar alguna ganancia calórica conocida del área que no se haya configurado en las opciones anteriores, para este caso se dejara inactiva.

En Ecodesigner, en perfil de ocupación se coloca 1.83 w/m^2 y en iluminación, ya que se utiliza iluminación LED, se configura en 0.5 w/m^2 .

Carga de humedad

Se define la carga de humedad como la cantidad de vapor de agua que ingresa a las habitaciones como resultado del uso típico del edificio (Graphisoft, 2014), Ecodesigner utiliza las unidades (gramos/día/m^2) y en este caso se lo mantiene en 0, este dato no se configura ni es aparente en Design Builder, este parámetro se ignora al no existir equipos de humidificación o equipos sanitarios, ni cocinas que emitan vapor de agua al ambiente

Consumo de agua Caliente

Establece las ganancias calóricas producidas por el consumo de agua caliente, suministro que no existe en las instalaciones, por lo tanto, en ambos casos se configura en 0.

2.2.5. Datos de clima

Archivo climático

El formato de fichero climático utilizado por los softwares de simulación a emplear es (.epw), el cual se puede editar por medio de Microsoft Excel, siendo previamente convertido a .csv por medio del software DeEPWaCSV.

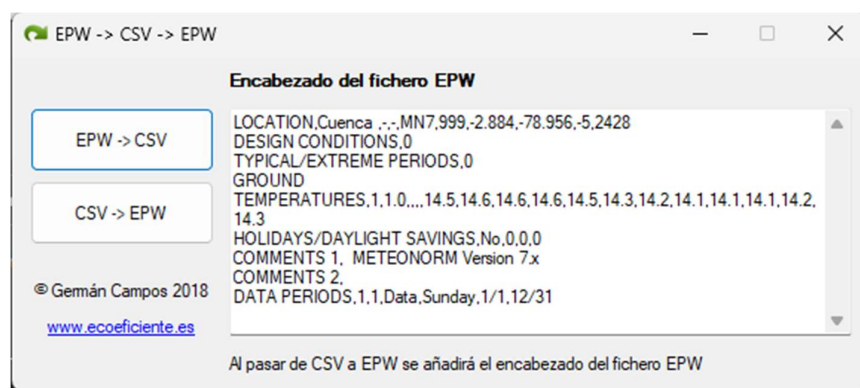


Imagen 4. Software de conversión de archivos epw.

Estación meteorológica

La facultad cuenta con una estación meteorológica y de ella se extraen los datos de las fechas en las cuales se extraen las indicadas entre el 19 de marzo al 28 de julio del 2022 siendo estos los meses tomados las mediciones internas de las aulas. Los datos son tomados por la estación cada 10 minutos por lo que genera 6 datos por hora, los cuales son promediados para ingresarse al archivo. epw que tiene un dato por hora.

El hardware utilizado en la estación meteorológica es el "WS-GP2 Advanced Automatic Weather Station System" el cual cuenta con sensores que miden lluvia, radiación solar, temperatura del aire, velocidad y dirección del viento y humedad relativa (Delta-T Devices Ltd, 2023).



Imagen 5. Estación meteorológica WS-GP2 Advanced Automatic Weather Station System.

Los datos extraídos de la estación son los de Humedad Relativa (%), temperatura del aire (C°), Velocidad del viento (m/s) y dirección del viento(deg).

Datos modificados

Las columnas correspondientes a los datos que se requieren modificar en el archivo de base son:

7: Temperatura del aire

9: Humedad Relativa

21: Dirección del viento

22: Velocidad del viento

Una vez modificado se vuelve a convertir de .cvs a .epw.

Una vez convertido se generan los archivos. stat y .audit con el software Weather de Energy plus.

2.2.6. Configuración del sitio

En Ecodesigner se configura la pestaña de Definiciones del entorno con los datos del clima, donde se carga el archivo. epw que además de los datos de estación climática, importa los datos de ubicación y altitud; se configura el tipo

de clima como: húmedo, en tipo de suelo se coloca: grava, en alrededores: jardín y en reflectancia del suelo en 20%. En protección de viento se coloca en norte y sur: parcialmente protegido.

En DesignBuilder se debe configurar la plantilla del sitio donde también cargando el archivo. epw se obtienen los datos de ubicación y elevación.

2.3. Selección de fechas a simular

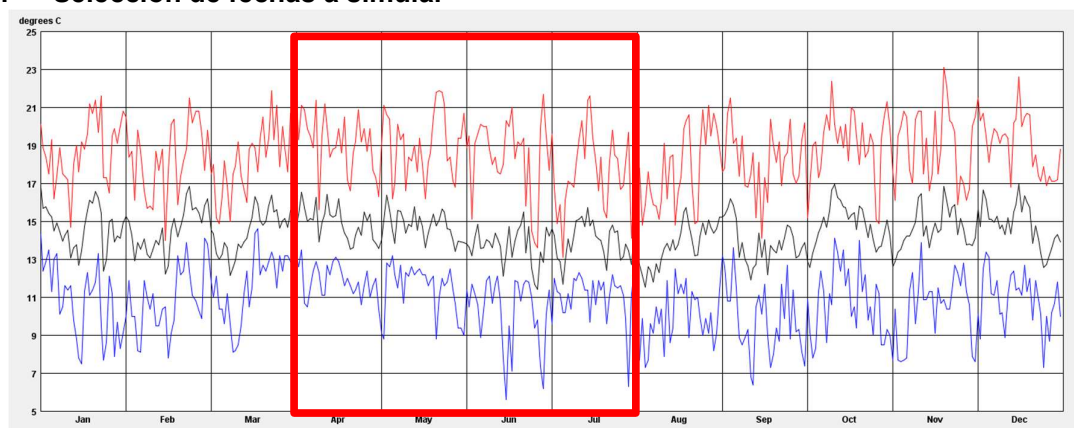


Imagen 6. Medidas de temperatura exterior durante un año y rango de medidas interiores.

Se busca comparar la simulación en un día desfavorable, para ello se ocupa el rango de temperatura exterior tomada en la estación meteorológica de la facultad.

De las aulas que se han tomado los datos, 8 coinciden con datos tomados entre el 19 de marzo y 17 de mayo, por lo tanto para esta franja de tiempo se identifica el día mas desfavorable. Siendo el 20 de abril con 13.54°C de temperatura exterior, es importante tomar en cuenta que de los datos de todos el año, el día mas desfavorable es el 26 de junio con una temperatura promedio de 11.44°C , de las 9 aulas, solo el aula E3 203 cuenta con datos entre el 6 de junio y 28 de julio, por lo tanto se considera prudente realizar la comparación en esta fecha para esta aula.

2.4. Exportación de datos

Se exporta en formato xls en frecuencia horaria de manera que sea directamente comparable con los datos medidos en las aulas, en el caso de Ecodesigner STAR es importante tener el plug in completo para lo cual en la parte superior de la ventana se muestra el nombre Ecodesigner STAR (imagen 7) y al momento de exportar en archivo .xls, editar en opciones marcando la casilla de “Resultados de proyecto -Por Horas” (imagen 8).

