

Herramienta metodológica para la evaluación energética mediante simulación de edificaciones en el trópico

Methodological tool for energy evaluation through simulation of buildings in the tropic

Jorge Cárdenas-Rangel^{1a}, German Osma-Pinto^{1b}, Gabriel Ordóñez-Plata^{1c}

¹Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (Gisel), Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, Universidad Industrial de Santander, Colombia. Correos electrónicos:

^a jolucara22@gmail.com, ^b gealosma@uis.edu.co, ^c gaby@uis.edu.co

Recibido: 12 enero, 2018. Aceptado: 11 diciembre, 2018. Versión final: 11 marzo, 2019.

Resumen

La interpretación de resultados es una barrera que impide el uso frecuente de herramientas de simulación energética (HSE), en el proceso de diseño de edificaciones. Además, crea requerimientos especiales de experiencia y conocimiento en los usuarios de las HSE, lo que restringe su uso a profesionales expertos. Para facilitar en los usuarios menos experimentados la evaluación del desempeño energético de edificaciones tropicales, se estableció una herramienta metodológica fundamentada en la evaluación comparativa por indicadores. Como valores de referencia, se adoptaron la línea base de la Resolución 0549 de 2015 (Colombia) y el edificio de referencia de la ASHRAE 90.1. Dicha herramienta permitió evaluar el desempeño energético de tres edificaciones, dos de tipo universitario y una residencial. A partir del uso de esta herramienta, se lograron mejoras en el tiempo y la calidad de los resultados.

Palabras clave: desempeño energético de edificios, diseño energético de edificaciones; simulación energética.

Abstract

The interpretation of results is a barrier that prevents the use of Building Energy Simulation Tools (BEST) in the process of building design. This also creates special requirements of experience and knowledge in BEST users, restricting their use to expert professionals. To facilitate users with little experience to carry out the evaluation of the energy performance of tropical buildings, a methodological tool based on a benchmarking by indicators was established. As reference values, Resolution 0549 of 2015 (Colombia) was defined as baseline and ASHRAE 90.1 as the reference building. This tool was applied to evaluate the energy performance of three buildings, two university type and one residential. The results indicate that the use of this tool aids to improve the quality of the results and reduce the time required for analysis.

Keywords: building energy design; energy simulation; building energy performance.

1. Introducción

Las edificaciones consumieron en 2016 cerca del 31 % del total de la energía final mundial, por encima de sectores como la industria y el transporte [1]. En Colombia, dicho sector demandó para ese mismo año cerca del 63 % del total del consumo de energía eléctrica

del Sistema Interconectado Nacional (SIN) [2], y se espera un crecimiento sostenido del 2,1 % anual en los próximos años [3]. Esta demanda energética ocasiona un impacto significativo sobre el medioambiente, y plantea preocupaciones sobre el abastecimiento energético futuro.

Por tal motivo, es necesario mejorar la eficiencia energética de las edificaciones a través de la inclusión de estrategias de uso racional de la energía en el diseño de las edificaciones [4], [5], [6]. Esta tarea es compleja, debido a la interrelación entre las múltiples variables del edificio, sus sistemas y el entorno climático, por lo que es necesario el uso de herramientas de simulación energética (HSE) [7]. Estas coadyuvan en la evaluación de estrategias de diseño, el establecimiento y la evaluación del desempeño energético con respecto a estándares de construcción sostenible [8], [9], [10], [11], [12], [13].

A pesar de las prestaciones de las HSE, existen barreras que dificultan su uso frecuente en el proceso de diseño, la dificultad en la interpretación, y el análisis de resultados se considera la barrera más significativa. De acuerdo con [14]–[16], esta se debe a la forma compleja como se muestran los resultados de simulación y la cantidad excesiva de estos resultados; mientras [17]–[19] asocian esta barrera con el desconocimiento de métodos de análisis para el correcto aprovechamiento de los resultados de simulación.

Esta situación exige competencias especiales de conocimiento y experiencia en los usuarios potenciales de una HSE, que limitan de esta forma su utilización a profesionales expertos [7], [14], [20]–[23]. En ese sentido, el uso de las HSE para el proceso de diseño de edificaciones es un desafío que radica en la necesidad de buscar, mostrar e interpretar resultados relevantes de una forma menos compleja [24].

Recientemente, con la expedición de la Resolución 0549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, se hace necesario el uso de HSE para la verificación de los porcentajes de ahorro energético que deben ser garantizados por las empresas constructoras para nuevas edificaciones, a partir de julio de 2017. Lo anterior, sumado al interés que en el área de diseño energético y sostenible han manifestado entidades como el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) y el Clúster de la Construcción de la Cámara de Comercio de Bucaramanga, ha motivado el desarrollo de esta investigación, que tiene como propósito el establecimiento de una herramienta metodológica enfocada hacia el análisis y evaluación del desempeño energético.