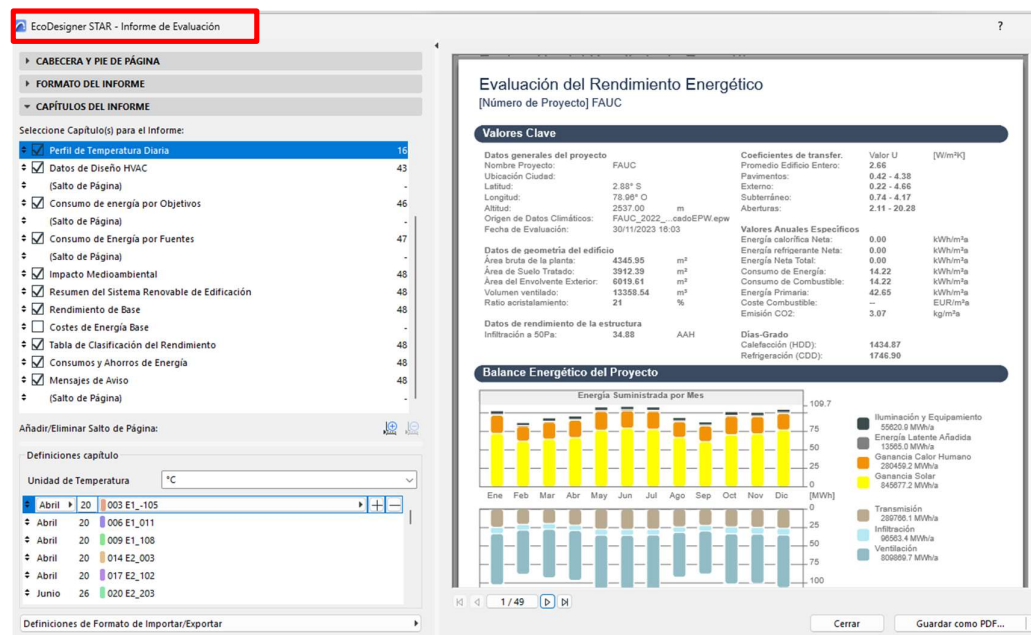


Imagen 7. Pantalla de exportación de datos de simulación en Ecodesigner STAR.

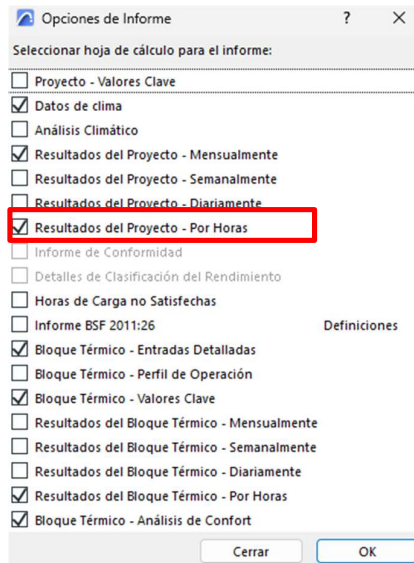


Imagen 8. Pantalla de opciones exportación de datos de simulación en .xls en Ecodesigner STAR.

En una primera simulación se compararán los datos obtenidos y se realiza una calibración empírica confirmando o cambiando los valores utilizados siguiendo el algoritmo presentado en la metodología.

2.4.2. Temperatura

Cada software permite definir más parámetros en la exportación para ello es importante buscar y revisar que se encuentre configurado en grados Centígrados, se simula únicamente los días a comparar y se exportan los archivos de cada aula en DesignBuilder, en Ecodesigner, la simulación y exportación es general y se realiza para todo el modelo durante todo el año.

2.4.3. Humedad

El porcentaje de humedad relativa es calculado por el software tomando en cuenta las configuraciones del bloque térmico, este dato se considera de apoyo y comprobación ya que por definición es dependiente de la temperatura (Huerto-Cardenas et al., 2020).

2.4.4. Medición de datos in situ

Se miden los datos internamente en las aulas de la facultad utilizando estaciones de registro de datos dentro de los cuales se cuenta con:

- Sensor de temperatura
- Sensor de humedad
- Sensor de CO_2
- Sensor de radiación solar
- Sistema embebido de adquisición y registro de datos

Los equipos fueron calibrados y validados con un informe de evaluación previamente a la toma de datos en enero de 2022.

CAPÍTULO 3

Resultados

3.1. Comparación del cumplimiento de la normativa actual con respecto a las envolventes.

La norma clasifica a la ciudad dentro de la zona climática 3 o continental lluviosa con una altitud de 2500 msnm (Ministerio de desarrollo urbano y vivienda (MIDUVI), 2018) y establece el valor U de las envolventes para habitaciones climatizadas y no climatizadas, siendo que las aulas no cuentan con climatización, se comparan los valores de las envolventes de las aulas con los encontrados en las tablas para valorar su cumplimiento, se destaca que para paredes bajo nivel de terreno se presenta como factor C (conductancia térmica) que expresa la tasa temporal del paso de calor entre las dos superficies de un material o ensamblaje y se presenta con las mismas unidades que la transmitancia térmica (Ministerio de desarrollo urbano y vivienda (MIDUVI), 2018), siendo la diferencia el no tomar en cuenta las barreras de aire en las superficies del ensamblaje.

En el montaje máximo se expresa como el valor de transmitancia térmica máximo permitido del ensamblaje de los elementos de envolvente constituidos por capas térmicamente homogéneas (DA DB-HE / 1. Cálculo de Parámetros Característicos de La Envolvente, 2015), el detalle del cálculo se encuentra en el Anexo 1.

Tabla 8. Requisitos de envolvente para la zona climática 3 de la norma NEC

Elementos opacos	Habitable				No habitable	
	Climatizado		No climatizado		Montaje máximo	Valor min. R de aislamiento
	Montaje máximo	Valor min. R de aislamiento	Montaje máximo	Valor min. R de aislamiento		
Techos	U-0.273	R-3.5	U-2.9	R-0.89	U-4.7	R-0.21
Paredes, sobre nivel del terreno	U-0.592	R-1.7	U-2.35	R-0.36	-5.46	N/A
Paredes bajo nivel de terreno	C-6.47	N/A	C-6.47	N/A	C-6.47	N/A
Pisos	U-0.496	R-1.5	U-3.2	R-0.31	U-3.4	N/A
Puertas opacas	U-2.839	N/A	U-2.6			
Ventanas	Transmitancia máxima	Montaje máximo SHGC	Transmitancia máxima	Montaje máximo SHGC	Transmitancia máxima	Montaje máximo SHGC
Área translúcida vertical $\geq 45^\circ$	U-3.69	SHGC-0.25	U-5.78	SHGC-0.82	U-6.81	N/A
Área translúcida vertical $< 45^\circ$	U-6.64	SHGC-0.36	U-6.64	SHGC-0.36	U-11.24	N/A

Tabla 9. Revisión de cumplimiento de la transmitancia térmica de elementos de envolvente.

Envolvente	Tipo	Montaje máximo	Valor U	Cumplimiento
------------	------	----------------	---------	--------------

Muros	1.1	2.35	2.92	No cumple
	1.2		1.94	Cumple
	1.3		1.45	Cumple
	2		1.4	Cumple
	3		1.45	Cumple
Ventanas	1	5.78	5.87	No cumple
Puertas	1	2.6	2.56	Cumple
	2		2.5	Cumple
Techos	1	2.9	0.51	Cumple
	2		2.84	Cumple
	3		1.14	Cumple

Tabla 10. Revisión de cumplimiento de la transmitancia térmica de elementos de envolvente en subterráneo.

Bajo suelo	Tipo	Montaje máximo	Valor U	Cumplimiento
Muros	1	6.47	1.17	Cumple
	2		2.06	Cumple

Se revisa el cumplimiento de la envolvente de acuerdo con la norma que regula el valor U máximo permitido para cada elemento y se identifica que un tipo de muro no cumple con la normativa y las ventanas de las edificaciones también superan el montaje máximo permitido, este factor es importante porque regula la capacidad de mantener la temperatura en un ambiente cerrado, así como la capacidad de diferenciarse del ambiente exterior inmediato.

Con este dato se puede inferir en los resultados esperados por el software, no obstante, se debe tomar en cuenta la infiltración y las ganancias de energía por luz solar, así como por uso del espacio.

La carpintería de las ventanas existente en los bloques E1 y E2 evidencian por su construcción ser ineficientes en aislar el ambiente interior del exterior lo que incrementa el intercambio de aire en las aulas.

Dentro de los datos obtenidos con las mediciones in situ se puede obtener el promedio diario de la temperatura del aire interno de las aulas en el día a comparar, este dato nos permite identificar en relación con el rango de confort donde se ubican las aulas, en la tabla 11 se muestran los datos y si se encuentra dentro del rango de confort, la ubicación con respecto al rango de confort nos ayuda a identificar hacia qué dirección se debe considerar los valores más desfavorables durante una simulación y así también conocer como direccionar un factor de corrección.

Tabla 11. Temperatura promedio diaria de las nueve aulas.

Aula	Temperatura externa promedio diaria	Temperatura interna promedio diaria	Cumplimiento
E1 -105	13.53125	18.39	Cumple
E1 011		15.51	Bajo del rango
E1 108		17.90	Cumple
E2 003		15.30	Bajo del rango
E2 102		15.63	Bajo del rango
E2 203	11.43875	12.28	Bajo del rango
E3 -102	13.53125	17.77	Cumple
E3 101		17.53	Cumple
E3 302		18.52	Cumple

3.2. Calibración

Se inician las simulaciones con la infiltración configurada en 20 ACH y con su horario encendido durante su funcionamiento con el horario general de la facultad de 7am a 1pm y de 3pm a 9pm, donde se obtienen los datos sin modificar el horario de uso y ocupación.

Para la obtención de la discrepancia de los softwares con la realidad es importante considerar el parámetro medido (T y HR), la frecuencia de los datos (cada hora) y el índice de discrepancia a utilizar por ellos para esta investigación se utiliza el promedio de la diferencia absoluta (MAE) y la unidad del resultado es dependiente de la unidad de los datos (Huerto-Cardenas et al., 2020), siendo en °C para la temperatura y % para la humedad relativa.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |m_i - s_i|}{n}$$

Donde:

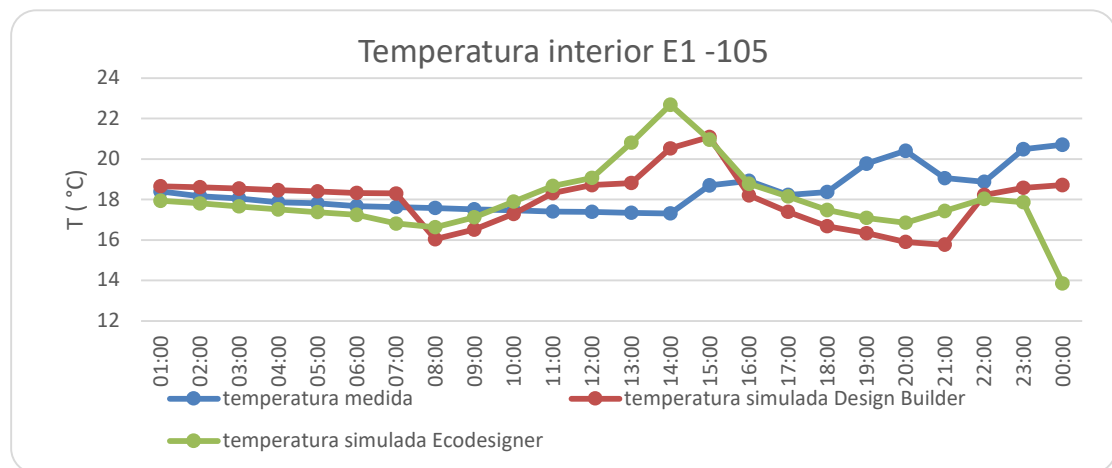
m_i = valor medido

s_i = valor simulado

n=número de valores a comparar

Este dato se calcula en las tablas de comparación con las 24h del día simulado y nos permiten continuar con el algoritmo de calibración logrando obtener los resultados que produzcan la mayor precisión.

Luego de realizar las simulaciones en la fecha indicada, se comparan los resultados y se identifica que el horario de la ventilación natural o infiltración, según cada software, se modifica con el objetivo de reproducir el uso con vanos, abiertos y cerrados, para esto se adjunta una tabla de horario de ventilación de cada aula. De esta manera se contrastan todos los datos en tablas y gráficas (ANEXO 2), en la imagen 9 se puede ver las gráficas del aula E1 -105 como ejemplo y como resumen se obtiene la tabla comparativa de resultados preliminares.



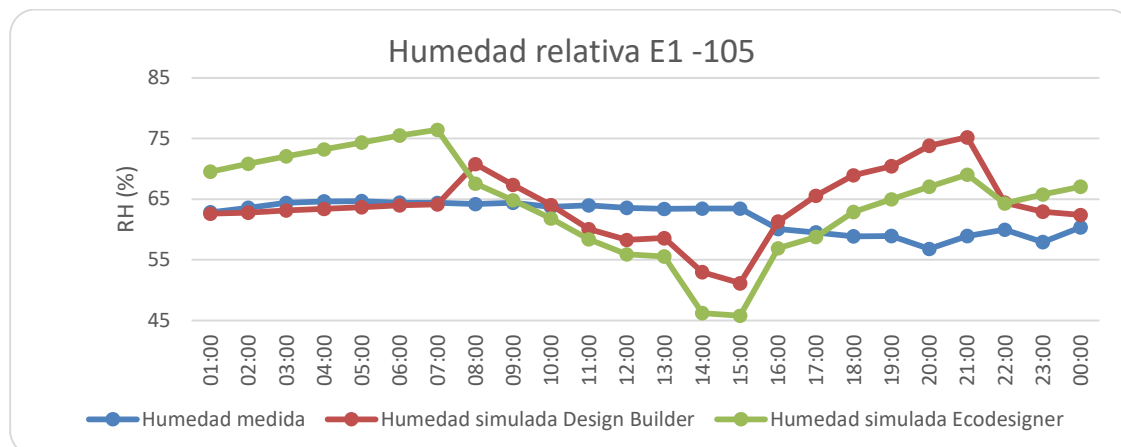


Imagen 9. Gráficas obtenidas del aula E1 -105 previo a la calibración.

Tabla 12. Resumen de tablas comparativas con resultados previos a la calibración.

	Promedio de error absoluto (MAE)			
	TEMPERATURA (°C)		HUMEDAD (%)	
AULA	Design Builder	Ecodesigner	Design Builder	Ecodesigner
E1 -105	1.45	1.60	5.22	7.40
E1 011	3.44	2.51	10.14	7.91
E1 108	1.29	1.22	3.90	6.89
E2 003	1.22	2.45	4.91	6.72
E2 102	0.72	2.23	4.50	7.48
E2 203	1.54	5.93	4.59	15.29
E3 -102	1.01	0.87	4.21	5.66
E3 101	2.40	1.37	7.38	6.05
E3 302	0.54	1.07	5.48	8.56
Promedio	1.51	2.14	5.59	8.00

Una vez se tiene estas simulaciones iniciales, se busca identificar cuanto de la discrepancia mejora al editar un horario de clases específico para el aula en el día medido, se parte del horario obtenido de la secretaría de la facultad y se modifica según los incrementos en temperatura y niveles de CO_2 medidos para una mayor fidelidad de información y una vez introducido un horario calibrado al día medido, se realizan nuevamente las simulaciones y se

continúa calibrando considerando las infiltraciones y horarios como variables buscando llegar al menor rango de error posible.

Se presentan en los resultados los horarios de ocupación y de ventilación natural encontrados en la calibración, se identifica que en la mayoría de las aulas medidas durante la noche, o fuera del tiempo de ocupación, la ventilación natural se ve reducida drásticamente, interpretándose el cierre de puertas al final de la jornada, se muestra también que para algunas aulas la ventilación se reduce en varios horarios y a diferentes medidas indicando la manipulación de puertas y ventanas durante la ocupación, de las nueve aulas estudiadas solo una demuestra una clara falta de control de ventilación ya que se determinan 40ach durante las 24h del día medido, se podría interpretar que las carpinterías no proveen ninguna restricción al viento exterior.

Cabe recalcar que los horarios de ocupación y ventilación se han calibrado de forma consecutiva y no simultánea por lo que se encuentra entre los resultados que el horario de ocupación y el valor de la ventilación son valores mucho más significativos en la obtención de datos certeros que los horarios de ventilación, por lo que para investigaciones o proyectos en los que no se cuente con una personalización de horarios de ventilación se puede proveer resultados de precisión análoga.