Para alcanzar dicho objetivo, inicialmente se establecieron el escenario de uso, la herramienta de simulación energética más pertinente para el análisis y evaluación energética de edificaciones tropicales, los modelados virtuales de tres edificaciones tropicales en DesignBuilder y el método de evaluación del desempeño

energético. A partir de lo anterior, se identificaron las principales características de un proceso de diseño con enfoque energético aplicable al trópico, y se planteó la herramienta metodológica empleada en el análisis y evaluación del desempeño energético de tres edificaciones tropicales.

2. Métodos

Esta sección describe los procedimientos utilizados en el establecimiento de la herramienta metodológica para el análisis eficiente de simulaciones energéticas en edificaciones tropicales.

2.1. Identificación del escenario de uso

El escenario de uso de la metodología fue identificado a partir de la revisión de las principales características de un proceso de diseño con enfoque energético aplicable al trópico. Cuatro características fueron consideradas en esta revisión: actores, objetivos, herramientas de apoyo y fases.

Una adaptación del proceso de diseño convencional llevado a cabo en Bucaramanga fue realizada debido a la ausencia de información sobre el proceso de diseño con enfoque energético aplicable al trópico. Para dicha adaptación se tuvo en cuenta las recomendaciones de diseño integrado de International Energy Agency [25], The American Institute of Architects [26], y en las guías de diseño avanzado de la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – ASHRAE [24], [27]–[30].

2.2. Selección de la HSE

La identificación de las HSE se realizó considerando una muestra cercana a 100 artículos científicos que evidencian el uso de HSE para el análisis de edificaciones tropicales. La Figura 1 presenta la frecuencia de uso de diferentes HSE encontrada en la muestra de artículos. De acuerdo con esta, las herramientas de simulación energética con mayor representatividad son EnergyPlus – E+ (34%), DesignBuilder- DB (16%), Ecotect - EC (9%) y eQUEST - EQ (10 %), que fueron seleccionadas para realizar el proceso de evaluación.

Con base en lo expuesto en [25]–[28], y considerando el proceso de diseño y el uso de la herramienta en el entorno tropical según publicaciones científicas, se definieron los siguientes criterios de selección: 1) usabilidad y gestión de la información en la interfaz, 2) soporte para la toma de decisiones de diseño, 3) capacidad para simular edificaciones con componentes complejos, 4) interoperabilidad, 5) pertinencia en el proceso de diseño

de edificaciones en trópico y 6) representatividad del uso de la herramienta en el entorno tropical en publicaciones científicas.

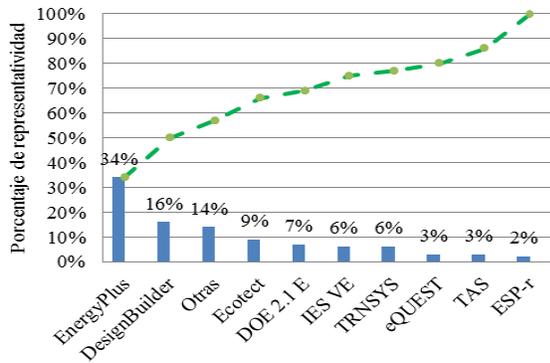


Figura 1. Frecuencia de uso de las herramientas de simulación energética según muestra de artículos científicos. Fuente: elaboración propia.

La puntuación de cada criterio se realizó según el grado de implementación que la característica presenta en la HSE, entre 1 y 5. La tabla 1 muestra la calificación obtenida por cada HSE. A partir de los resultados, se seleccionó a DesignBuilder como la herramienta de simulación energética, debido a que obtuvo la mayor calificación (3,4).

Tabla 1. Calificación de los criterios de selección. Fuente: elaboración propia.

Criterio	DB	E+	EQ	EC
Usabilidad y administración de la información en la interfaz	3,7	2,2	2,5	3,5
Soporte para la toma de decisiones de diseño	3,4	3,3	2,7	2,4
Capacidad para simular edificaciones con componentes complejos	3,2	3,4	2,2	2,2
Interoperabilidad	3,3	2,7	1,0	2,3
Pertinencia en el proceso de diseño de edificaciones en el trópico	3,8	3,4	2,0	3,0
Representatividad en el uso en entornos tropicales	3	4	1	2
Calificación final	3,4	3,2	1,9	2,6

2.3. Modelado virtual

Como edificaciones objeto de estudio se seleccionaron dos edificaciones de tipo universitario (Edificio de Ingeniería Eléctrica – EIE y el Edificio de Ingeniería Industrial – EII de la Universidad Industrial de Santander) y una vivienda de interés social (VIS). Todas las edificaciones consideradas se encuentran ubicadas en

la ciudad de Bucaramanga. La Tabla 2 presenta las características generales de las edificaciones seleccionadas.

Tabla 2. Características generales de las edificaciones seleccionadas.