3.3. Comparación de resultados entre los softwares y la realidad.

Se realizan las tablas de comparación con la toma de datos a cada hora y se obtiene un promedio de la discrepancia del día de cada aula (Anexo 3), se presentan los horarios configurados para la simulación final que nos ayudan a interpretar el comportamiento térmico de las aulas.

Tabla 13. Horarios de ocupación de las aulas.

Horario de ocupación	
Aula	Horario
E1 -105	8h a 12h; 13h a 21h.
E1 011	16h a 18h.
E1 108	7h a 13h; 15h a 18h, 19h a 21h.
E2 003	N/A
E2 102	7h a 11h; 15h a 20h.

E2 203	N/A
E3 -102	7h a 10h; 17h a 20h.
E3 101	7h a 9h; 17h a 21h
E3 302	7h a 9h; 15h a 21h.

De acuerdo a lo expuesto en la metodología y la calibración se obtienen los horarios de ventilación natural de cada aula específica como ayuda a cumplir el objetivo de obtener datos comparativos en igualdad de condiciones para las simulaciones expresando las discrepancias de los simuladores con la realidad con los datos ambientales más cercanos a la realidad.

Tabla 14. Horarios de ventilación de las aulas.

Horario de ventilación		
Aula	Horario	Tasa de ventilación
E1 -105	8h a 17h	20 ACH
	0h a 8h; 17h a 24h	2 ACH
E1 011	0h a 19h; 9h a 24h	30 ACH
	19h a 9h	6 ACH
E1 108	7h a 17h	20ACH
	19h a 21h	20ACH
E2 003	9h a 17h	40ACH
	0h a 9h; 17h a 24h	12ACH
E2 102	7h a 21h	30ACH
E2 203	0h a 24h	40ACH
E3 -102	7h a 20h	15ACH
E3 101	7h a 21h	15ACH
E3 302	7h a 21h	15ACH

Con 0.82°C de discrepancia en DesignBuilder y 0.75°C en Ecodesigner, el aula E1 -105, muestra estar justo en el límite inferior del confort térmico siendo 17.32°C la temperatura más baja a las 14 horas (imagen 10) mostrando que no recibe ganancia solar durante la mañana ya que las aulas evitan la incidencia solar directa con su orientación. Es importante notar que incluso cuando los simuladores no llegan a emular la estabilidad de la temperatura sin mayor

especificación que excediera los objetivos de la investigación, ambos mostraron resultados muy similares.

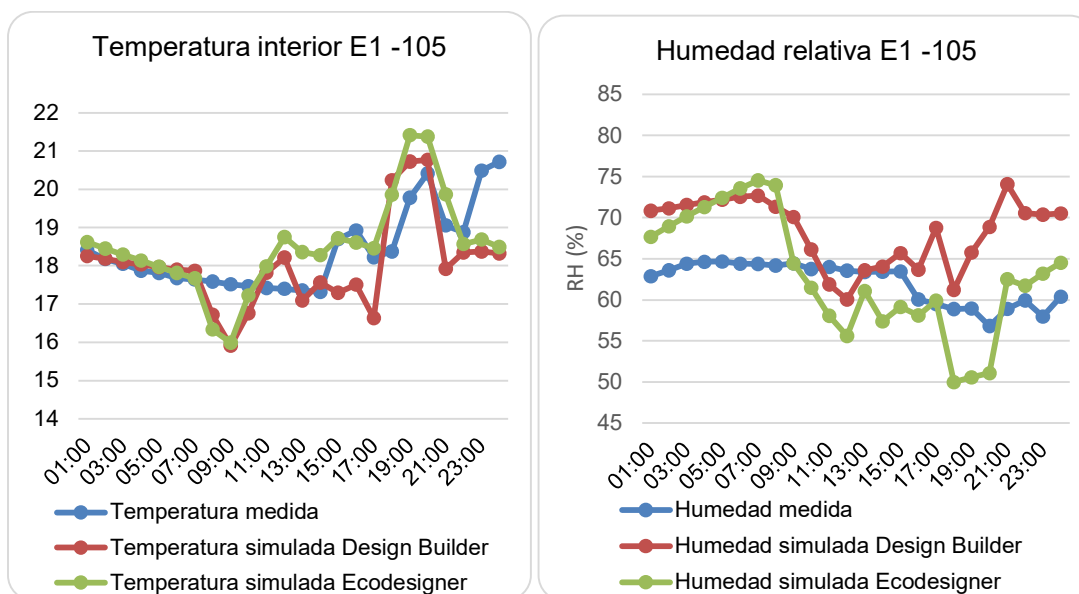


Imagen 10. Gráficas de temperatura y humedad obtenida del aula E1 -105.

Para el aula E1 011, la temperatura es relativamente estable a lo largo del día, sin embargo a diferencia de la temperatura medida, la simulación muestra un incremento termico al medio día en ambas herramientas aun cuando esta ventilada y sin ocupación, la temperatura en general se mantiene por debajo del confort termico, exceptuando el incremento medido a la media noche. Ya que este estudio se lleva a cabo durante el uso regular de las aulas, no se considera ocupación a esa hora, sin embargo la similitud entre ambos resultados simulados nos indica que esta discrepancia probablemente recaiga en falta de información de los eventos al interior del aula mas no como un error de los softwares.

La grafica de humedad relativa muestra que esta aula entra en los rangos de confort en este parámetro y tiene un menor porcentaje de discrepancia que la temperatura pero actúa de forma análoga y proporcionada a la curva de temperatura.

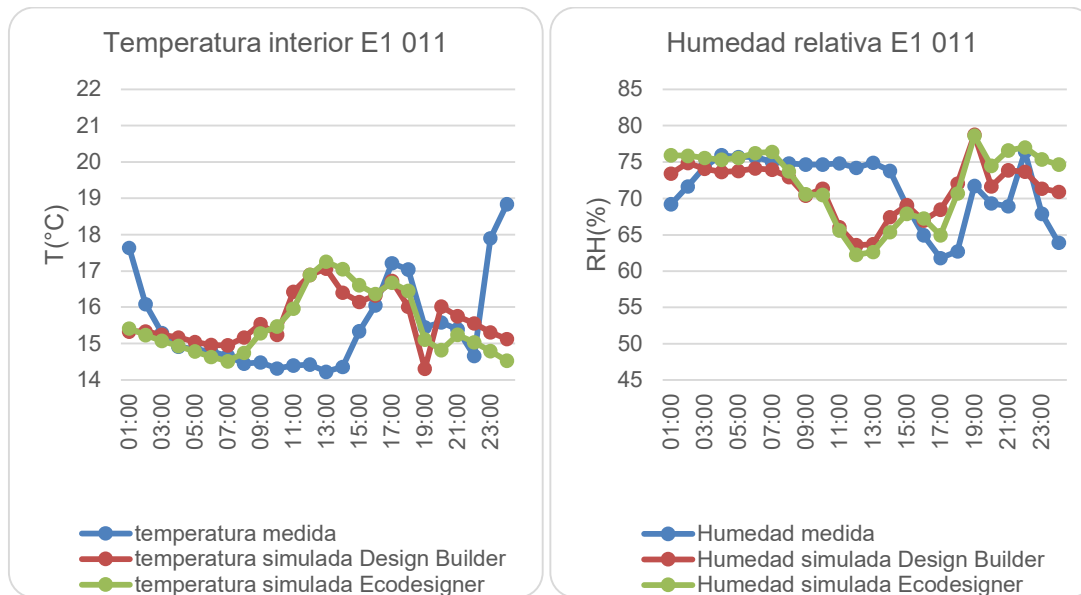


Imagen 11. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E1 011.

Para el aula E1 108 ambas gráficas, de temperatura y humedad, presentan un comportamiento similar y mínimas discrepancias, en general las temperaturas se mantienen cercanas al límite inferior del rango de confort lo que implica que con un mínimo incremento en hermeticidad, puede llegar a ser confortable durante todas las horas de ocupación.