Característica	EIE	EII	VIS
Área aprox. [m ²]	2.700	6.700	46
Ocupación aprox. [Personas]	1.400	1.700	5
Tipos de espacio	Aulas, oficinas, salas de estudio	Aulas, oficinas, auditorios, salas de estudio	Espacios residenciales
Número de pisos	5 y un sótano	5 y un sótano	2
Orientación fachada principal	Sur	Sur	Sur

Las edificaciones seleccionadas presentan técnicas de construcción y materiales convencionales, tales como muros en ladrillo hueco, pantalla de concreto y *drywall*. En relación a los acristalamientos, el EIE presenta un área de ventanales cercana al 70 % de total de área de la fachada. Para el EII este valor está cerca del 40 %. Mientras para la VIS el área de ventanales es de aproximadamente el 30 %. Los tipos de vidrio más usados son vidrio incoloro de 3 mm (EIE y VIS) y vidrios reflectivos de tonalidad verde con espesores de 3 mm y 4 mm (EII).

El EII cuenta con unidades independientes de climatización en algunos espacios, los demás son climatizados naturalmente. Mientras el EII se caracteriza por un uso intensivo de sistemas de climatización artificial. La VIS fue diseñada para experimentar ventilación natural. El EIE presenta estrategias de ahorro de energía y agua. Cuenta con un área aproximada de 580 m² de cubiertas verdes, 23 tubos solares para iluminación natural cenital, estrategias híbridas (combinación de medidas pasivas y activas) de iluminación y climatización. Para lograr ahorros significativos en agua se incluyeron estrategias como fluxómetros de doble descarga, aireadores y orinales secos.

Los modelos virtuales de las tres edificaciones tropicales fueron construidos en DesignBuilder para realizar el análisis energético y la cuantificación de su desempeño

energético. La Figura 2 presenta los modelos energéticos renderizados de las edificaciones objeto de estudio.

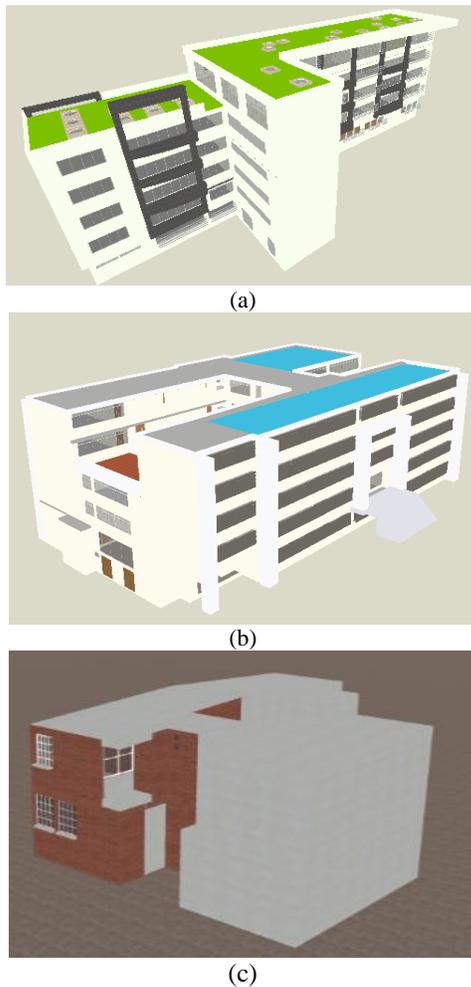


Figura 2. Modelos energéticos creados y renderizados en DesignBuilder del (a) edificio de Ingeniería Eléctrica, (b) edificio de Ingeniería Industrial y (c) vivienda de interés social. Fuente: elaboración propia.

2.4. Método para la evaluación del desempeño energético

La Tabla 3 presenta los indicadores seleccionados para la evaluación del desempeño energético de las edificaciones objeto de estudio. Estos fueron determinados a partir de los hallazgos de una revisión bibliográfica, así como restricciones propias de la HSE.

De acuerdo con estos indicadores, los resultados de simulación útiles para su cuantificación son el consumo energético anual total, el consumo energético anual en refrigeración, el consumo energético anual en iluminación y las emisiones anuales de CO₂.

Tabla 3. Expresiones para el cálculo de los indicadores. Fuente: elaboración propia.

Indicador	Expresión	Convención
Indicador global de desempeño energético (IGDE)	$\frac{CEAT}{A_{Edif}} \left[\frac{kW}{m^2} \right]$	CEAT: Consumo energético anual total. A _{Edif} : Área total ocupada del edificio.
Indicador de desempeño energético en refrigeración (IDER)	$\frac{CEAR}{A_{Edif}} \left[\frac{kW}{m^2} \right]$	CEAR: Consumo energético anual en refrigeración. A _{Edif} : Área total ocupada del edificio.
Indicador de desempeño energético en iluminación – IDEI	$\frac{CEAI}{A_{Edif}} \left[\frac{kW}{m^2} \right]$	CEAI: Consumo energético anual en iluminación. A _{Edif} : Área total ocupada del edificio.
Indicador de emisiones de gases de CO ₂	$\frac{EAG}{A_{Edif}} \left[\frac{kg \text{ de } CO_2}{m^2} \right]$	EA: Emisiones anuales de CO ₂ . A _{Edif} : Área total ocupada del edificio.

Debido a que no se cuenta con un grupo de edificaciones con respecto al cual comparar el desempeño energético de las edificaciones objeto de estudio, se tomó como referencia fija (referencia asociada a estándares o regulaciones) la línea base de la Resolución 0549 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, y como referencia personalizada (autoreferencia) el edificio de referencia del Apéndice G de la AHSRAE 90.1. En total, se realizaron dos simulaciones energéticas, una del modelo virtual de la edificación a evaluar y otra del modelo virtual del edificio de referencia.

3. Resultados

A continuación, se describen los principales hallazgos de la investigación desarrollada.

3.1. Proceso de diseño con enfoque energético

Un proceso de diseño con enfoque energético busca edificaciones de mejores calidades energéticas y ambientales a través de la definición de objetivos de desempeño en las primeras etapas del proceso, la inclusión de estrategias de ahorro energético y el uso de herramientas computacionales de vanguardia [29].

Los actores del proceso de diseño con enfoque energético se encuentran organizados en una estructura circular y colaborativa, diferente a la estructura jerárquica del proceso de diseño convencional. El equipo de diseño incorpora nuevos miembros, como el especialista en

diseño verde o simulación energética. Los objetivos que orientan un proceso de diseño con enfoque energético se organizan en torno a cuatro categorías: energía, ambiente, comodidad y economía.

Se encontraron dos grupos principales de herramientas computacionales de apoyo al proceso de diseño con enfoque energético, herramientas de modelado y herramientas de análisis [30]. Las primeras permiten representar gráficamente el diseño del edificio, así como la información más relevante asociada a esta, a través de planos 2D y modelos 3D. Dentro de este grupo se encuentran la mayoría de las herramientas de tipo CAD

tales como AutoCAD, ArchiCAD, Revit y Google SkethUp. Por su parte, las herramientas de análisis permiten dar soporte a la toma de decisiones durante todo el proceso de diseño, y dentro de estas se encuentran las herramientas de simulación energética.

Un proceso de diseño con enfoque energético presenta generalmente cuatro fases: diseño conceptual, diseño esquemático, desarrollo del diseño y documentos de construcción. La Figura 3 presenta el esquema general del proceso de diseño energético adaptado a edificaciones de la ciudad de Bucaramanga.

Diseño conceptual

- Establecimiento de requerimientos del propietario.
- Definición de objetivos de diseño.
- Identificación de medidas de ahorro energético.
- Diseño arquitectónico preliminar del edificio.

Diseño esquemático

- Selección de las medidas de ahorro energético.
- Distribución espacial de la edificación.
- Identificación del sistema estructural del edificio.
- Configuración de los diferentes elementos de la envolvente del edificio.
- Revisión alternativas de sistemas HVAC.
- Estimación preliminar de costos.
- Evaluación del diseño esquemático con respecto ahorros energéticos y objetivos.

Desarrollo del diseño

- Finalización del diseño arquitectónico y estructural.
- Diseño eléctrico, hidrosanitario y otros.
- Refinación de costos.
- Elaboración de los modelos virtuales usados para demostrar el cumplimiento con estándares y regulaciones.
- Verificación de los objetivos de diseño.

Documentos de construcción

- Definición de planos, memorias y especificaciones finales de las medidas de ahorro energético y sistemas de la edificación.
- Establecimiento del cronograma de construcción.
- Preparación de documentos de construcción.

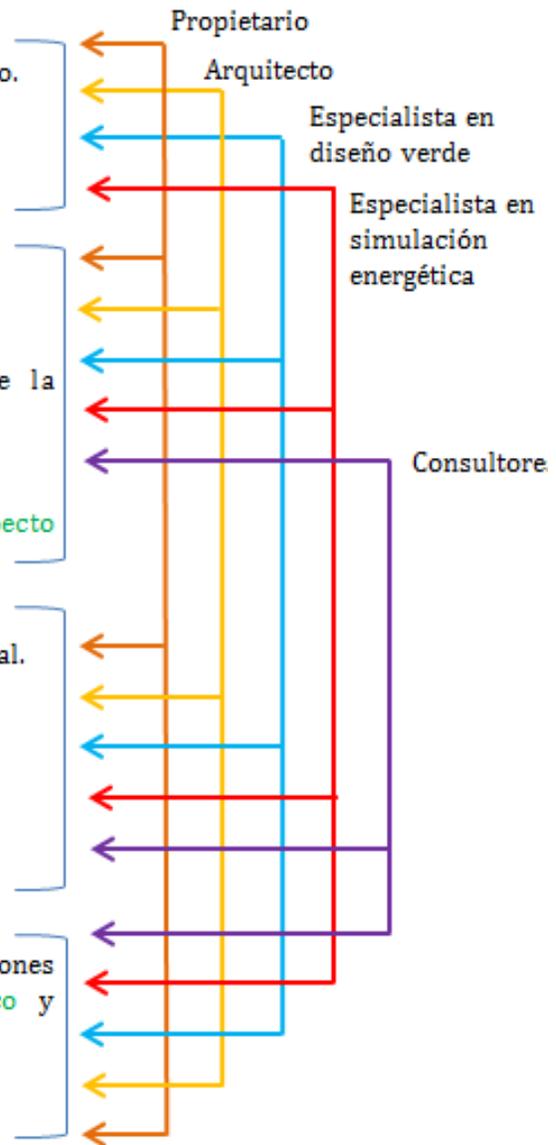


Figura 3. Esquema general de un proceso de diseño con enfoque energético.