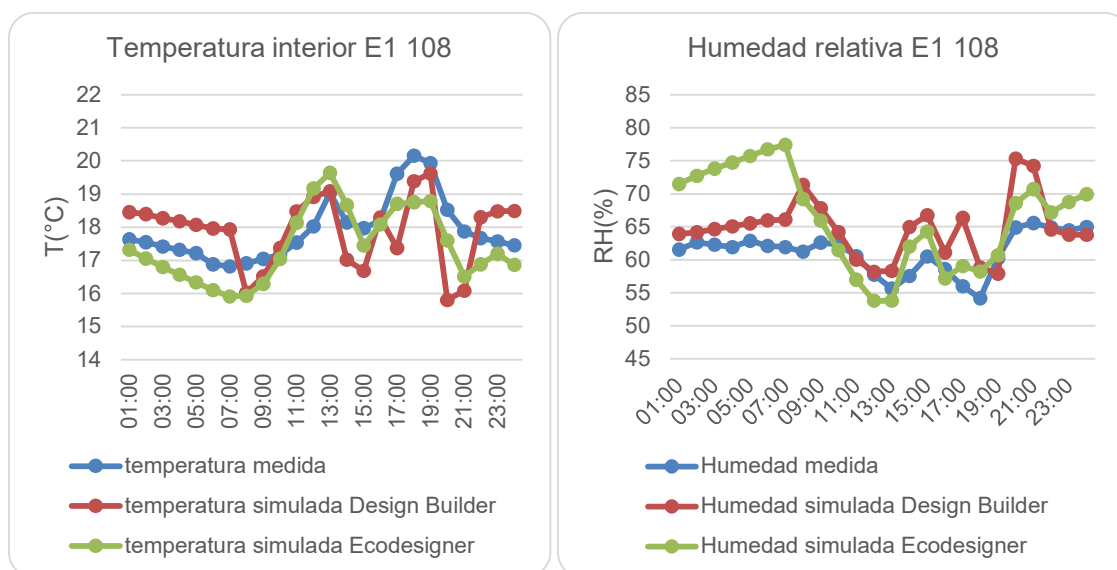


Imagen 12. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E1 108.

El aula E2 003 se encuentra situada en la planta baja del edificio E2, no recibe mucha luz solar directa y se evidencia en la gráfica de temperatura que muestra cómo se mantiene por debajo de las temperaturas confortables. En el día que se realizan las comparaciones el aula no tuvo ocupación de manera que las simulaciones pudieron mostrar su comportamiento en un escenario sin uso.

Los niveles de humedad están dentro de la zona de confort y la gráfica muestra que el comportamiento es más cercano entre los simuladores que con la información medida.

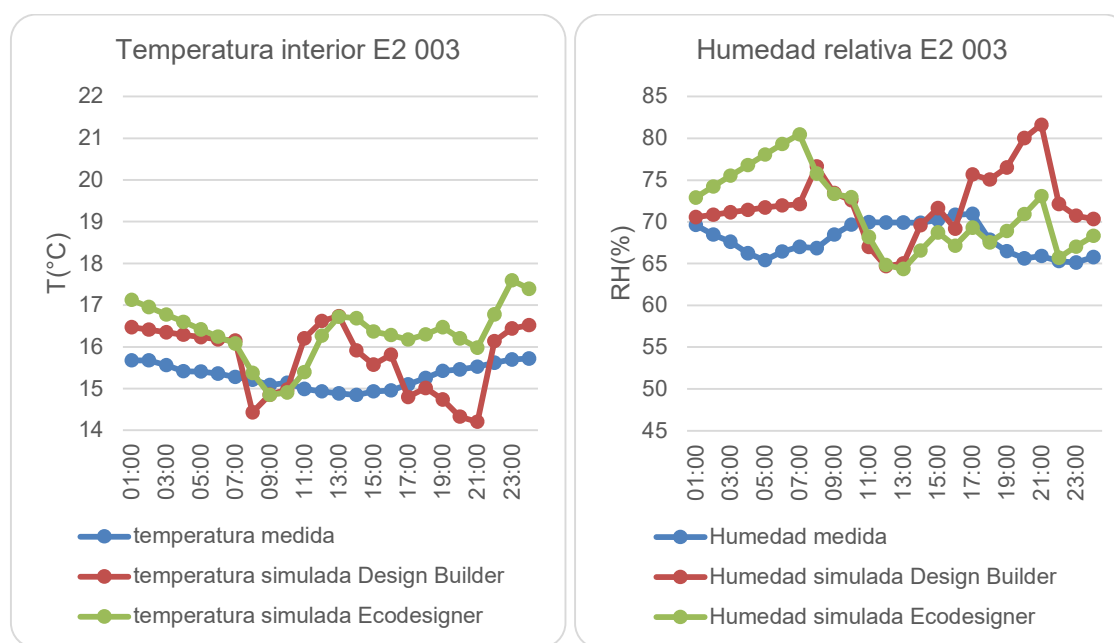


Imagen 13. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E2 003.

El aula E2 102 presenta una ventilación menor y temperaturas más altas que las demás de este estudio del mismo edificio como se puede ver en la imagen 14, sin embargo, se mantiene por debajo del rango del confort. La humedad relativa medida y sus simulaciones mantienen gran similitud en comportamiento y con un mínimo de discrepancias con 5.16% y 5.21% de diferencia en DesignBuilder y Ecodesigner respectivamente.

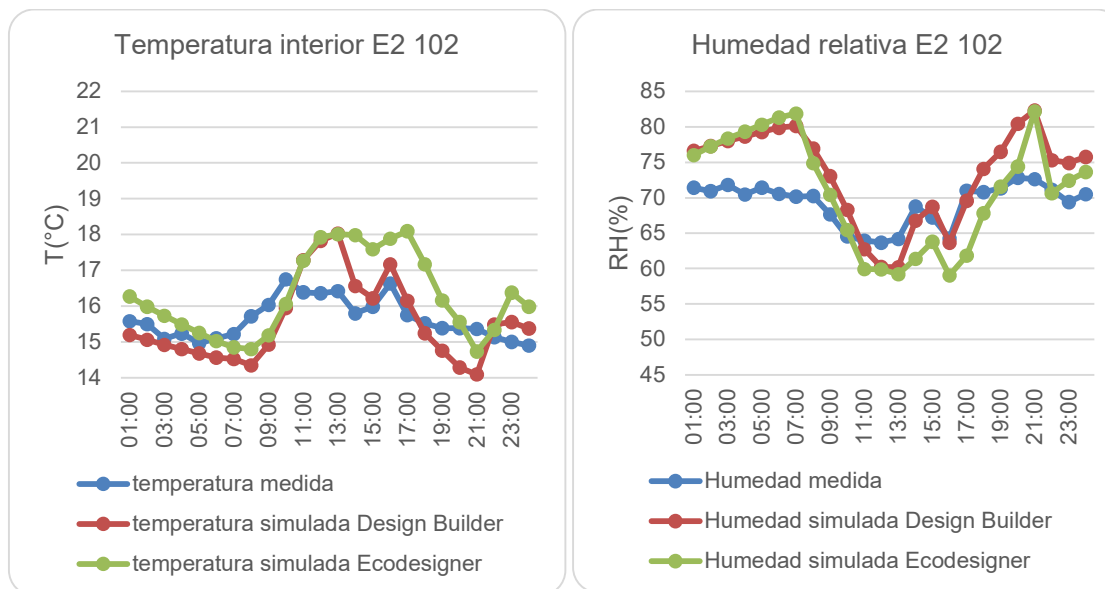


Imagen 14. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E2 102.

Durante la calibración en Ecodesigner, la infiltración en puertas y ventanas se incrementaron de 20 l/s m^2 a 40 l/s m^2 solo para esta aula para reducir la discrepancia sin afectar los resultados en Design Builder donde se obtuvieron los resultados mas cercanos con 30ACH, y ya que no existe un parámetro que se pueda editar en DesignBuilder que pueda dar alterar estos resultados de forma comparable, se hace la excepción para esta aula.