3.2. Plateamiento de la herramienta metodológica

Considerando los requerimientos de cada fase del proceso de diseño con enfoque energético, se establece que la herramienta metodológica puede ser utilizada en la evaluación energética del diseño, llevada a cabo en la fase de desarrollo del diseño.

La herramienta metodológica se encuentra constituida por cuatro fases organizadas en forma secuencial: 1) definición del tipo de edificación a evaluar, 2) modelado virtual, 3) simulación energética y 4) evaluación del desempeño energético. Esta se encuentra fundamentada en el método de evaluación comparativa del desempeño energético mediante indicadores. La Figura 4 presenta el esquema general de la herramienta metodológica.

En cuanto a su alcance de aplicación, la herramienta metodológica puede ser utilizada para el análisis y evaluación del desempeño energético de todo tipo de edificaciones tropicales existentes y en diseño a excepción de edificaciones residenciales de baja altura (viviendas unifamiliares).

La herramienta metodológica se encuentra adaptada a DesignBuilder, HSE, que resultó seleccionada en la Sección 2.2. En caso de no utilizarla, se recomienda el uso de una HSE con características similares tal como EnergyPlus, o cualquiera de sus interfaces gráficas, teniendo en cuenta realizar la adaptación de los procedimientos de las fases de “Modelado virtual de la edificación” y “Simulación energética” según las particularidades de la herramienta empleada.

3.3. Resultados del análisis energético preliminar

La Tabla 4 presenta los resultados de consumo energético de las edificaciones objeto de estudio.

Tabla 4. Desglose consumo energético edificaciones objeto de estudio. Fuente: elaboración propia.

Consumo [kWh]	EIE	EII	VIS
Consumo energético equipos	24.665,7	70.410,5	1.538,0
Iluminación	11.816,4	53.010,3	232,6
Refrigeración	12.756,3	123.810,1	0
TOTAL	49.238,4	247.230,9	1770,6

En los resultados se aprecia que el EII presenta un consumo energético anual de 247 345 kWh, de los cuales el 28,2 % corresponde al consumo de equipos instalados y otros que se pueden conectar, 21,2 % a iluminación y

50,7 % a refrigeración. En el caso del EIE, el mayor consumo energético corresponde al consumo de equipos instalados y otros que se pueden conectar (50 % del total de consumo energético).

Tabla 5. Resultados del confort térmico de las edificaciones objeto de estudio. Fuente: elaboración propia.

Variable	EIE	EII	VIS
Temp. anual promedio	25,5	26,3	26,5
Humedad relativa anual prom.	67,3	66,1	69,9
VMP de Fanger	0,95	0,78	0,70
VMP de Pierce	1,37	1,12	1,16
VMP TEE de Pierce	1,51	1,29	1,38
VST Univ. de Kansas	0,88	0,83	0,93

La Tabla 5 muestra los resultados de simulación asociados al confort térmico. Se indica que las temperaturas de los espacios de las edificaciones presentan temperaturas del aire que van desde los 25°C a los 31°C. Las temperaturas más altas fueron encontradas en algunos espacios de la VIS. La humedad relativa en todos los casos fue cercana al 70 %.

La Tabla 6 presenta los resultados de las ganancias térmicas interiores, los cuales revelan que las mayores fuentes de calentamiento en los espacios interiores de las edificaciones consideradas son las ganancias térmicas asociadas a la radiación solar en ventanales exteriores, ocupación y equipos de cómputo. Para la VIS también son representativas las ganancias térmicas asociadas al procesamiento de alimentos.

Tabla 6. Resultados de ganancias térmicas interiores. Fuente: elaboración propia.

Ganancias [kWh]	EIE	EII	VIS
Iluminación	11.816,4	529.74,56	232,5
Ventanas exteriores	304.345,2	435.388,6	8.432,5
Varias	5.529,8	16.844,8	505,4
Computadores y equipos	18.941,0	50.516,5	151,1
Ocupación	104.731,9	268.355,2	3.161,3
Cocina	180	3.051,4	881,5

Los resultados permitieron evidenciar en el EIE un efecto de inercia térmica en los muros exteriores de *drywall* con respecto a los de ladrillo. Este efecto es generado por el aire en el interior de las láminas de *drywall*. La cubierta presenta las menores ganancias térmicas de los cerramientos (1,58 kWh), este comportamiento se debe al efecto de aislamiento ocasionado por el techo verde.