La simulación para esta aula se realiza en el día más frio del año ya que fue un domingo, no tuvo ocupación lo que explica así mismo la razón por la cual esta aula tiene las temperaturas más bajas de esta investigación. Ya que se encuentra en el tercer piso con ventanas hacia el norte, el viento parece provocar las más altas ventilaciones durante las 24 horas del día, y la mayor discrepancia en la simulación con Ecodesigner, lo que implica que para este estudio cuando se alcanzan estos niveles de ventilación y bajas temperaturas el software empieza a bajar su precisión, aunque la simulación de humedad mantiene una discrepancia similar a las demás aulas.

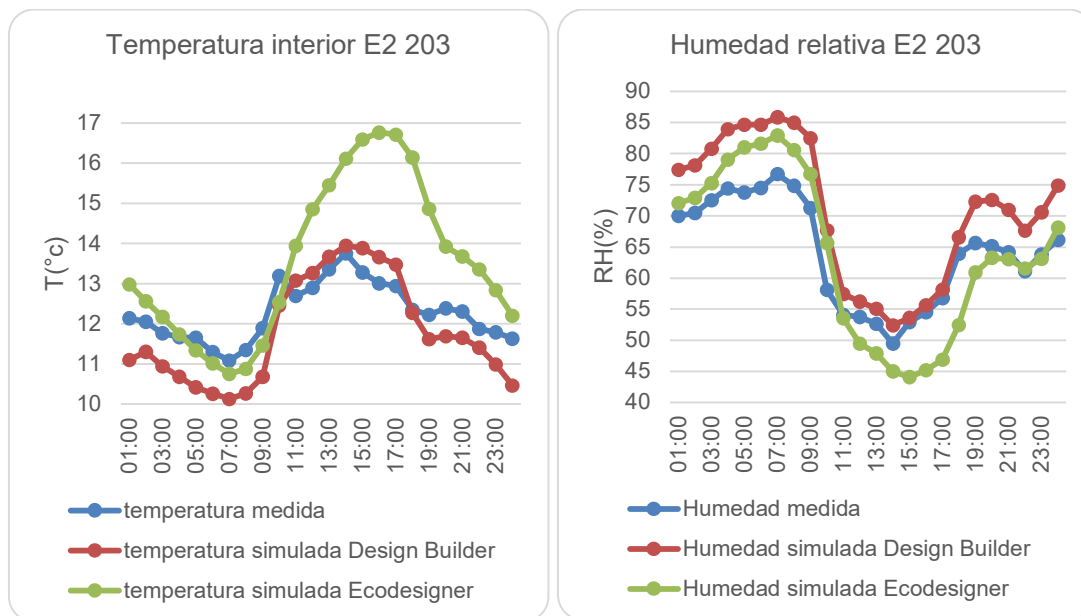


Imagen 15. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E2 203.

El aula E3 -102 se encuentra en el subterráneo y es un laboratorio informático, de forma que tiene ganancias calóricas extra proveniente del uso de las computadoras y menor ventilación que las demás aulas de esta investigación lo que resulta en temperaturas más confortables a lo largo del día, si bien en la gráfica se evidencia que las simulaciones no logran la estabilidad de las temperaturas medidas, las discrepancias se encuentran en promedio 0.57°C en DesignBuilder y en 0.44°C en Ecodesigner siendo de las más bajas de la investigación, la humedad también se mantiene más estable y dentro del rango de confort, y con bajas discrepancias entre la simulación y los datos medidos con 2.85% en DesingBuilder y 6.25% en Ecodesigner.

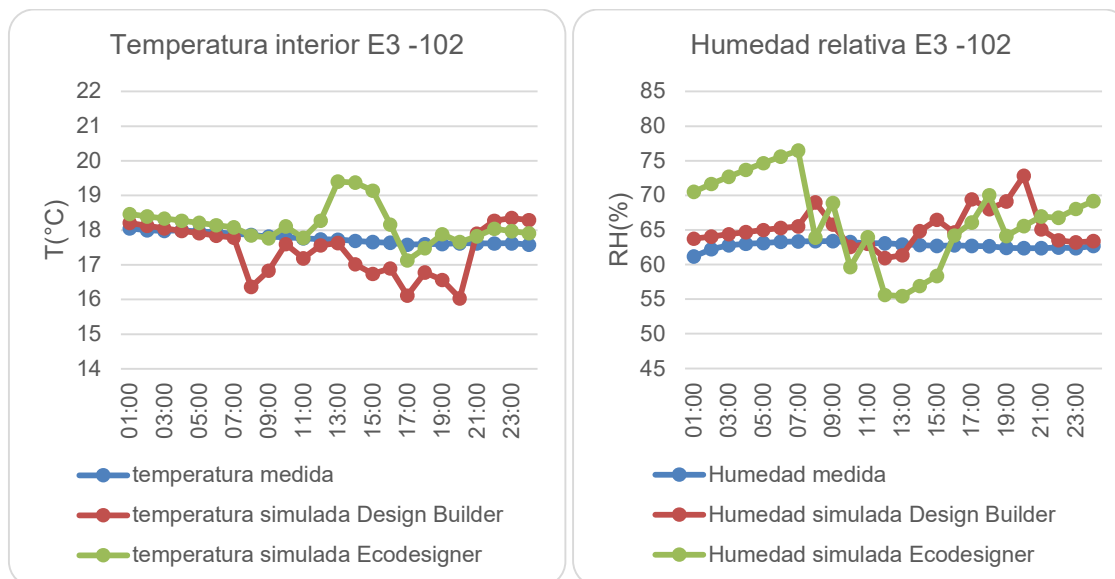


Imagen 16. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E3 -102.

Para Ecodesigner el escenario del aula E3 101 presenta los mejores resultados al igualar las temperaturas a las medidas con 0.6°C de diferencia en comparación con DesignBuilder que presenta 0.97°C, en general durante el día se tienen temperaturas en la zona más baja del rango de confort con pequeñas variaciones, pero para la simulación de humedad se presentan discrepancias mucho mayores en Ecodesigner llegando al 6.45% en comparación con DesignBuilder que reduce su discrepancia a 3.43%.

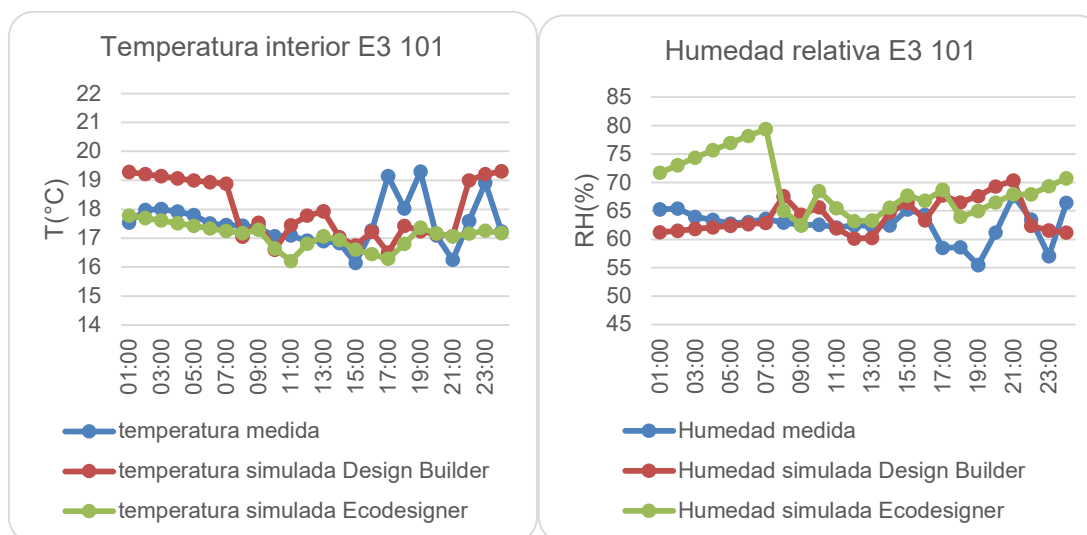


Imagen 17. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E3 101.