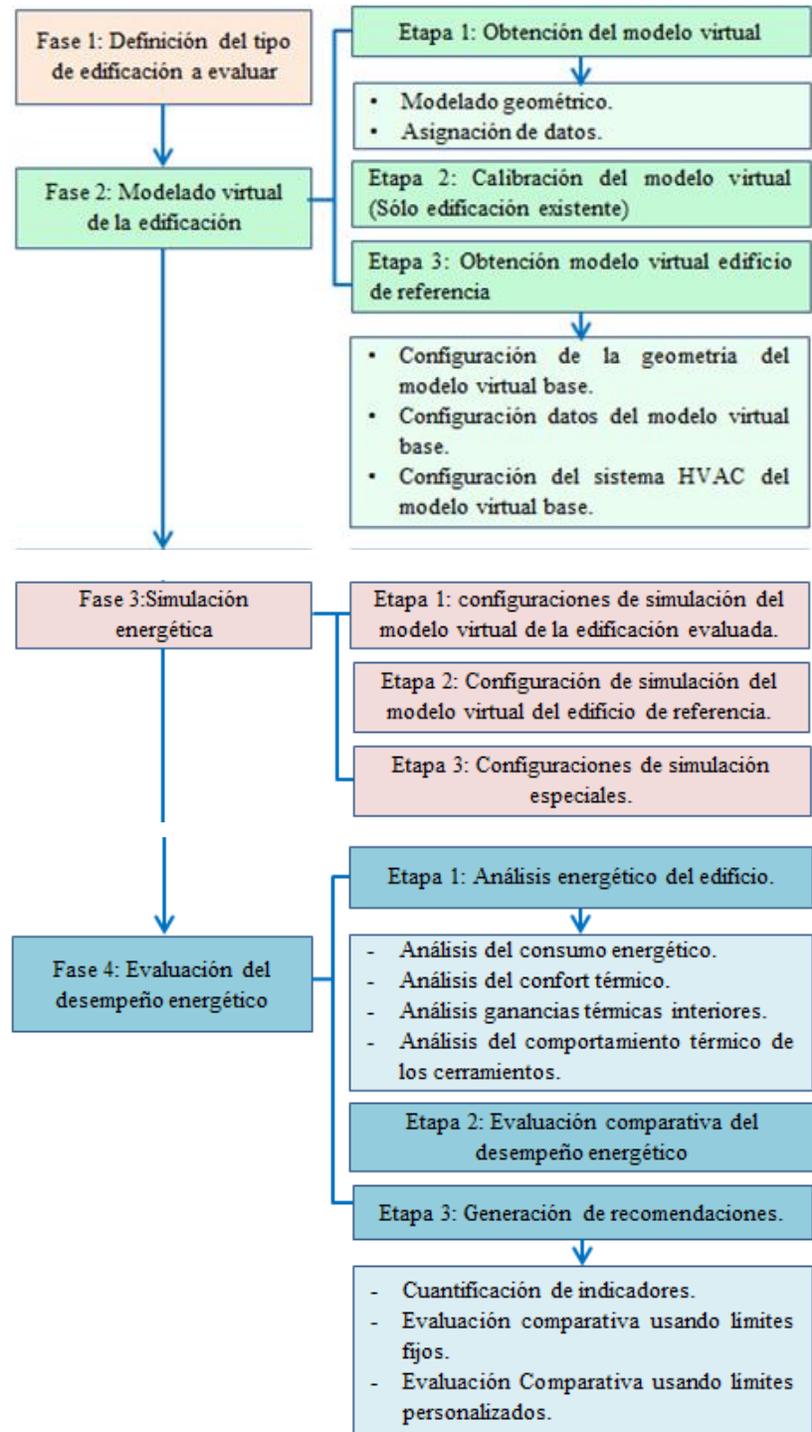


Figura 4. Esquema general de la herramienta metodológica para la evaluación del desempeño energético de edificaciones en el trópico.

Los muros exteriores del EII presentan un efecto de acumulación térmica durante el periodo de mayor radiación solar. La cubierta presenta un comportamiento similar al de los muros exteriores. Para la VIS, las mayores ganancias térmicas se dan en los muros exteriores y en la cubierta.

3.4. Resultados de la evaluación del desempeño energético

La Tabla 7 presenta los indicadores de desempeño energético del EIE y el EII, los cuales fueron determinados a partir de las simulaciones de los modelos virtuales real y de referencia de los edificios EIE y EII.

Tabla 7. Indicadores de desempeño energético EIE y EII. Fuente: elaboración propia.

Indicador	EIE			EII		
	Real	Base	Ahorro	Real	Base	Ahorro
IGDE (kWh/m ²)	17,6	77,4	77,2 %	36,8	78,7	53,2 %
IDER (kWh/m ²)	4,6	40,6	88,8 %	18,4	42,0	56,1 %
IDEI (kWh/m ²)	4,2	16,3	74,1 %	7,9	16,2	51,2 %
IEG kg (CO ₂ /m ²)	12,1	53,1	77,2 %	22,2	53,9	58,8 %

EIE presenta un ahorro energético del 77,2 % con respecto a su edificio de referencia. Este ahorro es evidente en los indicadores de desempeño energético de refrigeración e iluminación, los cuales disminuyeron un 89 % y 74 %, respectivamente, por efecto de estrategias de ahorro como ventilación natural, iluminación natural por ventanales y tubos solares, y cubierta verde.

Para el EII, el indicador global de desempeño energético muestra un ahorro aproximado del 53,2 % con respecto al edificio de referencia. Los indicadores de desempeño energético en refrigeración e iluminación presentan una reducción aproximada del 56 % y el 51 % respectivamente. En este caso, dichas reducciones se encuentran asociadas al uso de sistemas de climatización de alto coeficiente de rendimiento y a la reducción de la potencia de iluminación. Al considerar el IEG, se encontró que el EIE presenta aproximadamente 50 % menos de emisiones de CO₂ que el EII. Un porcentaje similar fue encontrado al comparar las emisiones de los edificios evaluados con respecto a su referencia.

Adicionalmente, se comparó el indicador global de desempeño energético de los dos edificios con la línea base de la Resolución 0549 del Ministerio de Vivienda,

Cuidad y Territorio, la cual tiene un valor de 72 kWh/m² año. En el caso del EIE, se encontró un porcentaje de ahorro del 75,5 %, mientras que para el EII dicho valor fue del 48,9 %. En ambos casos, el porcentaje de ahorro está por encima del 40 %, valor mínimo aceptable para edificaciones de uso educativo en el clima cálido seco al que corresponde Bucaramanga.

Esta comparación también se realizó para la VIS. En este caso, el IGDE es de aproximadamente 38 kWh/m² – año. Valor cerca del 10 % superior a la línea base de la Resolución 0549 del Ministerio de Vivienda, Cuidad y Territorio (34,6 kWh/m² – año). Este comportamiento se debe al número significativo de electrodomésticos que presenta la vivienda estudiada.

Para valorar el desempeño energético de los EIE y el EII, se evaluó el porcentaje de ahorro de cada edificación en las escalas de valoración del LEED NC, BREEAM y CALENER. La Tabla 8 muestra que el EIE presenta un mejor desempeño energético que el EII según el sistema de valoración BREEAM. La evaluación con LEED NC otorga la misma puntuación a ambas edificaciones, debido a que ambas edificaciones presentan un ahorro superior al 42 %.

Tabla 8. Valoración del desempeño energético del EIE y el EII según sistemas de evaluación LEED, BREEAM y CALENER. Fuente: elaboración propia.

Escala	EIE	EII
LEED [Puntos]	10	10
BREEAM [Puntos]	15	13
CALENER [Etiqueta]	A	B

Por su parte, la escala CALENER permite diferenciar más claramente el desempeño energético de las dos edificaciones consideradas, debido a que esta escala solo tiene tres intervalos diferenciados de desempeño. De acuerdo con esta escala, el EIE presenta un mejor desempeño (etiqueta A) con respecto al EII (etiqueta B).

4. Conclusiones

De acuerdo con la adaptación realizada, un proceso de diseño con enfoque energético aplicable al trópico presenta las mismas fases de un proceso de diseño convencional. Requiere la definición temprana de objetivos de desempeño energético y ambiental, la inclusión al equipo de diseño de especialistas en diseño verde y eficiencia energética, y el uso de HSE como soporte para la toma de decisiones y la evaluación de los diseños.

Las herramientas de simulación energética más utilizadas en entornos tropicales son EnergyPlus, DesignBuilder,

Ecotect e eQUEST. Una evaluación de las capacidades de cada herramienta reveló que DesignBuilder presenta mejor desempeño en cuanto a usabilidad, soporte para la toma de decisiones, interoperabilidad y pertinencia en el diseño de edificaciones en el trópico.

En relación a la evaluación del desempeño energético, el EIE representa un ahorro energético del 77,2 % con respecto a su edificio de referencia. Este comportamiento es debido al efecto de ventilación natural, iluminación natural por ventanales y tubos solares, y cubierta verde. Para el caso del EII el ahorro energético fue del 53 %.

Es común encontrar en la literatura el uso del modelo base del Apéndice G de la ASHRAE 90,1 como valor de referencia personalizado para la evaluación comparativa del desempeño energético de edificaciones. Sin embargo, se encontró que este referente no es del todo adecuado para el análisis de edificaciones en zonas tropicales, debido a factores propios de la arquitectura tropical que no permiten contar con edificaciones que estén totalmente aisladas del exterior.

La herramienta metodológica propuesta presenta una estructura lógica y ordenada que indica al usuario los procedimientos para analizar y evaluar el desempeño energético de una edificación tropical. De esta manera, se reducen los requerimientos de conocimiento y experiencia del usuario, así como los tiempos y la calidad de los análisis.