El aula E3 302 se encuentra ubicada en el piso más alto siendo el cuarto piso del edificio E3, cuenta con una temperatura relativamente estable a lo largo del día, la simulación de ambos softwares presenta una baja discrepancia en la temperatura, pero un porcentaje de error mucho mayor para la humedad relativa con menor estabilidad en los datos simulados.

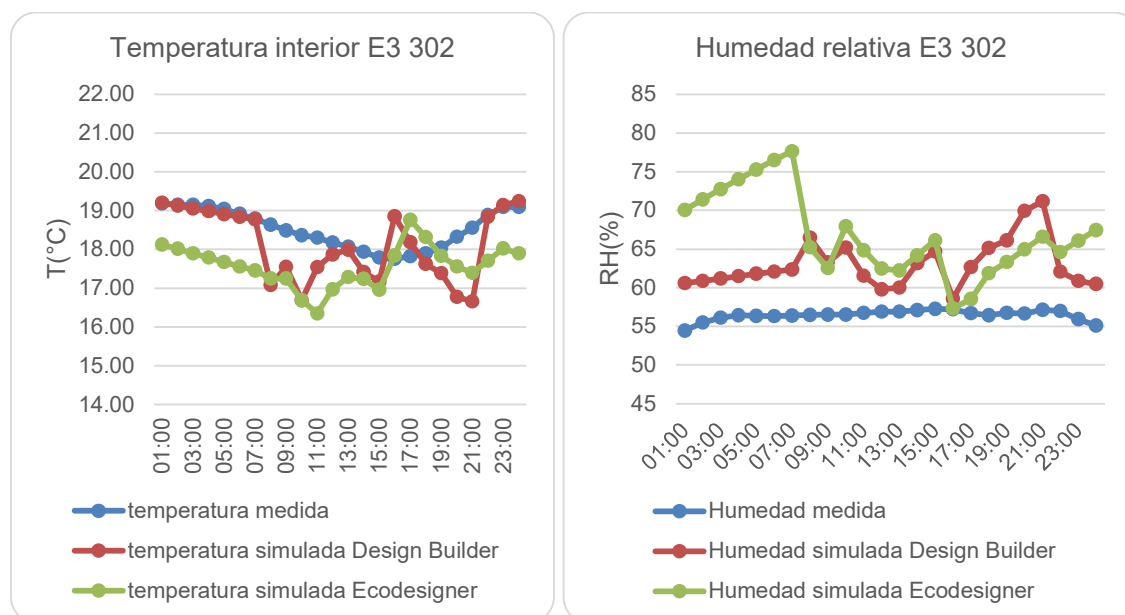


Imagen 18. Gráfica de temperatura y humedad obtenida del aula E3 302.

Los resultados indican que luego de la calibración, la diferencia de resultados en la comparación de la simulación con la medición de temperatura, se reduce de un $\pm 1.51^{\circ}\text{C}$ a un $\pm 0.81^{\circ}\text{C}$ en Design Builder y de un $\pm 2.14^{\circ}\text{C}$ a un $\pm 0.91^{\circ}\text{C}$ en Ecodesigner, para la simulación de humedad el porcentaje de error se reduce de un $\pm 5.59\%$ a un $\pm 5\%$ en Design Builder y de un $\pm 7.98\%$ a un $\pm 6.09\%$ en Ecodesigner.

Tabla 15. Resumen de tablas comparativas con resultados después de la calibración.

	Porcentaje de error			
	TEMPERATURA		HUMEDAD	
AULA	Design Builder	Ecodesigner	Design Builder	Ecodesigner
E1 -105	0.82	0.75	6.67	5.35
E1 011	1.16	1.14	4.45	4.97
E1 108	0.95	0.73	3.98	6.10
E2 003	0.83	1.07	5.51	5.25
E2 102	0.70	0.94	5.16	5.21
E2 203	0.72	1.47	6.41	4.81
E3 -102	0.57	0.44	2.85	6.25
E3 101	0.97	0.60	3.43	6.45
E3 302	0.54	1.07	6.53	10.38
Promedio	0.81	0.91	5.00	6.09

Los edificios demuestran una alta infiltración entre las aulas teniendo el edificio E1 una infiltración de 20 y 30 ACH, activo con variaciones durante el uso de las aulas de 7am a 9pm; En el edificio E2 se tiene una infiltración de 30 y 40 ACH, activo durante el horario de la facultad, en el aula E2 203 la ventilación se mantiene durante las 24H, lo que de ser corroborado con simulaciones en varios días pueda indicar una deficiencia en su hermeticidad ya sea constructiva o en su ubicación ya que no hay edificios a la misma altura que bloqueen los vientos del sur; Y el bloque E3 cuenta con una infiltración de 15 ACH, durante el horario de uso general de la facultad.

En el aula E2 203 en la etapa de calibración también se vio necesario incrementar la infiltración en las ventanas de 20 l/s, m^2 a 40 l/s, m^2 en Ecodesigner Star para reducir la discrepancia ya que en DesignBuilder llegó a su máxima cercanía en ventilación en 30ACH, sin embargo, al no ser un parámetro que se pueda comparar con el software DesignBuilder este dato solo se modificó en esta aula como excepción.

Se identifica que la ventilación natural es considerablemente controlable, de manera que al cerrar las aulas la temperatura se vuelve relativamente estable durante la noche, únicamente dos aulas de este estudio han mantenido niveles de intercambio de aire durante las 24h del

día, para este caso, así como sus pares se debe buscar y sellar juntas, así como cambiar las ventanas por unas que cumplan la normativa y permitan mayor sellado.

Se determina que para este estudio el modelo se encuentra calibrado con resultados $<1^{\circ}\text{C}$ y $<5\%$ HR en DesingBuilder y $<1^{\circ}\text{C}$ y $<6\%$ HR en Ecodesigner STAR en su promedio de las 9 aulas, por lo que es factible su utilización para realizar cambios y optimizar las variables de confort térmico, de manera confiable, previo a su aplicación y comprobación en la realidad.

Es importante mencionar que la toma de medidas se realizó mientras el aulario E3 carecía de un ventanal que formaba parte del diseño original y se retiró temporalmente, este elemento constructivo tuvo gran incidencia en la temperatura interna, de manera que el modelado se encuentra calibrado para el edificio sin ventanales y de considerar volver a colocar el ventanal se debe volver a calibrar el modelo con medidas in-situ.

CAPÍTULO 4

Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Con respecto a la caracterización del clima dentro de las aulas, se identifica según las gráficas, una relativa estabilidad en la temperatura medida de las aulas a lo largo del día y en las aulas en las que estas temperaturas entran en el rango de confort, se considera que tienen una óptima orientación y tamaño de aberturas, sin embargo, en las aulas cuya temperatura es demasiado baja, se deberá incrementar la hermeticidad, o de ser posible buscar estrategias para aumentar la ganancia calórica.
- El parámetro que principalmente altera la temperatura simulada en los softwares es la “infiltración” en DesignBuilder y “ventilación natural” en Ecodesigner STAR, ambos con unidades (ACH), es el dato que dentro de los dos programas condiciona de la misma manera la temperatura obtenida, si bien en DesignBuilder existe el parámetro “ventilación natural”, ésta no genera un impacto perceptible en los valores obtenidos; y de la misma manera en Ecodesigner STAR existe la configuración de “infiltración” la misma se expresa en elementos constructivos, más no por ambiente, y si bien tiene un impacto en la obtención de los datos no es equiparable como el de “ventilación natural”, además, para esta investigación no se modificaron en mayor medida estos valores al no tener una variable equivalente en el software DesignBuilder y gracias a las investigaciones previas que tenían el valor previamente calibrado.
- Los edificios de ladrillo visto tienen mayores intercambios de aire por hora, con 20, 30 y 40 ACH, demuestran una hermeticidad deficiente, sin embargo, gracias a no tener climas muy drásticos y flexibilidad de la vestimenta en los estudiantes, durante su uso se mantiene en gran parte dentro de los rangos de confort.
- El edificio de postgrados (E3) al ser de construcción nueva y con muros de materiales compuestos tiene menos intercambios de aire con 15ACH, de

manera que es controlable con mayor facilidad con ventilación natural y demuestra tener temperaturas dentro del rango de confort.

- Los datos obtenidos antes y después de la calibración nos indican en cuanto afectan que no se cumpla la ocupación, ya que sin calibrar, con los datos que se tendría con un horario general la precisión es de 1.6°C y 7% RH (MAE) aproximadamente, por lo tanto es realista que los datos obtenidos se repliquen como base para el diseño de nuevos aularios e incluso puede plantearse restricciones de uso desde el diseño de los horarios previniendo incrementos muy drásticos en la temperatura, humedad y contaminación del aire interno, que además de controlar el confort y salud de los estudiantes se conserva de forma correcta la infraestructura.
- Se puede interpretar que debido a reducir la ocupación al horario real y modificar la ventilación natural de manera que se reduzca el rango de error en la temperatura interior, también se reduce el rango de error de la humedad relativa al ser un parámetro dependiente de la temperatura.
- Las dos herramientas estudiadas demostraron resultados competitivos y fiables para ser utilizados en climas andinos.
- En aspectos de usabilidad ambas herramientas presentan una interfaz amigable con el usuario y dirigidas hacia las habilidades del profesional acostumbrado al modelado de edificaciones, sin embargo, Ecodesigner STAR al encontrarse dentro de un software BIM, se puede interpretar como de mayor conveniencia ya que muchos profesionales utilizan ya esta herramienta en su práctica diaria, en contraste DesignBuilder al ser una herramienta independiente y especializada, sus limitaciones al momento de modelar aseguran que los ambientes se establezcan correctamente reduciendo la posibilidad de crear puentes térmicos no reales como si se pueden tener en Ecodesigner si en ArchiCAD no se modelan las capas de los materiales tal como se lo construye en la realidad por simplificación del modelo.

4.2 Recomendaciones

- Se puede incrementar la precisión de los datos obtenidos al simular y comparar los datos por varios días, en diferentes épocas del año, y con una toma de

datos por un año entero para poder emitir un promedio más general del rango de error.

- De la misma forma, para un estudio puntual de un aula se puede tomar *in situ* los datos de uso y ocupación con el horario real de uso y la cantidad de personas de cada clase del día, así como computadoras encendidas, actividad realizada y sobre todo teniendo en cuenta abertura de puertas y ventanas en tiempo y porcentaje de apertura.
- En áreas acondicionadas mecánicamente se puede reducir la diferencia de resultados entre los softwares al medir el valor U de la envolvente in-situ en introducirla manualmente.
- Esta investigación puede utilizarse como base para ser reproducida en los diferentes pisos climáticos en las ciudades donde se concentra la población en el país y por ende las edificaciones nuevas; estudiando una tipología constructiva predominante del sitio y tomando medidas en varias épocas del año, lo que genera una base de datos para el país y previene un consumo energético innecesario que puede ser corregido desde la concepción del diseño.
- El rango de discrepancia identificado en simulación de temperatura de ambientes no acondicionados se ve reducido considerablemente al especificar de forma más exacta el horario de uso y modificar la ventilación, sin embargo, en la humedad relativa no presenta una reducción tan importante, con lo que se encuentra la oportunidad de implementar un estudio que investigue específicamente éste fenómeno a través de las otras formas de ganancias calórica.

Referencias

- Abba, H. Y., Abdul Majid, R., Ahmed, M. H., & Ayegbusi, O. G. (2022). VALIDATION OF DESIGNBUILDER SIMULATION ACCURACY USING FIELD MEASURED DATA OF INDOOR AIR TEMPERATURE IN A CLASSROOM BUILDING. *Journal of Tourism, Hospitality and Environment Management*, 7(27), 171–178.
<https://doi.org/10.35631/jthem.727014>
- ASHRAE. (2001). *Handbook of fundamentals*.
- ASHRAE. (2002). *guideline 14*.
- Chong, A., Gu, Y., & Jia, H. (2021). Calibrating building energy simulation models: A review of the basics to guide future work. In *Energy and Buildings* (Vol. 253). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111533>
- Coakley, D., Raftery, P., & Keane, M. (2014). A review of methods to match building energy simulation models to measured data. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 37, pp. 123–141). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>
- Csikos, E. (2020, May 10). *EcoDesigner STAR*. <https://community.graphisoft.com/T5/Project-Data-BIM/EcoDesigner-STAR-Ta-p/304044#toc-HId--738092543>.
- Csikos, E. (2023, March 3). *Energy Evaluation and EcoDesigner Star – a Workflow Overview*. <https://community.graphisoft.com/T5/Project-Data-BIM/Energy-Evaluation-and-EcoDesigner-Star-a-Workflow-Overview-Ta-p/371887>.
- DA DB-HE / 1. Cálculo de Parámetros Característicos de La Envolvente (2015).
- Delta-T Devices Ltd. (2023). *WS-GP2 Advanced Automatic Weather Station System*.
<https://delta-t.co.uk/Product/Ws-Gp2/>.
- DesignBuilder Software. (2009). *DesignBuilder 2.1*.
- Diego-Mas. J. (2015, August 4). *Cálculo del aislamiento térmico de la ropa*. Ergonautas.
<https://www.ergonautas.upv.es/herramientas/aislamiento/aislamiento.php>
- Graphisoft. (2014). *EcoDesigner STAR User Manual*. <http://www.graphisoft.com>

- Huerto-Cardenas, H. E., Leonforte, F., Aste, N., Del Pero, C., Evola, G., Costanzo, V., & Lucchi, E. (2020). Validation of dynamic hygrothermal simulation models for historical buildings: State of the art, research challenges and recommendations. In *Building and Environment* (Vol. 180). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107081>
- Jain, N., Burman, E., Mumovic, D., & Davies, M. (2021). Managing energy performance in buildings from design to operation using modelling and calibration. *Building Services Engineering Research and Technology*, 42(5), 517–531. <https://doi.org/10.1177/01436244211008317>
- Marshall, A., Fitton, R., Swan, W., Farmer, D., Johnston, D., Benjaber, M., & Ji, Y. (2017). Domestic building fabric performance: Closing the gap between the in situ measured and modelled performance. *Energy and Buildings*, 150, 307–317. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.028>
- Ministerio de desarrollo urbano y vivienda (MIDUVI). (2018). *Norma Ecuatoriana de la construcción HS-EE*.
- Ortega, F., & Vintimilla, L. (2023). *Modelado y mediciones de las condiciones ambientales interiores en edificaciones FAUC*.
- Paltán-Cuenca, J., Zalamea-León, E., Astudillo-Flores, M., Ordoñez-Castro, A., & Barragan-Escandón, E. A. (2023). Effects and Improvements in Carpentry for Thermal Comfort in Educational Spaces in Andean Mild Equatorial Climate. *Buildings*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/buildings13123049>
- Quesada Molina, F., & Bustillos Yaguana, D. (2018). Indoor environmental quality of urban residential buildings in Cuenca-Ecuador: Comfort standard. *Buildings*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/buildings8070090>
- Ramos Ruiz, G., & Fernández Bandera, C. (2017). Validation of calibrated energy models: Common errors. *Energies*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/en10101587>
- Serag, H., Mahmoud, M., Kamel, T., & Fahmy, A. (2024). Comparative Validation of a Building Energy Model Calibration Methodology with a Focus on Residential Buildings. *Civil Engineering and Architecture*, 12(3), 1447–1462. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120314>

- Tronchin, L., & Fabbri, K. (2008). Energy performance building evaluation in Mediterranean countries: Comparison between software simulations and operating rating simulation. *Energy and Buildings*, 40(7), 1176–1187. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.10.012>
- Villalba Lozano, C., & Ortiz Morales, N. E. (2016). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA ENTRE DESIGNBUILDER Y ENERGYPLUS CRISTIAN VILLALBA LOZANO*.
- Yu, C., Du, J., & Pan, W. (2019). Improving accuracy in building energy simulation via evaluating occupant behaviors: A case study in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109373>