Referencias

- [1] Global Alliance for Buildings and Construction, “Global Status Report 2016,” pp. 1–32, 2016.
- [2] Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, “Balance Energetico Colombiano - Beco”, [En línea]. Disponible en: <http://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/BalanceEnergetico.aspx>. [Accedido: 04-mar-2019].
- [3] Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, “Escenarios de proyección de demanda,” 2015. [[En línea]. Disponible en: <http://www.siel.gov.co/siel/Home/Demanda/tabid/60/Default.aspx>. [Accedido: 05-Mar-2017].
- [4] G. A. Osma and G. Ordoñez, “Desarrollo sostenible en edificaciones,” *Rev. Uis Ing.*, vol. 9, no. 1, 2010.
- [5] Área Metropolitana del Valle de Aburrá and Universidad Pontificia Bolivariana, *Política Pública de Construcción Sostenible: Línea Base*, 2015.
- [6] Departamento Nacional de Planeación, “Política nacional de edificaciones sostenibles. CONPES 3919,” pp. 39, 2018.
- [7] G. Mustafaraj, D. Marini, A. Costa, and M. Keane, “Model calibration for building energy efficiency simulation,” *Appl. Energy*, vol. 130, pp. 72–85, 2014. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.05.019
- [8] A. N. Sadeghifam, S. M. Zahraee, M. M. Meynagh, and I. Kiani, “Combined use of design of experiment and dynamic building simulation in assessment of energy efficiency in tropical residential buildings,” *Energy Build.*, vol. 86, pp. 525–533, 2015. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.052
- [9] A. Dutta, A. Samanta, and S. Neogi, “Influence of orientation and the impact of external window shading on building thermal performance in tropical climate,” *Energy Build.*, vol. 139, pp. 680–689, 2017. doi: 10.1016/j.enbuild.2017.01.018
- [10] L. Wang, X. Liu, and H. Brown, “Prediction of the impacts of climate change on energy consumption for a medium-size office building with two climate models,” *Energy Build.*, vol. 157, pp. 218–226, 2017.
- [11] W. Bustamante, D. Uribe, S. Vera, and G. Molina, “An integrated thermal and lighting simulation tool to support the design process of complex fenestration systems for office buildings,” *Appl. Energy*, vol. 198, pp. 36–48, 2017. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.04.046
- [12] X. Cui, B. Mohan, M. R. Islam, S. K. Chou, and K. J. Chua, “Energy performance evaluation and application of an air treatment system for conditioning building spaces in tropics,” *Appl. Energy*, vol. 204, pp. 1500–1512, 2017. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.03.067
- [13] A. S. Silva, L. S. S. Almeida, and E. Ghisi, “Decision-making process for improving thermal and energy performance of residential buildings: A case study of constructive systems in Brazil,” *Energy Build.*, vol. 128, pp. 270–286, 2016. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.084
- [14] S. Attia, “State of the Art of Existing Early Design Simulation Tools for Net Zero Energy Buildings: A Comparison of Ten Tools,” en *12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 2011.
- [15] D. Markovic, D. Cvetkovic, and B. Masic, “Survey of software tools for energy efficiency in a community,”

Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 15, no. 9, pp. 4897–4903, 2011.

[16]C. M. Hui, “Building Energy Simulation Methods,” en *Energy Performance of Air-conditioned Buildings in Hong Kong*, 1996, pp. 168–223.

[17]M. M. Mourshed, D. Kelliher, and M. Keane, “Integrating Building Energy Simulation in the design process,” *IBPSA*, vol. 13, pp. 21–26, 2003.

[18]C. Morbitzer, P. Strachan, J. Webster, B. Spires, and D. Cafferty, “Integration of building simulation into the design process of an architecture,” en *Eighth International IBPSA Conference*, Netherlands, 2001, pp. 697–704.

[19]M. K. Dixit, J. L. Fernández-Solís, S. Lavy, and C. H. Culp, “Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 8, pp. 1238–1247, 2010.

[20]C. J. Hopfe, “Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization,” tesis doctoral, University of Technology, 2009.

[21]T. L. Hemsath, “Conceptual energy modeling for architecture , planning and design : impact of using building performance simulation in early design stages,” en *13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 2013, pp. 376–384.

[22]T. Hong, S. K. Chou, and T. Y. Bong, “Building simulation : an overview of developments and information sources,” *Building and Environment*, vol. 35, pp. 347–361, 2000. doi: 10.1016/S0360-1323(99)00023-2

[23]D. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert, and B. T. Griffith, “Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs,” *Build. Environ.*, vol. 43, no. 4, pp. 661–673, Apr. 2008.

[24]*Advanced Energy Design Guide for Large Hospitals*, ASHRAE, The American Institute of Architects, Illuminating Engineering Society of North America, U.S Green Building Council, and U.S. Department of Energy, 2012.

[25]S. Attia and L. La Neuve, “Building Performance Simulation Tools : Selection Criteria and User Survey,” 2010. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2268/168350>

[26]L. Weytjens, S. Attia, G. Verbeeck, and A. De Herde, “A comparative study of the ‘ architect - friendliness ’ of six building performance simulation tools”, *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, vol. 2, no. 3, pp. 237-244, 2012. doi: 10.5390/SUSB.2011.2.3.237

[27]H. S. Rallapalli, “A comparison of EnergyPlus and eQUEST: Whole Building Energy Simulation Results for a Medium Sized Office Building,” tesis doctoral, *Arizona State University*, 2010.

[28]*Ashrae Handbook: Fundamentals*, ASHRAE American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, vol. 30329, no. 404, 2009.

[29] *Integrated Design Process*, International Energy Agency, no. april, 2003.

[30]P. de Wilde, "Computational Support for the Selection of Energy Saving Building Components", en *Eighth International IBPSA Conference*, Netherlands, 2004, pp. 1409-1416.